



# НАУКА -

# образованию, производству, экономике

Материалы Пятой  
международной  
научно-технической  
конференции



# 1

**Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**НАУКА –  
ОБРАЗОВАНИЮ,  
ПРОИЗВОДСТВУ,  
ЭКОНОМИКЕ**

**Материалы Пятой международной  
научно-технической конференции  
В 2 томах**

**Том 1**

**Минск  
2007**

УДК 001:[37+658+338](063)

ББК 72.431-

В сборнике представлены материалы Пятой международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике», тематика которых посвящена актуальным проблемам современной науки.

Редакционная коллегия:

Б.М. Хрусталеv – д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, Ф.А. Романюк – д-р техн. наук, профессор, А.С. Калининченко, д-р техн. наук.

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. Анищенко В.А., канд. техн. наук, доц. Новаш И.В., канд. техн. наук Лесян Н.М., канд. техн. наук, доц. Бладыко Ю.В., канд. техн. наук, доц. Радкевич В.Н., канд. техн. наук, доц. Олешкевич М.М., канд. техн. наук, доц. Гончар А.А., канд. техн. наук, доц. Козловская В.Б., д-р техн. наук, проф. Фурсанов М.И., канд. техн. наук, доц. Запатрин Р.И., канд. техн. наук, доц. Альферович В.В., канд. техн. наук, доц. Петрученко А.Н., канд. техн. наук, проф. Кухарева Н.Г., д-р техн. наук, проф. Соколов Ю.В., д-р техн. наук, проф. Ситкевич М.В., д-р техн. наук Бобровник А.И., канд. техн. наук, доц. Расолько А.М., канд. техн. наук, доц. Жданович Ч.И., канд. техн. наук, доц. Ковалев Л.Д., канд. техн. наук, доц. Есьман Г.А., д-р техн. наук, проф. Неменюк Б.М., д-р техн. наук, проф. Несенчук А.П., канд. техн. наук, доц. Равино В.В., канд. техн. наук Урбанович Н.И., канд. техн. наук, доц. Цыбуленко П.В., д-р техн. наук, проф. Кислов Н.В., канд. техн. наук, доц. Горбутович В.Г., канд. арх., доц. Сергачев С.А., д-р арх. Морозов В.Ф., доц. Сысоева О.И., канд. арх., проф. Трацевский В.В., канд. техн. наук, доц. Шнишляков П.В., канд. техн. наук, доц. Позняк А.С., канд. техн. наук, доц. Бабаскин Ю.Г., канд. техн. наук, проф. Нестеренок М.С., канд. геогр. наук, доц. Михайлов В.И., канд. техн. наук, доц. Авсиевич А.М., канд. техн. наук, доц. Кудин В.В., канд. техн. наук Дмитриченко А.С., канд. техн. наук, доц. Недбальский В.К., канд. техн. наук, доц. Ивашечкин В.В., канд. техн. наук, доц. Ледян Ю.П., канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Павлович А.Э., д-р техн. наук, проф. Качанов И.В., канд. техн. наук, доц. Кравченко С.Е., канд. техн. наук, проф. Широкий Г.Т., д-р техн. наук, проф. Пецольт Т.М., д-р техн. наук Шемет С.Ф., канд. физ.-мат. наук, доц. Олефир Г.И., канд. техн. наук, доц. Пащенко А.В., канд. физ.-мат. наук, доц. Шашков Е.А., д-р техн. наук, доц. Орда А.Н., канд. техн. наук, доц. Василевский А.В., канд. техн. наук, доц. Радкевич В.Н., канд. техн. наук, проф. Павлович С.Н., д-р физ.-мат. наук, проф. Зуйков И.Е., канд. техн. наук, вед. науч. сотр. Пальченко Г.И., канд. техн. наук, доц. Кравченко Е.В., канд. техн. наук, доц. Хутская Н.Г., канд. техн. наук, доц. Ганжин А.А., канд. физ.-мат. наук, доц. Кужир П.Г., канд. техн. наук, доц. Новичихин Р.В., канд. техн. наук, доц. Самойленко А.В., канд. техн. наук, доц. Протасевич А.М., канд. техн. наук, доц. Борухова Л.В., канд. техн. наук, доц. Тарасевич Л.А., канд. техн. наук, доц. Коротинский В.А., д-р техн. наук, проф. Присевко А.Ф., д-р техн. наук, проф. Мазярно А.Д., канд. техн. наук, проф. Артохина Н.К., канд. техн. наук, доц. Филонова М.И., канд. техн. наук, проф. Цитович Б.В., д-р техн. наук, проф. Леонович И.И., канд. техн. наук, доц. Логачев М.В., д-р техн. наук, проф. Пантелеев Ф.И., д-р техн. наук, проф. Ложечников Е.Б., канд. техн. наук, доц. Калский Д.В., канд. техн. наук, доц. Лукьянчук А.Д., д-р техн. наук, проф. Михневич Э.И., д-р техн. наук, проф. Трусова И.А., д-р техн. наук, проф. Ярошевич В.К., канд. техн. наук, доц. Андрианов Д.Н., канд. техн. наук, доц. Мытько Л.Р.

ISBN 978-985-479-817-2 (Ч.1)

ISBN 978-985-479-819-6

© Белорусский национальный  
технический университет, 2007

# Технические и прикладные науки

## Электроэнергетика

УДК 621.313

### Особенности выбора кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена

Романов Р. В., Радкевич В. Н.

Белорусский национальный технический университет

В системах электроснабжения все большее применение находят кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). К началу 2007 года в г. Минске эксплуатировалось более 40 км таких линий на напряжении 10кВ. Все питающие линии, прокладываемые от шин 10кВ понижающих подстанций до распределительных пунктов, как правило, проектируются в однофазном исполнении с применением кабелей, изоляция которых выполнена из СПЭ. Кабели такого типа существенно отличаются от кабелей традиционного исполнения с бумажной изоляцией, как по конструкции, так и по применяемым материалам. Это вызывает необходимость учитывать некоторые особенности, возникающие при выборе кабелей с полимерной изоляцией.

Условно процесс выбора кабеля с изоляцией из СПЭ можно подразделить на этапы:

1. Принятие решения о применении трехжильных либо одножильных кабелей.
2. Выбор рабочего напряжения (уровня изоляции) кабеля.
3. Выбор сечений жил и сечения экрана кабеля.
4. Выбор конструктивных особенностей (герметизация, материал жилы, материал оболочки, исполнение оболочки, способ производства изоляции и т. п.).

В настоящее время городские распределительные сети работают на напряжении 6-10 кВ. Такие сети в большинстве случаев

работают в режиме компенсированной нейтрали. Поскольку технические условия, по которым выпускаются кабели с изоляцией из СПЭ, разрабатываются согласно требованиям МЭК, то при выборе кабеля необходимо пользоваться стандартом МЭК 60502-2. Данным документом определяется номинальное напряжение кабельной линии и вводится понятие категории сети – А, В, С. Категории регламентируют время работы сети с однофазным замыканием на землю: А- менее 1 минуты, В- менее 8 часов но не более 125 часов в год, С - все остальные. В соответствии с этим документом, если предполагается, что система электроснабжения довольно часто будет работать с однофазными замыканиями на землю, то рекомендуется ее классифицировать по категории С. По условиям наихудших возможных режимов было принято решение отнести сети электроснабжения города Минска к категории С. Для сети категории С номинальное напряжение кабеля выбирается по максимальному линейному напряжению, которое в данном случае равно 12кВ. Для сети категории С номинальное фазное напряжение принимается 8,7 кВ. Следовательно, необходимо применять кабель на напряжение 8,7/15(17,5) кВ с номинальной толщиной изоляции 4,5 мм.

Согласно существующим нормам проектирования площадь сечения жил кабелей выбирается по экономической плотности тока и проверяется по нагреву расчетным в послеаварийном или ремонтном режиме, а также по термической стойкости. До настоящего времени не разработаны экономические плотности тока для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, а использование норм, установленных для кабелей с пластмассовой изоляцией, может привести к ошибкам при проектировании. Поэтому выбор кабелей с изоляцией из СПЭ следует осуществлять на основе сопоставительного технико-экономического расчета. Длительно допустимые токи для кабелей 6-10кВ с пластмассовой изоляцией в нормативно-справочной литературе отсутствуют. Отметим, что кабели с изоляцией из СПЭ имеют допустимую температуру нагрева жилы 90 °С, что обеспечивает их значительно большую токовую нагрузку по сравнению с аналогичными кабелями, имеющими бумажную изоляцию. По данным заводов-производителей длительно допустимые токи кабелей с изоляцией из СПЭ примерно на 17% больше, чем кабелей

с бумажной изоляцией. Температура нагрева жилы при коротких замыканиях для кабелей с изоляцией из СПЭ составляет 250° С, а для кабелей с бумажной изоляцией - 200° С. При проверке кабелей с изоляцией из СПЭ на термическую стойкость пользуются информацией заводов-производителей, в которой указываются допустимые односекундные токи КЗ для сечений и поправочный коэффициент  $K=1/\sqrt{t}$  для учета фактического времени отключения  $t$  линии при КЗ.

Одной из особенностей выбора кабельных линий одножильных с изоляцией из СПЭ является определение необходимого сечения экрана. Основой для определения сечения экрана является его термическая стойкость при КЗ. Согласно существующим правилам в качестве расчетного вида КЗ для определения термической стойкости следует принимать трехфазное. Расчет трехфазного тока КЗ производится в наихудшем месте, т.е. непосредственно у шин центра питания. Остальные действия аналогичны выбору сечения жилы по допустимому току КЗ. Другая особенность выбора экранов состоит в возможности протекания по экрану тока замыкания на землю в некомпенсированной сети. Данную проверку можно легко осуществить с помощью расчетного значения тока замыкания на землю.

Герметизация кабелей с изоляцией из СПЭ может быть двух типов: Г и 2Г. У кабелей с герметизацией (типа Г и 2Г) накладывается водоблокирующая лента на основную изоляцию поверх проводящего слоя под экран. Кабели с герметизацией типа 2Г имеют дополнительный алюмополимерный слой под оболочкой. Такие кабели прокладываются в земле, а также в воде (в несудоходных водоемах). В земле, независимо от коррозионной активности грунтов, могут прокладываться кабели с изоляцией из СПЭ без герметизации. Оболочка может быть изготовлена из полиэтилена для наружной прокладки либо из ПВХ пластика для прокладки внутренней.

Вывод.

Выбор кабелей с изоляцией из СПЭ необходимо производить с учетом их технико-экономических и конструктивных особенностей. Для этого требуется внести соответствующие дополнения в нормы проектирования, регламентирующие выбор кабелей.

УДК 621.316

**Опыт эксплуатации электрических  
подстанций 110/10 (6) кВ**

Дроздов И. В.

Белорусский национальный технический университет

Оборудование части подстанций Белорусской энергосистемы полностью исчерпало свой не только физический, но и моральный ресурс. Это подстанции, которые были введены в работу в 50-е – 60-е годы XX века. Замена оборудования этих подстанций входит в долгосрочные планы развития энергосистемы. В основном планируется на таких подстанциях реконструкция закрытого распределительного устройства (ЗРУ) 10(6)кВ с заменой устаревших ячеек комплектного распределительного устройства (КРУ) на современные с вакуумными выключателями. Так же планируется частичная или полная замена оборудования открытого распределительного устройства (ОРУ) 110(35)кВ, прежде всего связанная с заменой высоковольтных масляных выключателей напряжением 110кВ на элегазовые и напряжением 35кВ на вакуумные.

На подстанциях, введённых в работу в 70-х – 80-х годах XX века проводимые реконструкции связаны прежде всего с заменой морально устаревшей схемы «отделитель-короткозамыкатель». Отделитель 110кВ заменяется на элегазовый выключатель с разъединителем. В ЗРУ-10(6)кВ производится частичная реконструкция, которая заключается в пристыковке к сборным шинам через переходные ячейки новых типов КРУ с вакуумными выключателями или замена только выкатного элемента КРУ с масляным выключателем на вакуумный.

Замена схемы «отделитель-короткозамыкатель» на элегазовый выключатель 110кВ значительно повышает надёжность электроснабжения потребителей и работы оборудования части энергосистемы. Это связано прежде всего с тем, что при развитии аварии на одном присоединении одной из подстанций отпадает необходимость создания искусственного короткого замыкания короткозамыкателем на линии электропередач (ЛЭП) 110кВ, питающей другие подстанции энергосистемы.

На подстанциях, введённых в работу в конце XX – в начале XXI века оборудование устанавливалось по последнему слову техники.

Единственной проблемой эксплуатации вакуумных выключателей является сравнительно небольшой ресурс вакуумной дугогасительной камеры, замена которой требуется уже после нескольких десятков отключений коротких замыканий.

Проблемы возникают и при эксплуатации ограничителей перенапряжений (ОПН) 110кВ с полимерной изоляцией. Причиной повреждений являются прежде всего недопустимая ветровая нагрузка на ОПН, неправильно выбранные на уровне проектирования номинальные параметры ОПН, а также негерметичность полимерной изоляции. Альтернативным решением может быть установка ОПН с фарфоровой изоляцией.

Опыт эксплуатации электрооборудования распределительных устройств подстанций показывает, что наиболее повреждаемым элементами являются опорно-стержневые изоляторы (ОСИ) в составе разъединителей 110кВ и концевые кабельные разделки 10(6)кВ в ячейках КРУ типов К-ХII и К-ХХVI.

Эти характерные повреждения очень сильно влияют на снижение надёжности работы не только отдельно взятого предприятия распределительных сетей, но и на надёжность всей энергосистемы.

При повреждении опорно-стержневых изоляторов 110кВ создаётся вероятность отключения не только трансформатора и самой подстанции, но и всей ЛЭП 110кВ, питание от которой получают ещё несколько других подстанций, поскольку схема питания подстанций в основном является магистральной. Повреждение ОСИ связано прежде всего с некачественной технологией производства таких изоляторов. Срок работоспособности ОСИ рассчитан на 20-25 лет, но значительный рост их повреждаемости наблюдается уже после 10-15 лет эксплуатации.

На сетевом предприятии Минские кабельные сети проводят работы по снижению вероятности отключения потребителей при повреждении ОСИ 110кВ, связанные с установкой устройства, так называемого «хомута», препятствующего падению изоляторов при изломе. Стоимость такого устройства значительно меньше, чем установка дополнительного удерживающего изолятора.



При повреждении концевой кабельной разделки 10(6)кВ в ячейках КРУ типов К-ХП и К-ХХVI отключается не только повреждённый участок (фидер), но и отключается вся секция сборных шин 10(6)кВ, на которой находятся от 10 до 25 присоединений, что очень сильно влияет на надёжность питания потребителей 1-й и 2-й категорий. Это связано с конструктивными особенностями ячеек типов К-ХП и К-ХХVI: возникающая в повреждённой кабельной разделке электрическая дуга не имеет препятствий для попадания на сборные шины, в результате чего происходит дальнейшее перекрытие междуфазного расстояния сборных шин по воздуху.

Решение такой проблемы состоит в отказе от использования концевых кабельных муфт 10(6)кВ, находящихся непосредственно в ячейках КРУ, и переносом их в кабельный подвал (полужажд). Переход между концевой кабельной муфтой 10(6)кВ и ячейкой КРУ выполняется однофазными кабелями 10(6)кВ. Альтернативой является ещё и полная замена ячеек КРУ типов К-ХП и К-ХХVI на современные ячейки КРУ с вакуумными выключателями.

При эксплуатации высоковольтных вводов 110кВ типа ГМТА 70х – 80х г.г. выпуска возникает вероятность его разрушения во время работы. Это связано прежде всего с выработкой срока службы изоляции вводов. В энергосистеме принимаются меры для снижения вероятности возникновения этих повреждений, связанные прежде всего с планово-предупредительной заменой этих вводов на вводы с твёрдой изоляцией.

Моральное и физическое старение основного и вспомогательного оборудования подстанций является важной проблемой для всей энергосистемы, которую необходимо решать в кратчайшие сроки в первую очередь для безаварийного электроснабжения потребителей электроэнергии, безопасности обслуживающего персонала, а также для соответствия энергосистемы современному уровню научно-технического прогресса.

## Выбор электрооборудования с учетом погрешности расчетных нагрузок

Анищенко В. А., Кирспу А. Ю.

Белорусский национальный технический университет

Неоднозначность выбора трансформаторов и линий электропередач систем электроснабжения вызвана недостоверностью расчетной нагрузки. Причиной последней является неточность расчетных коэффициентов, удельных расходов электроэнергии и других необходимых для расчета нагрузок параметров. С изменением технологических процессов, использованием в производстве нового оборудования, вводом автоматизированных систем управления технологическим процессом изменяются значения этих параметров.

Следует также учитывать тенденции изменения нагрузок во времени. Во многих случаях эта тенденция выражается линейным законом [1]

$$S_p[t] = S_p(1 + \alpha_1 t), \quad 0 < t < T_{np}, \quad (1)$$

где  $S_p[t]$  – расчетная полная мощность через  $t$  лет, кВ·А;  $\alpha_1$  – коэффициент годового роста максимальных (расчетных) нагрузок, который колеблется от 0,03 до 0,1;  $[0; T_{np}]$  – период времени, в течение которого оценивают рост нагрузок (прогнозное время), лет.

Таким образом, переход от точечной расчетной нагрузки  $S_p$  к ее интервальной оценке  $S_p \pm \Delta S_p$  [2], которая учитывает погрешность определения нагрузки, и учет тенденции изменения нагрузок во времени позволяет получить нижнюю  $S_p^{\min}[t]$  и верхнюю  $S_p^{\max}[t]$  границы ожидаемой расчетной нагрузки потребителя

$$S_p^{\min}[t] = (S_p - \Delta S_p)(1 + \alpha_1^{\min} t^{\min}), \quad (2)$$

$$S_p^{\max}[t] = (S_p + \Delta S_p)(1 + \alpha_1^{\max} t^{\max}), \quad (3)$$

где  $\Delta S_p$  – предполагаемая погрешность расчетной нагрузки, кВ·А;  $\alpha_1^{\min}$  – минимально ожидаемое значение коэффициента годового роста расчетных нагрузок;  $t^{\min}$  – минимально ожидаемое значение прогнозируемого времени, лет;  $\alpha_1^{\max}$  – максимально ожидаемое значение коэффициента годового роста расчетных нагрузок;  $t^{\max}$  – максимально ожидаемое значение прогнозируемого времени, лет.

Используя полученный интервал расчетной нагрузки  $[S_p^{\min}[t], S_p^{\max}[t]]$ , можно получить диапазон расчетных мощностей трансформатора  $[S_H^{\min}[t], S_H^{\max}[t]]$  на момент времени  $t$  (рисунок 1)

$$S_H^{\min}[t] = \frac{(S_p - \Delta S_p)(1 + \alpha_1^{\min} t^{\min})}{k_3^{\max} N_T}, \quad (4)$$

$$S_H^{\max}[t] = \frac{(S_p + \Delta S_p)(1 + \alpha_1^{\max} t^{\max})}{k_3^{\min} N_T}, \quad (5)$$

где  $S_H^{\min}[t]$  – нижняя граница расчетной мощности трансформатора, кВ·А;  $S_H^{\max}[t]$  – верхняя граница расчетной мощности трансформатора, кВ·А;  $k_3^{\max}$  – максимально допустимый коэффициент загрузки трансформатора, зависящий от числа трансформаторов  $N_T$  на подстанции;  $k_3^{\min}$  – минимально допустимый коэффициент загрузки трансформатора.

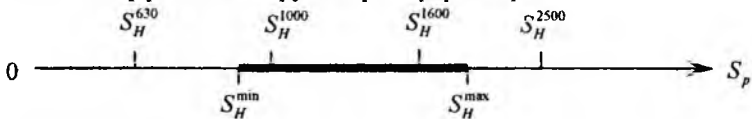


Рисунок 1 – Расчетные и номинальные мощности трансформаторов

В общем случае при выборе типоразмеров трансформаторов следует учитывать все стандартные номинальные мощности (250 кВ·А, 400 кВ·А, 630 кВ·А, 1000 кВ·А, 1600 кВ·А, 2500 кВ·А), которые попали в интервал  $[S_H^{\min}[t], S_H^{\max}[t]]$ , а также

ближайшую мощность трансформатора, лежащую правее данного интервала.

Выбор наиболее подходящего типоразмера трансформатора из выделенного набора мощностей производится путем сравнения суммарных приведенных затрат для каждого варианта.

Для случая представленного на рисунке 1, следует рассмотреть три варианта

$$Z_1 = E_H K_1 + C_1 + Y_1, \quad (6)$$

$$Z_2 = E_H K_2 + C_2 + Y_2, \quad (7)$$

$$Z_3 = E_H K_3 + C_3, \quad (8)$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  – приведенные затраты по первому и второму вариантам ( $S_H^{1000}$ ,  $S_H^{1600}$ ), руб., т.е. номинальные мощности трансформаторов попадают в интервал  $[S_H^{\min}, S_H^{\max}]$ ;  $K_1$  и  $K_2$  – одновременные капитальные затраты по этим же вариантам, руб.;  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные ежегодные эксплуатационные расходы по этим же вариантам, руб.;  $Y_1$  и  $Y_2$  – ущерб, руб., вызванный ожидаемым вынужденным отключением части потребителей из-за длительного превышения фактической нагрузки номинальной полной мощности трансформатора  $S_H^{1000}$  и трансформатора  $S_H^{1600}$ , соответственно;  $Z_3$  – приведенные затраты по третьему варианту ( $S_H^{2500}$ ), руб., т.е. номинальная мощность трансформатора является ближайшей справа интервала  $[S_H^{\min}, S_H^{\max}]$ ;  $K_3$  – одновременные капитальные затраты по третьему варианту, руб.;  $C_3$  – постоянные ежегодные эксплуатационные расходы по третьему варианту, руб.;  $E_H$  – нормативный коэффициент экономической эффективности.

Величину ущерба в (6) и (7) определяем по формуле

$$Y = y_0 W_{cp}^{nep} [t], \quad (9)$$

где  $y_0$  – удельный ущерб, обусловленный вынужденным отключением части потребителей, руб./кВт·ч;  $W_{cp}^{nep} [t]$  – ожидаемая средняя на  $[0; T_{пр}]$  величина годового недоотпуска электроэнер-

гии из-за возможной перегрузки трансформатора (рисунок 2), кВт·ч.

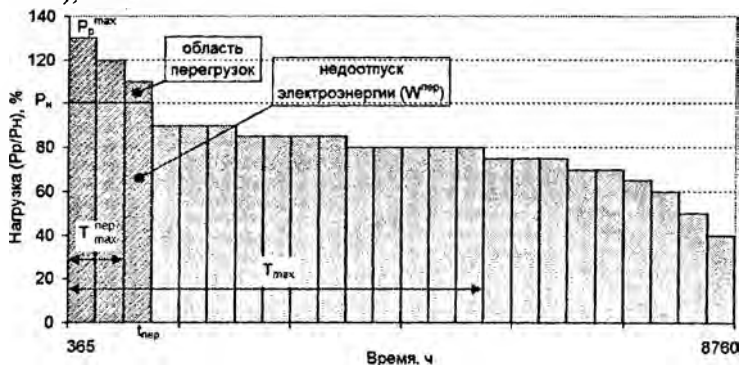


Рисунок 2 – Годовой график активных нагрузок

Исходя из нормального закона распределения годовой нагрузки [1] можно определить вероятность превышения средней на  $[0; T_{np}]$  максимальной расчетной нагрузкой номинальной мощности трансформатора и получить величину годового недоотпуска электроэнергии  $W_{sp}^{\text{неп}}[t]$ .

Задаваясь диапазонами, в которых располагаются значения:  $y_0$ ,  $S_p$ ,  $\alpha_1$ ,  $t$ ,  $k_3$  и характером кривой нормального закона распределения, можно получить границы перехода от одних типоразмеров трансформаторов к другим на основании минимума приведенных затрат.

## Литература

1. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию / под общ. ред. А. А. Федорова. – Т. 1: Электроснабжение. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.
2. Анищенко, В. А. Учет неопределенности исходной информации при проектировании систем электроснабжения / В. А. Анищенко, А. Ю. Кирспу // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2005. – № 3. – С. 25–29.

**Кривые намагничивания тяговых  
электродвигателей и их аппроксимация**

Равино В. В., Сацукевич В. Н., Галямов П. М.\*

Белорусский национальный технический университет  
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси\*

Введение. Динамическая нагруженность трансмиссий троллейбусов в значительной степени определяется характером протекания переходного процесса трогания.

За весь пробег троллейбуса до списания, установленный в 600 тыс. км, процессы трогания повторяются более  $6 \cdot 10^5$  раз. При этом в трансмиссии возникают динамические нагрузки, приводящие к снижению срока службы зубчатых колес главной передачи троллейбуса, средний срок службы которых для троллейбуса модели ЗИУ–9В составляет 45 тыс. км [1]. Таким образом, в существующих троллейбусах процесс трогания протекает неудовлетворительно с точки зрения динамической нагруженности трансмиссии и нуждается в корректировке.

Постановка задачи. Характер переходного процесса в силовом агрегате автотранспортных средств определяется характеристиками двигателя и системы управления им [2]. Следовательно, снижать динамическую нагруженность трансмиссии троллейбуса при трогании возможно путем синтеза рациональных законов управления крутящим моментом тягового электродвигателя в этот период. Решением поставленной задачи могла бы стать система автоматического управления крутящим моментом тягового электродвигателя, однако она сложна в реализации. Поэтому на троллейбусах используют электропривод с обратной связью по току якоря тягового электродвигателя. При этом автоматически поддерживается ток якоря тягового электродвигателя на задаваемом уровне при изменении скорости троллейбуса с нуля вплоть до выхода тягового электродвигателя на естественную характеристику за счет увеличения напряжения, подводимого к якорной цепи. Т.к. в этот период разгона троллейбуса выбирается окружной люфт трансмиссии, то для исследования переходного процесса трогания достаточно ограничиться рассмотрением процессов, происходящих до выхода тягового электродвигателя на естественную характеристику, и

не рассматривать последующее ослабление поля. На этом этапе разгона водитель имеет возможность задать любой пусковой ток, а также темп его нарастания [3, с. 244]. При недостаточной квалификации водителя возможно скачкообразное задание максимального тока и резкий рывок троллейбуса. Поэтому на современных троллейбусах сигнал с датчика положения ходовой педали подается на систему автоматического регулирования тока якоря через задатчик интенсивности, который формирует необходимую плавность движения троллейбуса за счет формирования линейного закона нарастания тока якоря тягового электродвигателя при разгоне до значения, заданного водителем [4]. Но линейная характеристика задатчика интенсивности не является оптимальной с точки зрения процесса выборки окружного люфта при трогании, т.к. при этом по мере роста окружного люфта трансмиссии растет крутящий момент двигателя, при котором люфт выбирается, что увеличивает динамическую нагрузку трансмиссии по мере ее эксплуатационного износа.

Поиск оптимальных законов нарастания тока якоря тягового электродвигателя целесообразно вести на комплексной математической модели «система управления – двигатель – трансмиссия», где система управления моделируется как источник тока, ток которого нарастает при трогании в соответствии с характеристикой задатчика интенсивности. Поскольку при разгоне троллейбуса с нуля до естественной характеристики тягового электродвигателя ток якоря и крутящий момент последнего увеличиваются монотонно, то моделирование выполняется без учета гистерезисных явлений в магнитной системе, а связь между магнитным потоком и током возбуждения представляется по-

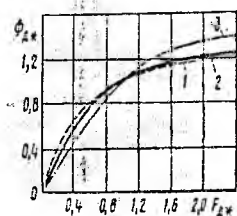


Рис. 1 – Кривые намагничивания

средством кривой намагничивания, а не полной петли гистерезиса.

В литературе кривые намагничивания тяговых электродвигателей приводятся в графической форме. На рис. 1 [5, с. 53] показаны кривые намагничивания тяговых электродвигателей электропозвожжика (1), автомобиля БелАЗ с электротрансмиссией (2) и троллейбуса (3).

Однако для компьютерного моделирования динамики троллейбуса кривую

намагничивания необходимо представить в аналитическом виде. При этом наибольшие затруднения вызывает перевод графически заданных кривых в табличную форму.

Аппроксимация кривой намагничивания осуществлялась с помощью программного пакета GetData, где автоматически были получены координаты ста точек графика. Затем эта зависимость аппроксимировалась с помощью пакета Advanced Grapher, где также рассчитывался критерий  $R^2$ , характеризующий степень близости табличной и функциональной кривых. Было установлено, что наиболее точную аппроксимацию ( $R^2=0,999$ ) дает полином шестой степени вида

$$\Phi^* = -0,0291693(F^*)^6 + 0,19309(F^*)^5 - 0,404478(F^*)^4 + \\ + 0,230369(F^*)^3 - 0,177845(F^*)^2 + 1,19443F^*.$$

Приведенное выражение использовалось при моделировании работы тягового электродвигателя при трогании. На основе математической модели синтезирован закон управления крутящим моментом тягового электродвигателя троллейбуса при трогании, обеспечивающий уменьшение максимального динамического момента в трансмиссии на 10–20% по сравнению с существующим в зависимости от величины ее окружного люфта.

### Литература

1. Карманов, К. Н. Диагностирование ведущих мостов троллейбусов ЗИУ–9В / К. Н. Карманов // Автомобильная промышленность. – 1999. – № 12. – С. 18–19.
2. Захарик, Ан. М. Многоструктурный закон управления трансмиссией автотранспортных средств / Ан. М. Захарик, Ю. М. Захарик // Вестник машиностроения. – 2007. – № 3. – С. 41–44.
3. Ефремов, И. С. Теория и расчет троллейбусов (электрическое оборудование): в 2 ч. / И. С. Ефремов, Г. В. Косарев. – М.: Высшая школа, 1981. – Ч. 2. – 248 с.
4. Быцко, О. В. Белорусский троллейбус – новые технические решения / О. В. Быцко // Металл-инфо. – 2005. – № 11. – С. 28–30.
5. Электрические трансмиссии пневмоколесных транспортных средств / И. С. Ефремов [и др.]. – М.: Энергия, 1976 – 256 с.



## Оптимизация загрузки силовых трансформаторов промышленных предприятий

Трушников А. Л., Радкевич В. Н.

Белорусский национальный технический университет

Существует ряд способов снижения расхода электроэнергии при выпуске планируемого объема продукции. В условиях существующего технологического процесса одним из таких способов может быть отключение малозагруженных силовых трансформаторов с переводом их нагрузки на параллельно работающие с целью снижения потерь электроэнергии. Для определения целесообразности отключения одного из трансформаторов, работающих на общую нагрузку, необходимо использовать некоторый критерий оптимальности, в качестве которого можно принять минимум потерь электроэнергии за рассматриваемый период, так как стоимость потерь электроэнергии входит в энергетическую составляющую себестоимости продукции.

Для минимизации потерь электроэнергии в трансформаторах необходимо знать среднюю нагрузку  $S_{\Delta WC}$ , при которой за определенный период потери активной мощности при работе  $n-1$  и  $n$  трансформаторов равны:

$$\Delta W_{T(n-1)} = \Delta W_{Tn}, \quad (1)$$

где  $\Delta W_{T(n-1)}$  и  $\Delta W_{Tn}$  – потери электроэнергии в трансформаторах при работе  $(n-1)$  и  $n$  трансформаторов.

При расчете потерь электроэнергии за год по средней нагрузке и времени работы трансформатора для параллельно работающих трансформаторов одинаковых типоразмеров указанное выше условие имеет вид

$$(n-1)\Delta P_X t_B + \frac{\Delta P_K K_\Phi^2 S_{\Delta WC}^2 t_P}{(n-1)S_{НОМ}^2} = n\Delta P_X t_B + \frac{\Delta P_K K_\Phi^2 S_{\Delta WC}^2 t_P}{nS_{НОМ}^2}, \quad (2)$$

где  $t_B$  – число часов включения трансформатора в течение года;

$\Delta P_X$  – потери холостого хода трансформатора;

$\Delta P_K$  – потери короткого замыкания трансформатора;

$t_P$  – время работы трансформатора с нагрузкой;

$S_{НОМ}$  – номинальная мощность трансформаторов;

$K_\Phi$  – коэффициент формы графика нагрузки.

Из уравнения (2) получаем

$$S_{\Delta WC} = \frac{S_{НОМ}}{K_{\phi}} \sqrt{n(n-1) \frac{\Delta P_X t_B}{\Delta P_K t_P}}. \quad (3)$$

При  $n=2$

$$S_{\Delta WC} = \frac{S_{НОМ}}{K_{\phi}} \sqrt{2 \frac{\Delta P_X t_B}{\Delta P_K t_P}}. \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) позволяют определить средние значения мощности нагрузки, при которой потери активной энергии при разном количестве трансформаторов равны.

Если трансформатор работает с нагрузкой в течение всего времени включения, то  $t_p = t_B$ .

Тогда выражение (3) упрощается к виду

$$S_{\Delta WC} = \frac{S_{НОМ}}{K_{\phi}} \sqrt{n(n-1) \frac{\Delta P_X}{\Delta P_K}}. \quad (5)$$

В том случае, когда два трансформатора одинаковой мощности работают раздельно с нагрузками  $S_1$  и  $S_2$ , значение средней нагрузки одного из них, при которой целесообразно изменить число работающих трансформаторов, определяется из уравнения

$$2\Delta P_X t_B + \Delta P_K \frac{K_{\phi}^2 S_1^2}{S_{НОМ}^2} t_p + \Delta P_K \frac{K_{\phi}^2 S_2^2}{S_{НОМ}^2} t_p = \Delta P_X t_B + \Delta P_K \frac{K_{\phi}^2 (S_1 + S_2)^2}{S_{НОМ}^2} t_p. \quad (6)$$

Выполнив преобразование данного уравнения, приняв, что  $S = S_1 + S_2$ , и решив его, например, относительно  $S_1$ , получим два значения нагрузки

$$S_{1(1)} = \frac{S}{2} + \sqrt{\frac{S^2}{4} - \frac{\Delta P_X t_B S_{НОМ}^2}{2\Delta P_K K_{\phi}^2 t_p}}; \quad (7)$$

$$S_{1(2)} = \frac{S}{2} - \sqrt{\frac{S^2}{4} - \frac{\Delta P_X t_B S_{НОМ}^2}{2\Delta P_K K_{\phi}^2 t_p}}. \quad (8)$$

Таким образом, для снижения потерь электроэнергии в трансформаторах следует отключить трансформатор Т2 при нагрузке  $S_1 > S_{1(1)}$  и Т1 – при  $S_1 < S_{1(2)}$ . Отметим, что уравнение имеет действительное решение при суммарной нагрузке

$$S \geq \frac{S_{НОМ}}{K_{\phi}} \sqrt{2 \frac{\Delta P_X t_B}{\Delta P_K t_P}}. \quad (9)$$

При этом суммарная нагрузка не должна превышать длительно допустимую нагрузку одного трансформатора:

$$S \leq K_{\text{доп}} S_{\text{ном}}, \quad (10)$$

где  $K_{\text{доп}}$  – коэффициент допустимой перегрузки трансформатора.

Зависимость потерь активной мощности от загрузки трансформатора и времени его работы можно выразить графически (рисунок 1). Под относительными потерями электроэнергии в данном случае следует понимать отношение абсолютных потерь энергии к значению потерь активной энергии в трансформаторе за 8760 часов работы с номинальной нагрузкой.

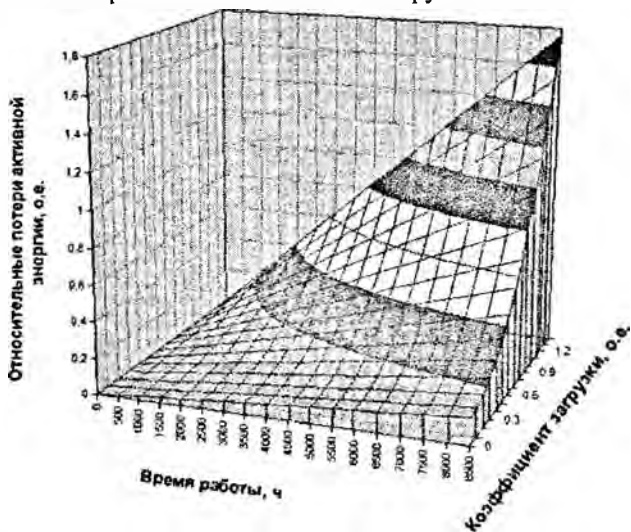


Рисунок 1 – Графическая зависимость потерь активной электроэнергии от времени работы и коэффициента загрузки

#### Выводы

1. Построенные графические зависимости (рисунок 1) в одной системе координат для различных типоразмеров или количества параллельно работающих трансформаторов позволяют наглядно оценить области оптимальных, с точки зрения минимума потерь электроэнергии, нагрузок трансформаторов.

## Расчет электромагнитных параметров вертикального стержневого заземлителя

Герасимович Д. А., Дерюгина Е. А.

Белорусский национальный технический университет

Заземляющие устройства являются неотъемлемой частью электроэнергетических систем, влияющие на надежность их работы и на безопасность обслуживающего персонала.

Большинство предлагаемых методов и моделей расчета заземляющих устройств электроустановок основывается на модели потенциала постоянного тока и сводятся к расчету активного сопротивления заземляющего устройства [1, 2]. В реальных условиях в заземляющих устройствах протекают переменные токи промышленной частоты и импульсные токи, вызванные разрядами молний.

Для учета отмеченных факторов расчет электромагнитного поля уединенного вертикального стержневого заземлителя при протекании переменного тока промышленной частоты основан на системе уравнений Максвелла. Расчет электромагнитных параметров поля рассматривается на модели, которая состоит из самого стержневого заземлителя, переходного слоя растекания тока между землей и заземлителем и собственно земли. Каждому слою присущи свои электрические проводимости и магнитные проницаемости.

Электромагнитное состояние в каждом рассматриваемом слое описывается системой уравнений [3]:

$$\operatorname{rot} \vec{H}_i = \vec{\sigma}_i; \operatorname{rot} \vec{E}_i = -\frac{\partial \vec{B}_i}{\partial t}; \operatorname{div} \vec{\sigma}_i = 0; \operatorname{div} \vec{B}_i = 0; \quad (1)$$

$$\vec{B}_i = \mu_i \vec{H}_i; \vec{\sigma}_i = \gamma_i \vec{E}_i; \vec{D}_i = \epsilon_i \vec{E}_i,$$

где  $\vec{H}_i$  и  $\vec{E}_i$  – векторы напряженности магнитного и электрического полей;  $\vec{\sigma}_i$  – вектор плотности тока;  $\vec{B}_i$  – вектор индукции магнитного поля;  $\vec{D}_i$  – вектор электрического смещения.

Дифференциальные уравнения поля для каждого слоя в установившемся режиме можно разрешить относительно любой из компонент поля (напряженности магнитного  $\vec{H}$  или электриче-

ского  $\vec{E}$  полей) [4]. При исследовании распределения тока систему уравнений целесообразно разрешить относительно напряженности электрического поля или относительно плотности тока  $\vec{\sigma}$ , связанной с  $\vec{E}$  законом Ома. С учетом отмеченного система уравнений (1) сводится к решению дифференциального уравнения:

$$\frac{\gamma_{ri}}{r} \frac{\partial \vec{\phi}_{im}}{\partial r} + \gamma_{ri} \frac{\partial^2 \vec{\phi}_{im}}{\partial r^2} + \gamma_{zi} \frac{\partial^2 \vec{\phi}_{im}}{\partial z^2} - \alpha^2 \vec{\phi}_{im} = 0; \quad \alpha^2 = j\omega\gamma_{ri}\gamma_{zi}\mu_{\phi i}, \quad (2)$$

где  $\vec{\phi}_{im}$  принимает значения векторов плотности тока или напряженностей электромагнитного поля ( $i = 1, 2, 3$ ).

На основе решения уравнения (2) для рассматриваемой модели заземлителя получаем выражения в виде ряда для определения вертикальной  $\dot{\sigma}_{imz}(r, z)$  и радиальной  $\dot{\sigma}_{imr}(r, z)$  составляющих вектора плотности тока. Для определения граничных условий предварительно были установлены зависимости радиального и вертикального токов от соответствующих координат.

Полное решение уравнения (2) представили суммой его частного решения и решения уравнения невязки. В соответствии с отмеченным получили выражения распределения радиальной и вертикальной составляющих вектора плотности тока:

$$\dot{\sigma}_{imr}(r, z) = \dot{\sigma}_{*imr}(r, z) + \Delta\dot{\sigma}_{imr}(r, z);$$

$$\dot{\sigma}_{imz}(r, z) = \dot{\sigma}_{*imz}(r, z) + \Delta\dot{\sigma}_{imz}(r, z),$$

где  $\dot{\sigma}_{*imr}(r, z)$  и  $\dot{\sigma}_{*imz}(r, z)$  – частные решения уравнения (2) для радиальной и вертикальной составляющих плотности тока;  $\Delta\dot{\sigma}_{imr}(r, z)$  и  $\Delta\dot{\sigma}_{imz}(r, z)$  – величины плотности тока от невязки.

Частное решение уравнения (2) позволяет представить составляющие вектора плотности тока в каждом слое при использовании разложения в ряд Фурье следующими выражениями:

$$\dot{\sigma}_{*imr}(r, z) = \sum_{k=1}^{\infty} \dot{\sigma}_{imr}^k(0) \cdot e^{p_k r z} \cdot J_0\left(\lambda_k \frac{r}{R_3}\right);$$

$$\dot{\sigma}_{*imz}(r, z) = \gamma_{zi} \frac{h-z}{h} \dot{E}_{imz}^0(0) + \gamma_{zi} \sum_{k=1}^{\infty} \dot{E}_{imz}^k(r) \sin(k\omega_k z),$$

где  $\dot{\sigma}_{imr}^k$  и  $\dot{E}_{imz}^k$  – распределения  $k$ -х гармоник амплитуды

плотности тока и напряженности электрического тока;  $\lambda_k$  – корни функции Бесселя;  $p_{ikr}$  – постоянная затухания электромагнитного поля.

Величины плотности тока от невязки на границах раздела сред для радиальной и вертикальной составляющих вектора плотности тока определяются по следующим выражениям:

$$\Delta\dot{\sigma}_{imr}(r, z) = \sum_{k=1}^{\infty} \Delta\dot{\sigma}_{imr}^k(r) \cos(k\omega_z z);$$

$$\Delta\dot{\sigma}_{imz}(r, z) = \sum_{k=1}^{\infty} \Delta\dot{\sigma}_{imz}^k(0) e^{p'_{ikz} z} J_0\left(\lambda_k \frac{r}{R_i - R_{i-1}}\right),$$

где  $\Delta\dot{\sigma}_{imr}^k$  – распределения  $k$ -х гармоник амплитуды невязки плотности тока на границах раздела сред;  $p'_{ikz}$  – постоянная затухания электромагнитного поля;  $R_i$  – радиус  $i$ -го слоя модели.

Полученные выражения позволяют проводить расчет распределения радиальной и вертикальной составляющих вектора плотности тока в каждом слое модели и определять области растекания токов в заземлителе, а также активные и индуктивные параметры заземляющих устройств.

Разработана компьютерная программа, в которой реализован численный метод расчета электромагнитных параметров вертикального стержневого заземлителя.

Таким образом, разработанный численный метод и компьютерная программа могут быть использованы для решения инженерных задач, связанных с проектированием, расчетом и оценкой заземляющих устройств.

### Литература

1. Бургсдорф, В. В. Заземляющие устройства электроустановок / В. В. Бургсдорф, А. И. Якобс. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 399 с.
2. Рябкова, Е. Я. Заземления в установках высокого напряжения / Рябкова. – М.: Энергия, 1978. – 224 с.
3. Тамм, И. Е. Основы теории электричества / И. Е. Тамм. – 9-е изд. – М.: Наука, 1976. – 616 с.
4. Поливанов, К. М. Теоретические основы электротехники / К. М. Поливанов. – Ч. 3: Теория электромагнитного поля. – М.: Энергия, 1969.

**Численное решение дифференциальных уравнений  
динамики провода по неявной схеме**

Пономаренко Е. Г.

Белорусский национальный технический университет

Динамика провода при КЗ описывается нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных с переменными коэффициентами. Такие уравнения могут быть решены только численно с применением ЭВМ. Для этого производные в них заменяются конечно-разностными отношениями. Полученная система конечно-разностных алгебраических уравнений решается по явной или неявной схеме [1]. Явная схема дает меньший объем вычислений, а неявная схема является безусловно устойчивой [1]. Современные ЭВМ отличаются высокой скоростью вычислений, поэтому на первое место выходит задача получения устойчивого и наиболее точного численного решения, что достигается применение неявной схемы.

Неявная схема требует записи дифференциальных уравнений движения провода в следующем виде

$$\frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2} - \lambda^2 \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial s_0^2} = \bar{P}^*, \quad (1)$$

где  $\bar{P}^*$  – вектор суммарной распределенной внешней нагрузки на единицу массы провода.

Запишем (1) в виде конечно-разностных уравнений [2]

$$\frac{\hat{R}_k - 2\bar{R}_k + \check{R}_k}{\tau^2} - \lambda^2 \frac{\hat{R}_{k+1} - 2\hat{R}_k + \hat{R}_{k-1}}{h^2} = \bar{P}_k^*, \quad (2)$$

где  $k$  – номер узла сетки численного решения уравнений ( $k = 1, 2, \dots, n-1$ );  $n$  – количество узлов.

Система уравнений (2) решается методом прогонки. Решение на  $t+1$ -ом слое временном слое определяются по выражению

$$\hat{R}_k = \bar{a}_k + b_k \hat{R}_{k+1}. \quad (3)$$

Прогоночные коэффициенты  $\bar{a}_k$  и  $b_k$  в уравнении (3) рассчитываются как

$$\bar{a}_k = \frac{\bar{a}_{k-1} f + \bar{P}_k \tau^2 + 2\bar{R}_k - \sqrt{R_k}}{f(2 - b_{k-1}) + 1}, \quad (4)$$

$$b_k = \frac{f}{f(2 - b_{k-1}) + 1}.$$

На первом шаге вычислений  $b_1 = 0$  и  $\bar{a}_1 = \sqrt{R_1}$ .

Решение конечно-разностных уравнений методом прогонки производится в следующем порядке: 1) прямой ход прогонки – по выражениям (4) заготавливаются коэффициенты  $\bar{a}_k$  и  $b_k$  при изменении индекса  $k$  от 2 до  $n$ ; 2) обратный ход – по (3) определяются координаты  $\hat{R}_k$  при изменении  $k$  от  $n$  до 2, где  $n$  – количество узлов численного решения по длине провода.

Основываясь на математической модели численного решения дифференциальных уравнений по неявной схеме, была составлена компьютерная программа. С ее помощью были проведены расчеты для опытного пролета [2, с.167], результаты которых сравниваются с результатами расчетов, полученных с использованием опробованной ранее явной схемы (рис.1).

На рисунке 1 штриховой линией показаны результаты расчетов с использованием явной схемы. Из диаграмм видно, что достигается хорошее совпадение результатов.

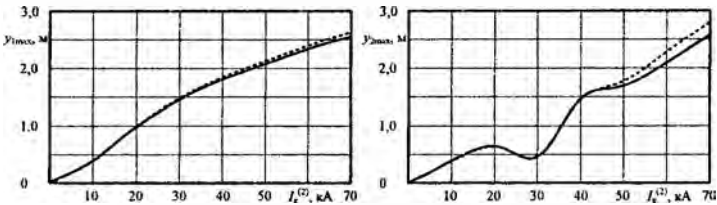


Рис. 1. Максимальные отклонения  $U_{1\max}$  и  $U_{2\max}$

## Литература

1. Калиткин, Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 509 с.
2. Сергей, И. И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: теория и вычислительный эксперимент / И. И. Сергей, М. И. Стрелюк. – Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.



УДК 621.316.925

## Исследование принципа определения вида КЗ в адаптивных микропроцессорных токовых защитах

Романюк Ф. А., Тишечкин А. А., Ковалевский А. В.  
Белорусский национальный технический университет

Одним из требований предъявляемых к релейной защите является ее чувствительность. Однако, рассчитывая уставки для токовых защит линий инженером расчетчиком не всегда удается добиться нужного коэффициента чувствительности ( $k_{\text{ч}}$ ), который рассчитывается как отношение минимального тока КЗ (обычно двухфазного) протекающего через измерительные органы (ИО) защиты к току срабатывания ИО. Причина – выбор токов срабатывания ИО всех ступеней по наиболее тяжелым условиям симметричного режима [1], т.е. ток срабатывания ИО токовой отсечки (ТО) выбирается по условию отстройки от максимального значения тока трехфазного КЗ в конце защищаемого участка. Ток срабатывания максимальной токовой защиты (МТЗ) выбирается по условию отстройки от максимальных нагрузочных токов с учетом перегрузок и самозапуска электродвигательной нагрузки. Поскольку эти режимы являются симметричными и рассчитанные для них токи превышают токи несимметричных замыканий, по которым оценивается  $k_{\text{ч}}$ , то на практике иногда приходится ограничивать область применения токовых защит. Повысить чувствительность к несимметричным КЗ можно, применив адаптивный принцип построения токовой защиты от междуфазных коротких замыканий [2]. Такая микропроцессорная защита анализирует следующую формулу:

$$\Delta I = \frac{I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}}}{I_{\text{макс}}}, \quad (1)$$

где:

$I_{\text{макс}}$  – выделяемый максиселектором ток по одной из обрабатываемой защитой фаз;

$I_{\text{мин}}$  – выделяемый миниселектором ток по одной из обрабатываемой защитой фаз.

При такой реализации защиты можно контролировать момент наступления режима несимметричного повреждения и со-

ответствующим образом автоматически уменьшать токи срабатывания ИО ступенчатой защиты. Чтобы это осуществить, необходимо определить значение  $\Delta I$ , которое должно сравниваться с заданным заранее значением. При КЗ симметричном  $\Delta I \rightarrow 0$ , при несимметричном  $\Delta I \rightarrow 1$ . Для определения величины  $\Delta I$ , обеспечивающей надежность определения несимметричного режима была использована математическая модель электрической сети, представленная на рис. 1.

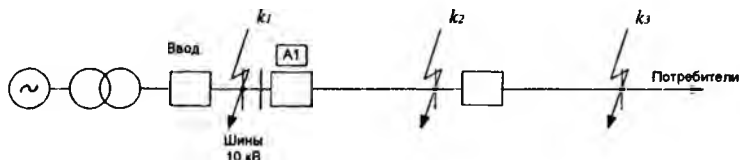


Рис. 1. Схема электрической сети

В результате вычислительного эксперимента были получены, представленные на рис.2, зависимости  $\Delta I(t)$  для различных видов КЗ (трехфазных и двухфазных) в трех разных точках электрической сети ( $k_1, k_2, k_3$ ).

Анализ полученных результатов показывает, что  $\Delta I$  не превышает значений 0,49 ( $k_1$  – ABC) при симметричных замыканиях, а при несимметричных замыканиях минимальное значение равно 0,73 в установившемся режиме. Т.е. реализуя в микропроцессорной защите вышеописанный принцип адаптивности, можно задать значение  $\Delta I$  равное 0,73 и при превышении данного порога изменять уставки, тем самым добиваясь повышения чувствительности.

Рассмотренный принцип определения вида КЗ можно использовать в адаптивных микропроцессорных защитах для улучшения чувствительности релейной защиты. Это позволит снять ограничения по применению токовых защит в распределительных сетях, в которых преобладает электродвигательная нагрузка. В некоторых случаях такой принцип позволяет осуществить дальнейшее резервирование фидеров защитами, установленными на вводах 10кВ.

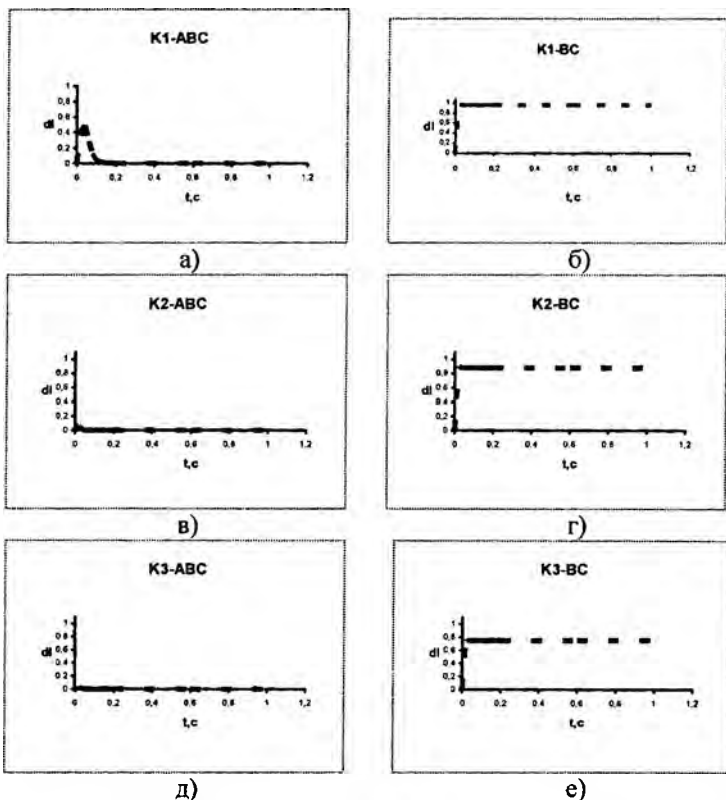


Рис. 2. Зависимость  $\Delta I(t)$ : а) трехфазное КЗ в точке  $k_1$ ; б) двухфазное КЗ в точке  $k_1$ ; в) трехфазное КЗ в точке  $k_2$ ; г) двухфазное КЗ в точке  $k_2$ ; д) трехфазное КЗ в точке  $k_3$ ; е) двухфазное КЗ в точке  $k_3$

### Литература

1. Чернобровов, Н. В. Релейная защита / Н. В. Чернобровов. – М.: Энергия, 1976. – 680 с.
2. Романюк, Ф. А. Принципы выполнения адаптивной микропроцессорной токовой защиты от междуфазных коротких замыканий / Ф. А. Романюк, А. А. Тищенко, А. В. Ковалевский // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2005. – № 2. – С. 11–14.

## К вопросу расчета максимального тяжения гибких шин при коротком замыкании

Сергей И. И., Андрукевич А. П.

Белорусский национальный технический университет

В докладе рассматриваются способы модификации упрощенного метода расчета третьего максимума тяжения, основанного на представлении провода физическим маятником. Анализ траекторий движения провода после КЗ показал, что представленные ранее формулы расчета третьего максимума падения не учитывают угол наклона траектории движения провода [1]. Считается, что провод падает вертикально с точки наибольшего вертикального подъема, что ведет к завышению максимальных тяжений падения проводов. На самом же деле провод падает под некоторым углом к своему первоначальному положению.

С помощью вычислительного эксперимента по компьютерной программе, получен универсальный график зависимости угла падения провода  $\delta_{пад}$  от максимального угла отклонения (рис. 1). Графиком можно пользоваться для различных характеристик провода, длины пролета и времени короткого замыкания. В общем случае формула для

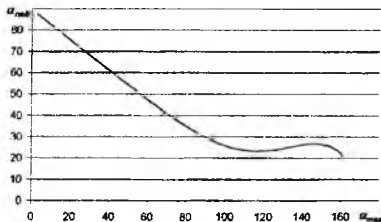


Рис. 1

расчета третьего максимума тяжений в случае жесткого закрепления проводов имеет вид

$$T_{3\max} = \cos^n \delta_{пад} \cdot \sqrt{T_0^2 + 13.08 \cdot E \cdot A \cdot f_0 \cdot \rho \cdot (1 - \cos \delta_{\max})},$$

где  $n$  – показатель степени;

$n=3$ , если  $\delta_{\max} \leq 100^\circ$ ;

$n=1$ , если  $\delta_{\max} > 100^\circ$ .

Для учета гирлянд изоляторов гибкая шина представляется в виде комбинированной нити с распределенными массами разной интенсивности и сосредоточенными нагрузками разной величины, приложенными в разных местах пролета [2]. Движение гибких шин с учетом гирлянд изоляторов при коротком замыка-

нии будет происходить по более сложной траектории. Влияние гирлянд изоляторов учитывается с помощью поправочного коэффициента  $k_2$ , вычисленного по компьютерной программе для проводов среднего и большого сечений (рис. 2).

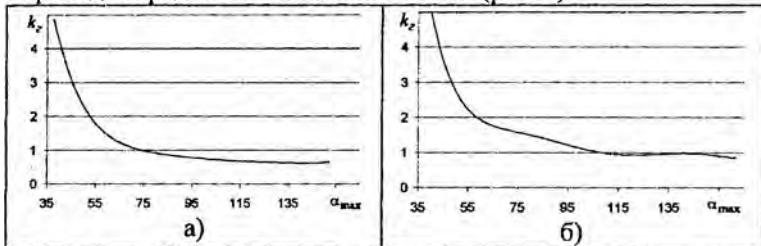


Рис. 2. Поправочный коэффициент  $k_2$ : а) провода среднего сечения; б) провода большого сечения

В общем случае формула для расчета третьего максимума тяжений с учетом гирлянд изоляторов имеет следующий вид

$$T_{3\max} = k_2 \cdot \cos^4 \delta_{\text{над}} \cdot \sqrt{T_0^2 + 13.08 \cdot E \cdot A \cdot f_0 \cdot \rho \cdot (1 - \cos \delta_{\text{max}})}.$$

Результаты расчета тяжения падения приводятся в таблице

Таблица

Ток КЗ, кА	$\delta_{\text{max}}$ , град	$\delta_{\text{над}}$ , град	$k_2$	$T_{3\max}$ , Н		Погрешность, %
				БНТУ	BusEf	
АС-240/39, длина пролета 35 м, время КЗ 0,2 с						
30	77	36	0,95	9515	9182	3,62
35	108	24	0,7	14836	13450	10,31
2хАС-330/43, длина пролета 40 м, время КЗ 0,3 с						
34	80	34,5	1,5	35517	29626	19,88
41	121,5	24	0,93	45083	47431	-4,95

### Литература

1. Сергей, И. И. Упрощенный расчет максимальных тяжений проводов на двух стадиях их движения при коротком замыкании / И. И. Сергей, А. П. Андрукевич, Е. Г. Пономаренко // Энергетика ... (Изв. высш. учеб. заведений и энергообъед. СНГ). – 2006. – № 6.
2. Бошнякович, А. Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП / А. Д. Бошнякович. – Л.: Энергия, 1975. – 248 с.

УДК 621.316

## Оптимизация состава включенных трансформаторов на двухтрансформаторных подстанциях 110-35/10 кВ

Боровский Е. В.

Научно-исследовательское и проектное республиканское  
унитарное предприятие «БелТЭИ»

Одним из эффективных мероприятий по снижению технических потерь электроэнергии, является автоматическое режимное отключение трансформаторов 110-35/10 кВ во время провалов нагрузки. Данное мероприятие можно осуществлять на двухтрансформаторных подстанциях, оснащенных выключателями на высокой стороне трансформатора при наличии в качестве источника постоянного оперативного тока аккумуляторной батареи. Потери электроэнергии в трансформаторах, как известно, делятся на две составляющие: потери холостого хода и нагрузочные потери. В дневное время, когда загрузка трансформаторов велика, нагрузочные потери превышают потери холостого хода трансформаторов, в ночное же время, когда загрузка трансформаторов снижается, потери холостого хода напротив намного превосходят нагрузочные потери. В годовом разрезе, потери холостого хода составляют 35-40 % общих потерь в трансформаторах. Таким образом, отключив один из трансформаторов во время провалов нагрузки, можно существенно снизить потери электроэнергии на подстанции за счет снижения потерь холостого хода трансформаторов.

В общем случае на подстанции может быть установлено два трансформатора разной номинальной мощности с разными паспортными данными. На рис. 1 представлены зависимости потерь мощности от нагрузки подстанции при разном составе включенных трансформаторов.

Из рисунка 1 видно, что имеются три точки пересечения указанных кривых соответствующие трем граничным значениям мощности. Мощность, при которой целесообразно отключать один трансформатор меньшей мощности, обозначается  $S_{гр1}$ . Мощность, при которой целесообразно отключать один трансформатор большей мощности и работать трансформатором меньшей мощности, обозначается  $S_{гр2}$ . Мощность, при которой

целесообразно переходить на работу одним трансформатором меньшей мощности вместо работы одним трансформаторов большей мощности и наоборот, обозначается  $S_{гр3}$ .

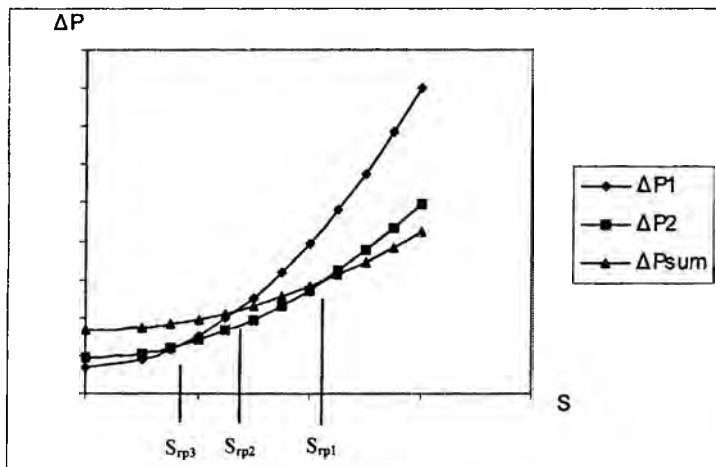


Рисунок 1 – Зависимость потерь мощности в трансформаторах от загрузки подстанции при различном составе работающих трансформаторов.  $\Delta P_1$  – зависимость потерь мощности от загрузки подстанции при работе трансформатора Т1,  $\Delta P_2$  – зависимость потерь мощности от загрузки подстанции при работе трансформатора Т2,  $\Delta P_{sum}$  – зависимость потерь мощности от загрузки подстанции при работе двумя трансформаторами

Граничные значения нагрузок подстанции можно определить по следующим формулам:

$$S_{гр1} = \left(1 + \frac{S_{НОМ1}}{S_{НОМ2}}\right) \sqrt{\frac{\Delta P_{ХХ1} \cdot S_{НОМ2}^4}{\Delta P_{КЗ2} \cdot (S_{НОМ1} + S_{НОМ2})^2 - (\Delta P_{КЗ1} + \Delta P_{КЗ2}) \cdot S_{НОМ2}^2}};$$

$$S_{гр2} = \left(1 + \frac{S_{НОМ2}}{S_{НОМ1}}\right) \sqrt{\frac{\Delta P_{ХХ2} \cdot S_{НОМ1}^4}{\Delta P_{КЗ1} \cdot (S_{НОМ1} + S_{НОМ2})^2 - (\Delta P_{КЗ1} + \Delta P_{КЗ2}) \cdot S_{НОМ1}^2}};$$

$$S_{гр3} = \sqrt{\frac{S_{НОМ1}^2 \cdot S_{НОМ2}^2 \cdot (\Delta P_{ХХ2} - \Delta P_{ХХ1})}{S_{НОМ2}^2 \cdot \Delta P_{КЗ1} - S_{НОМ1}^2 \cdot \Delta P_{КЗ2}}},$$

где  $\Delta P_{ХХ1}$  и  $\Delta P_{ХХ2}$  – соответственно потери холостого хода первого и второго трансформаторов;

$\Delta P_{КЗ1}$  и  $\Delta P_{КЗ2}$  – соответственно потери короткого замыкания первого и второго трансформаторов;

$S_{ном1}$  и  $S_{ном2}$  - соответственно номинальные мощности первого и второго трансформаторов.

Следует обратить внимание, что не всякий провал нагрузки должен сопровождаться отключением трансформатора. Для определения технически допустимой частоты коммутаций трансформатора 110 кВ следует проанализировать ресурсы выключателей, установленных на высокой и низкой сторонах трансформатора. Выключатели 110 кВ имеют механический ресурс порядка 3000-5000 коммутаций. Выключатели 10 кВ выдерживают от 5000 до 30000 коммутаций в зависимости от типа выключателя. Все выключатели 110 и 10 кВ рассчитаны на срок службы от 20 до 25 лет. Таким образом, чтобы не исчерпать ресурс выключателей трансформаторов, нельзя отключать трансформаторы во время ночных провалов нагрузки, но вполне оправданно отключать их на время провалов нагрузки, имеющих место в выходные дни. При этом число коммутаций выключателей составит 52 раза в год или 1300 коммутаций за весь срок службы, что вполне допустимо.

Таким образом, на практике, чтобы не исчерпывать ресурсы выключателей целесообразно ограничиться одним отключением трансформатора в неделю, при этом переход от режима работы трансформатора большей мощности к режиму работы трансформатором меньшей мощности и обратно производить не рекомендуется. В этом случае наиболее обоснованным представляется вывод трансформатора в резерв на основе расчета накопленной информации о режимах работы подстанции в предшествующее время.

На сегодняшний день разработано устройство, позволяющее на время длительного провала нагрузки (наступление выходных дней) вывести один из трансформаторов в резерв. Указанное устройство на основе накопленной статистической информации о загрузке подстанции в предыдущий период времени и паспортных данных трансформаторов определяет номер трансформатора, который целесообразно вывести в резерв. Контролирует процесс работы подстанции в период выведенного в резерв трансформатора и включает в работу резервный трансформатор при наступлении аварийной ситуации на подстанции или же при росте нагрузки подстанции выше граничного значения мощности.



**Взгляд студентов и преподавателей на проблему компетенций при подготовке инженеров по электроэнергетическим специальностям**

Мойсейчук Ю. К.

Белорусский национальный технический университет

В Западной Европе и в странах СНГ осуществляется поиск общности национальных систем высшего образования, путей улучшения сотрудничества в сфере совершенствования качества образования. При этом предлагается целесообразность сохранения многообразия систем высшего образования, независимость национальных систем образования. В этом направлении по проекту TUNING после проведения консультаций с выпускниками, работодателями и представителями академического сообщества были отобраны универсальные компетенции, представляющие интерес для различных стран. На основе этих компетенций были разработаны анкеты, по которым респонденты должны были указать: важность данного навыка или компетенции для их работы по профессии и уровень владения навыком/компетенцией, который достигнут респондентами в результате обучения по программе в вузе [1, 2].

В данной работе представлены результаты анкетирования различных групп респондентов в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ). Для 55 студентов 3 курса и 50 студентов – выпускников 5 курса энергетического факультета было предложено заполнить анкету из проекта TUNING, состоящую из 30 пунктов, результаты которой представлены ниже.

**По мнению студентов 3 курса пятью важнейшими компетенциями являются:**

- I. Принятие решений.
- II. Способность применять знания на практике.
- III. Работа в команде. Способность к анализу и синтезу.
- IV. Способность работать самостоятельно.
- V. Инициативность и предпринимательский дух. Стремление к успеху.

Наиболее важной студенты считают компетенцию «Принятие решений», однако высший уровень, который обеспечивается

в вузе, по их же мнению - компетенция «Базовые знания в области обучения».

**По мнению студентов - выпускников 5 курса, наиболее важны следующие компетенции:**

- I. Способность применять знания на практике.
- II. Принятие решений.
- III. Способность работать самостоятельно. Стремление к успеху.
- IV. Тщательная подготовка по основам профессии. Лидерство.
- V. Решение проблем.

Для студентов – выпускников 5 курса наиболее важной является компетенция «Стремление к успеху». Наиболее обеспеченной в вузе является компетенция «Способность применять знания на практике».

Сравнив полученные данные студентов третьего и пятого курсов, можно сделать вывод о том, что три из пяти важнейших для них компетенций совпадают как для пятого, так и для третьего курса, а именно: «Способность применять знания на практике», «Принятие решений», «Способность работать самостоятельно».

По анкете программы TUNING [1, 2] был также проведен опрос профессорско – преподавательского состава энергетического факультета БНТУ. В анкетировании приняло участие 63 человека.

Требовалось проранжировать 17 компетенций в порядке важности, которую профессорско-преподавательский состав им придает. Числом 1 обозначалась важнейшая, 17 – наименее важная компетенция. Всем 17 компетенциям ни в коем случае не назначались одинаковые ранги.

**По мнению профессорско-преподавательского состава пятью важнейшими компетенциями являются:**

- I. Базовая подготовка по основам профессиональных знаний.
- II. Способность к применению знаний на практике.
- III. Способность обучаться.
- IV. Способность к анализу и синтезу.
- V. Способность порождать новые идеи (креативность).

Последние места разделили компетенции: «Устная и письменная коммуникация на втором языке» и «Принятие различий и мультикультурности».

Обнадеживает то, что приоритетные места преподаватели отдали таким компетенциям как, «Способность порождать новые идеи» (5 место), «Принятие решений» (7 место), «Способность к анализу и синтезу» (4 место).

Сравнение ответов студентов и преподавателей показало следующее. Из пяти выделенных приоритетных компетенций у студентов 3 курса, студентов - выпускников 5 курса и преподавателей совпали следующие: «Способность применять знания на практике», «Способность работать самостоятельно (Способность обучаться)». Выпускники и преподаватели выделили также среди приоритетных компетенцию «Тщательная подготовка по основам профессии (Базовая подготовка по основам профессиональных знаний)»

По-видимому, следует признать положительным совпадение ряда приоритетных компетенций в ответах студентов и преподавателей. Это означает, что интересы и представления о целях высшего образования студентов и лиц, которые их обучают, в значительной степени совпадают.

Полученные мнения респондентов из числа студентов, студентов – выпускников, лиц профессорско – преподавательского состава, хотя и не являются всеобъемлющими, но тем не менее представляются полезными при разработке образовательных стандартов, определении состава необходимых компетенций, организации учебного процесса в вузе.

### **Литература**

1. Байденко, В. И. Болонский процесс: поиск общности европейских систем высшего образования (проект TUNING) / В. И. Байденко. – М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2006.
2. Байденко, В. И. Болонский процесс: проблемы, опыт, решения. Аналитический доклад / В. И. Байденко. – Изд. 2-ое, перераб. и доп. – М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2006.

**Принципы выполнения адаптивной токовой  
защиты распределительных сетей**

Романюк Ф. А., Тишечкин А. А., Бобко Н. Н., Глинский Е. В.,  
Румянцев В. Ю., Новаш И. В.

Белорусский национальный технический университет

Надежность работы распределительных сетей в значительной мере зависит от устройств релейной защиты и автоматики (РЗА). Отличительной особенностью таких сетей является то, что примерно 70% всех повреждений происходят в распределительных сетях 6-35 кВ.

В настоящее время для защиты от коротких замыканий (КЗ) и дальнего резервирования (ДР) в распределительных сетях 6-35 кВ с односторонним питанием преимущественно используются токовые защиты, измерительные органы (ИО) которых обычно реагируют или на полные токи фаз или на разность фазных токов. По принципу действия токовая защита реагирует на увеличение тока сверх ее уставки (тока срабатывания) вне зависимости от причины, вызвавшей увеличение тока. Увеличение тока может произойти не только при КЗ, но и при подключении дополнительной нагрузки, а также при самозапуске электродвигателей, при восстановлении напряжения после отключения внешних КЗ, действии устройств АПВ, АВР. Для более быстрой ликвидации повреждений используются или защиты с ступенчатой характеристикой выдержки времени или защиты с обратнo зависимыми характеристиками времени срабатывания. Параметры срабатывания (токи срабатывания, выдержки времени) таких защит рассчитываются заранее, исходя из наиболее тяжелых режимов работы оборудования, и остаются неизменными при изменении режимов работы распределительной сети.

При определении тока срабатывания максимальных токовых защит (МТЗ) учитывают увеличение тока в защищаемой линии вследствие самозапуска электродвигателей нагрузки при восстановлении напряжения после отключения КЗ. Это увеличение тока учитывается с помощью коэффициента самозапуска, численное значение которого при расчетах может достигать значений 2,5-3 и более. Точное определение этого коэффициента затруднено, так как его значение зависит от многих факторов:

состава нагрузки, пусковых характеристик, степени загрузки электродвигателей, длительности и степени снижения напряжения и т.д. В результате создаются большие расчетные запасы. Однако такие тяжелые расчетные режимы и схемы могут существовать непродолжительное время, и их учет приводит к неоправданному замедлению и загромождению устройств РЗА при реальной схеме и режимах, которые могут быть намного легче и продолжительнее, чем наихудшие расчетные. Такое исполнение защиты приводит к снижению основных показателей их технического совершенства: зависимости длин защищаемых зон от режимов работы питающих систем и вида КЗ, недостаточной чувствительности и защитоспособности отдельных ступеней и т.д. В конечном счете, это ограничивает область использования токовых защит и приводит к необходимости установки более сложных защит. Например, токовых защит с блокировкой минимального напряжения или дистанционных, требующих для своего функционирования дополнительной информации от измерительных трансформаторов напряжения, что приводит к снижению надежности защиты, поскольку при неисправностях или при перегорании предохранителей в цепях трансформаторов напряжения такие защиты становятся неработоспособными.

Улучшить основные показатели технического совершенства токовых защит, расширить область их использования, повысить эффективность ДР возможно путем разработки адаптивных токовых защит, автоматически изменяющих свои характеристики в зависимости от вида КЗ, изменения режимов работы распределительной сети и ряда других влияющих факторов. Кроме того, такие защиты должны быть нечувствительными к эксплуатационным изменениям частоты в энергосистеме, отличать симметричные КЗ от несимметричных.

Область уставок адаптивных защит должна формироваться не только в зависимости от параметров сети, но и от ее режима работы. Для достижения этой цели защита должна содержать более широкий спектр токовых ИО, контролирующих основные показатели несимметрии, величины аварийных составляющих прямой, обратной, нулевой последовательностей, а в ряде случаев и их приращения. Решение этой задачи усложняется тем, что показатели несимметрии могут появляться не только при несимметричных КЗ, но и при обрывах в цепях трансформато-

ров тока и их насыщении, а также при бросках тока намагничивания, возникающих при подключении силовых трансформаторов, при восстановлении напряжения после отключения внешних КЗ, при работе устройств АПВ, АВР. Учет всех вышеперечисленных факторов приводит к необходимости усложнения алгоритмов работы защиты, что не является определяющим при использовании современной микропроцессорной элементной базы и цифровых методов обработки входной информации.

УДК 621.311

### **Полуволновая межгосударственная электроэнергетическая связь**

Семенков Д. Н.

Белорусский национальный технический университет

В последнее время во всем мире стало определяющей тенденцией интегрирование энергетических систем в объединения для получения дополнительных эффектов от их совместной работы. Однако существует ряд нерешенных проблем, которые препятствуют объединению.

В некоторых работах авторы предлагают применить принцип комбинированного объединения больших систем с применением гибкой связи[1]. При этом вместо гибкой связи можно использовать полуволновую линию электропередачи. Для обоснования этого решения и уточнения всех основных преимуществ охарактеризуем ценность полуволны.

Мощность современной электростанции достигает 4-6 ГВт, мощность объединенных энергетических систем (ОЭС) измеряется десятками миллионов киловатт. ОЭС связаны между собой линиями электропередачи (ЛЭП), пропускная способность которых составляет 2-3 ГВт.

В значительной мере технико-экономические показатели ЛЭП определяются ее пропускной способностью. Пропускная способность ЛЭП может быть повышена путем настройки ЛЭП на режим полуволны.

В режиме полуволны линия обладает высокой пропускной способностью. Уравнения линии без потерь при  $\lambda = \alpha l = \pi$  будут иметь вид

$$\underline{U}_1 = -\underline{U}_2, \quad \underline{I}_1 = -\underline{I}_2, \quad (1)$$

где  $\lambda$  - волновая длина линии;  $\alpha$  - коэффициент изменения фазы волны;  $l$  - длина линии;  $\underline{U}_1, \underline{U}_2$  - напряжение в начале и конце линии;  $\underline{I}_1, \underline{I}_2$  - ток в начале и конце линии.

Напряжения и токи по концам полуволновой линии без потерь одинаковы по величине, но сдвинуты на  $180^\circ$  по фазе, соответственно мощности одинаковы в начале и конце линии передачи [1]

$$\underline{S}_1 = P_1 - jQ_1 = \underline{U}_1^* \underline{I}_1 = \underline{S}_2 = P_2 - jQ_2 = \underline{U}_2^* \underline{I}_2. \quad (2)$$

Для определения передаваемой существует следующее выражение [3]:

$$P = \frac{EU}{x_1 + x_2} \sin(\theta_1 + \theta_2), \quad (3)$$

где  $E$  - ЭДС генератора;  $x_1$  - суммарное сопротивление генератора и повышающего трансформатора;  $x_2$  - сопротивление понижающего трансформатора;  $\theta_1$  - угол сдвига обусловленный генератором и повышающим трансформатором;  $\theta_2$  - угол сдвига, обусловленный понижающим трансформатором.

Передаваемая мощность зависит только от угла  $(\theta_1 + \theta_2)$  сдвига, обусловленного генераторами и трансформаторами; угол линии передачи, равный  $\pi$ , на характеристику мощности никакого влияния не оказывает. Следовательно, по условиям устойчивости, полуволновая система передачи обладает высокой пропускной способностью [2].

Повышения напряжения вдоль полуволновой линии в режиме холостого хода не возникает [3]. Однако полуволновой линии свойственны колебания напряжения в промежуточных точках при изменении режима работы. Так, например, режим напряжений в середине полуволновой электропередачи прямо пропорционален току ее конца. При холостом ходе магистрали напряжение в ее середине практически равно нулю, а при передаче по линии натуральной мощности — номинальному ее напряжению. Поэтому для полуволновых электропередач имеет место проблема отбора мощности в промежуточных точках линии.

Эта проблема может быть решена следующим образом. В середине линии отбор осуществляется трансформаторами, первичная обмотка которых включается в рассечку линии последовательно подобно трансформатору тока. На участках, примыкающих к началу и концу линии, отбор мощности может быть осуществлен обычными трансформаторами. А для участков между концами и серединой линии для отбора может быть предложена двухэлементная схема (рис. 1) [2]. Достоинство электропередач протяженностью, близкой к полуволновой, таких, как воздушные линии длиной 2900 — 3500 км, состоит в том, что для этих длин не требуется настраивающих или компенсирующих устройств, потому что эта область длин обладает достаточным уровнем «естественной» устойчивости. При этом схема электропередачи очень проста, поскольку состоит лишь из линии и концевых трансформаторов.

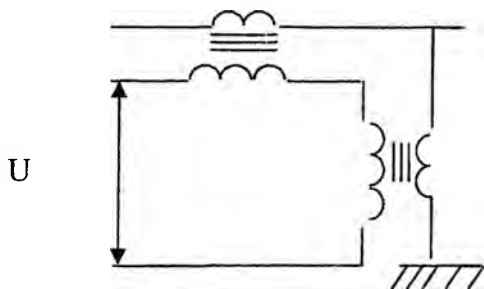


Рис. 1. Двухэлементная схема отбора мощности от полуволновой линии

При других длинах линии электропередачи могут получиться свойства путем настройки их на полуволну [4].

Можно показать, что в случаях учета сопротивлений конечных устройств системы передачи имеются протяженности линий, при которых в системе получается режим полуволны со всеми его свойствами.

Длина линии, при которой система передачи будет иметь свойства режима полуволны, определится уравнением:



$$x_A \cos \lambda + z_A \sin \lambda = 0, \quad (4)$$

где  $x_A$  - суммарное сопротивление генератора и повышающего трансформатора.

и тогда ЭДС системы передачи будет

$$\underline{E} = \underline{U}_2 \left( \cos \lambda - \frac{x_A}{Z_B} \sin \lambda \right). \quad (5)$$

Проведем численный анализ режима в относительных единицах на базе натуральной мощности ( $U_2 = 1$ ,  $Z_B = 1$ ) при учете генераторов сначала синхронным сопротивлением, а затем переходным. В первом случае суммарное эквивалентное сопротивление генераторов и трансформаторов в относительных единицах примем  $x_A = 1$ , а во втором -  $x'_A = 0,42$ . Для первого значения получим длину линии, удовлетворяющую уравнению (4). Приравняв к нулю получим:

$\cos \lambda + \sin \lambda = 0$ ;  $tg \lambda = -1$ ;  $\lambda = -45 + 180k$ ; где  $k = 1$ , отсюда следует, что  $\lambda = 135^\circ$ ;

где угол в 135 градусов это угол между векторами напряжений начала и конца линии электропередачи. Длина линии, при которой система передачи будет иметь свойства режима полуволны, определится уравнением:

$$l = \frac{\lambda}{\alpha}. \quad (6)$$

$$l = 2235,1 \text{ км}; \underline{E} = -1,41; U_1 = 1e^{j135}; I_1 = 1e^{j135};$$

Аналогично для второго значения  $x_A = 0,42$ :

$$\lambda = 157,22^\circ; l = 602,98 \text{ км}; \underline{E} = -1,085; U_1 = 1e^{j157,22};$$

$$I_1 = 1e^{j157,22}.$$

Вывод. Режим полуволны пригоден для передачи электроэнергии. Полуволновой линии свойственны колебания напряжения в промежуточных точках при изменении режима работы. Передаваемая мощность зависит только от угла сдвига, обусловленного генераторами и трансформаторами. При учете конечных устройств системы передачи имеются протяженности

линий, при которых в системе передачи получается режим полуволны волны со всеми его свойствами.

### **Литература**

1. Зеленохат, Н. И. Комбинированное объединение больших энергосистем / Н. И. Зеленохат, Ю. В. Шаров // *Электричество*. – 2006. – № 5.
2. Поспелов, Г. Е. Передача энергии и электропередачи / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2003.
3. Жданов, П. С. Вопросы устойчивости электрических систем / П. С. Жданов. – М.: Энергия, 1979.
4. Колотилова, Д. Г. Исследование концевых трансформаторов для настройки линий на полуволну. Труды ТЭИ СО АН СССР / Д. Г. Колотилова. – Вып. 16, 1963.

УДК 378.029

### **Методические основы тестирования и проблемы их реализации**

Жуковская Т. Е., Куцьло А. В., Устимович В. А.  
Белорусский национальный технический университет

Контроль качества усвоения знаний в современной педагогике рассматривается как одна из основных процедур в учебном процессе. Современными считаются методы контроля знаний, допускающие автоматизацию этого процесса на основе компьютерной техники. Поэтому актуальной является задача разработки информационно-методического обеспечения компьютерных средств контроля качества знаний по различным дисциплинам. При этом автоматизированные системы контроля знаний должны иметь четкую научно-педагогическую основу [1].

Далее с позиций применения положений современной педагогической теории обсуждаются подходы к разработке информационно-методического обеспечения систем автоматизированного контроля знаний по некоторым дисциплинам, преподаваемым на кафедре «Электротехника и электроника».

Одним из главных требований к методам контроля знаний является их объективность, что предполагает однозначную количественную интерпретацию уровня усвоения знаний и, в свою

очередь, применение компьютерных или письменных методов проверки, обеспечивающих объективную фиксацию ответов обучаемого. Для процесса количественной оценки усвоения знаний в педагогической литературе широко применяется термин «диагностика».

В педагогической теории считается, что задача объективного контроля усвоения знаний наиболее адекватно может быть решена с помощью тестирования, при этом под тестом понимается задание в сочетании с вполне определённой методикой измерения и оценки результата. Для количественной оценки результатов тестирования можно использовать основные положения теории уровней усвоения, в которой выделены пять уровней усвоения знаний вместе с признаками усвоения, а именно (0) понимание, (1) узнавание, (2) репродуктивное действие, (3) продуктивное действие, (4) творческое действие.

Одним из главных требований к тестам является их адекватность, то есть соответствие задания теста определённому уровню усвоения знаний, который предполагается проверить при тестировании. К каждому тесту должен быть разработан эталон, то есть полный и правильный метод решения, при этом для количественной оценки результата используются понятия операции теста и существенной операции теста. Под операциями теста понимаются все действия, необходимые для решения задания, из них существенными операциями считаются только те, которые соответствуют проверяемому уровню знаний.

Тесты первого уровня, то есть тесты на узнавание, могут содержать задание на опознание объектов или понятий, в котором нужно соотнести, например, условное графическое обозначение элемента цели с его наименованием, выбрав из ряда предложенных терминов один верный, при этом выполняется одна существенная операция. К первому уровню относятся более сложные выборочные тесты, в которых, например, из предложенных признаков нужно выбрать те, которые характеризуют заданный объект. Существенными операциями здесь являются правильные ответы. Материалами для таких тестов могут быть определения различных понятий, при этом с предложенным понятием нужно связать некоторые из ряда предложенных признаков.

Тесты второго уровня для решения требуют воспроизведения учебного материала без всякой подсказки и умения решать

типовые задачи. Самыми простыми тестами данного уровня считаются тесты-подстановки, в которых задание состоит в том, чтобы назвать (подставить) пропущенное слово, символ, формулу и т. п. Более сложными тестами второго уровня являются конструктивные тесты, в которых требуется назвать ряд признаков объекта, отвечая на вопрос, например, что такое измерительный прибор, или что такое транзистор. К тестам второго уровня относятся также типовые задачи.

В качестве тестов третьего уровня могут быть использованы нетиповые задачи, для которых нужно найти метод решения, а тестами четвёртого уровня являются проблемы, которые могут быть решены только путём творческой деятельности.

Практическое применение тестирования в автоматизированном варианте требует наличия соответствующих программных средств. Такие средства предлагаются различными разработчиками в виде программ-оболочек, обеспечивающих диалог с испытуемым, обработку результатов тестирования и представление их в наглядном виде, ведение базы данных, при этом учебно-методическое обеспечение в виде тестов закладывается в эти программы пользователем (преподавателем) в соответствии с изучаемой дисциплиной. В этой связи представляет интерес оценка возможностей таких программ-оболочек с методической точки зрения.

Авторы использовали в своей работе некоторые из таких программ-оболочек, и на основании своего опыта пришли к следующим выводам. Все программы-оболочки могут реализовывать тесты первого уровня, причём как тесты на опознание, так и выборочные тесты. Что касается тестов второго уровня, то в программах-оболочках предусматривается возможность ответить на поставленный вопрос, вводя слово-ответ, а это как раз и означает тест-подстановку. Указанные возможности программ-оболочек позволяют включать в состав тестов и типовые задачи, предлагая на выбор несколько числовых ответов. Такой тест может быть реализован в программе-оболочке так же, как тест на опознание, но методическое содержание его совершенно другое, так как решение в виде отвлечённого числа не является подсказкой. В принципе такой же подход может быть использован и для создания тестов третьего уровня.

Все программы-оболочки позволяют создавать наборы тестов, и при условии, что все тесты одного уровня, получаются батареи тестов. В основном программы-оболочки различаются сервисными функциями, многие предусматривают возможность использования графического материала. В целом программы-оболочки можно охарактеризовать как удобный инструмент, позволяющий преподавателю сосредоточиться на методических аспектах своей дисциплины. Однако при этом следует особое внимание уделять методически грамотной постановке тестирования в соответствии с принципами педагогической науки.

### **Литература**

1. Беспалько, В. П. Основы теории педагогических систем (Проблемы и методы психолого-педагогического обеспечения технических обучающихся систем) / В. П. Беспалько. – Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1977. – 304 с.

УДК 620.3

### **Параметры усилителя мощности звуковой частоты с оптимальной отрицательной обратной связью**

Михальцевич Г. А.

Белорусский национальный технический университет

В печати имеется большое количество схем транзисторных усилителей мощности (ТУМ) низкой частоты, но, несмотря на это, проблема разработки схемы ТУМ с выходной мощностью в несколько десятков или сотен Вт, которая по звучанию субъективно ни в чём не уступает лучшим образцам ламповым усилителям, остаётся актуальной. В большинстве случаев ТУМ с лучшими основными электрическими характеристиками звучит хуже, чем ламповые. Многие разработчики электрических схем ТУМ пытаются найти предел улучшения их электрических параметров, при которых ТУМ большой мощности будет звучать не хуже, а то и лучше, чем высококачественный ламповый.

Все параметры можно разделить на несколько групп: параметры в режиме малого сигнала, в режиме большого сигнала, входные, выходные, по постоянному и переменному току, статические и динамические и т.д. Не все параметры одинаково

важны, однако незнание их значений может привести к неожиданным результатам.

Рассмотрим некоторые эти параметры.

Мощность – параметр, не связанный с качеством УМЗЧ. Эта величина необходима для оценки громкости звука в комнате прослушивания. При этом абсолютно необходимо знать чувствительность акустических систем. На распространенных транзисторах легко можно получить мощность в 100 Вт на 8 Ом.

Частотные параметры – это все параметры, характеризующие частотные свойства усилителя. Они измеряются в режиме малого и большого сигнала. Частотные параметры можно получить из частотных характеристик – графиков. Такими характеристиками являются АЧХ - амплитудно-частотная характеристика, ФЧХ – фазочастотная характеристика. Амплитудно-фазовая характеристика - гибрид первой и второй. График модуля АЧХ, и ФЧХ в виде асимптотической кривой в логарифмическом масштабе называется диаграммой Боде. Иногда АЧХ называют зависимость коэффициента усиления усилителя от частоты. И АЧХ и ФЧХ можно снять для усилителя с обратной связью и без нее. Сравнив их можно получить такой параметр, как глубина отрицательной обратной связи (ООС).

Из диаграмм Боде можно узнать, например "частотный диапазон по уровню -3 dB. Частотный диапазон измеряется в режиме малого сигнала: при входном напряжении постоянной амплитуды напряжении равном 0.1 от максимального.

По диаграммам Боде можно определить, устойчив ли усилитель и насколько (запас устойчивости). Диаграммы Боде можно нарисовать как для усилителя с замкнутой петлей ООС и с разомкнутой. В последнем случае можно определить произведение усиления на частоту, который характеризует возможную глубину обратной связи, которую можно получить на падающей ветви амплитудной характеристики в зависимости от частоты.

Если входное напряжение равно номинальному, то из того же графика, правда, пересчитанного в мощность можно определить полосу пропускания в режиме большого сигнала. Полоса в режиме малого сигнала всегда шире, чем в режиме большого сигнала.

Параметры переходного процесса можно узнать, если на вход усилителя подать единичный перепад напряжения. Он бу-

дет отслежен не сразу, а выходное напряжение установится после некоторого переходного процесса, который характеризуется временем нарастания. По характеру переходного процесса можно судить об устойчивости усилителя. Аperiodический процесс свидетельствует об абсолютной устойчивости, а затухающие колебания – о малом запасе устойчивости.

Важным параметром усилителя является его нелинейные искажения. Коэффициент нелинейных искажений (к.н.и.) – это отношение квадратного корня из суммы квадратов амплитуд гармоник к амплитуде первой гармоники. Если на вход нелинейной системы подать два синуса с некратными частотами, то на выходе получим, кроме гармоник основных сигналов, еще несколько гармоник с частотами кратными сумме и разности основных частот и их гармоник. Если корень из суммы квадратов амплитуд последних отнести к корню из суммы квадратов амплитуд основных сигналов, получим коэффициент интермодуляционных искажений (к.и.и.). И нелинейные и интермодуляционные искажения вызваны нелинейностями одной природы и одинаково характеризуют систему. И к.н.и. и к.и.и. выражаются обычно в процентах. Более раздражают слух искажения комбинационные, чем гармонические.

При переходных процессах возникают динамические искажения. Их можно измерить, например, с помощью суммы прямоугольного и синусоидального сигналов. Нелинейные искажения могут быть снижены за счет применения более линейных элементов, линеаризации каскадов за счет местных ОС, применения симметричных схем, за счет увеличения глубины общей ОС и за счет подбора транзисторов дифференциальных каскадов и двухтактных каскадов. От переходных искажений выходного двухтактного каскада можно радикально избавиться, переведя каскад в режим А, но при этом теряется перегрузочная способность по току выходного каскада.

Скорость нарастания выходного сигнала – еще один параметр, измеряемый в режиме большого сигнала. Выражается в В/мкс. Если на вход подать прямоугольные импульсы с амплитудой, достаточной для получения максимального размаха выходного напряжения, то на выходе получим импульсы трапециидальной формы. Угол наклона боковых сторон этой трапе-

ции и есть скорость нарастания. В общем случае скорости нарастания снизу вверх и сверху вниз могут быть неравны.

Отношение сопротивления нагрузки к выходному сопротивлению усилителя называется коэффициентом демпфирования.

Выходное сопротивление усилителя – параметр, присущий самому усилителю и не зависящий от сопротивления нагрузки. Оно зависит от свойств выходного каскада и глубины ООС.

Важно, чтобы искажённый сигнал на выходе УМ частотой до 20 кГц со своими гармоническими составляющими вплоть до 16-го порядка сравнивался с входным сигналом с минимальным сдвигом фаз. Усилитель должен обладать высокой собственной линейностью без общей ООС (к.н.и < 0,3%), с ООС к.н.и < 0,005% и высоким быстродействием (> 350 В/мкс). В этом случае первый полюс его АЧХ находится на частоте около 350 кГц.

Введение неглубокой ООС, позволяет увеличить коэффициент демпфирования и уменьшить искажения, сохранив монотонно убывающий характер их спектра. При этом усилитель с замкнутой цепью ООС должен быть стабилен при работе на нагрузку любого характера, в том числе чисто ёмкостную.



# Теплоэнергетика

УДК 621.438 + 621.311.22

## Технико-экономические показатели современных ГТУ и ПГУ

Качан С. А., Богданович М. В., Тумашевский В. П.  
Белорусский национальный технический университет

В последнее десятилетие в энергетике Беларуси начали применять парогазовые технологии. Хотя опыт освоения парогазовых технологий в Беларуси не вполне удачен, в условиях преимущественного использования газового топлива именно такие установки обеспечивают наибольшую эффективность топливоиспользования при сравнительно меньших капитальных вложениях и более высоких экологических характеристиках.

Экономичность современных одноциклевых ГТУ приближается и практически достигает экономичности традиционных паротурбинных установок (см. табл. 1).

Таблица 1 Параметры работы ГТУ зарубежных производителей  
в условиях ISO 2314\*

Марка ГТУ	Производитель	Мощность,* МВт	КПД, %	Расход газов, кг/с	Температура газов, °С
SGT5-4000F	Siemens	265	38,5	645	581
GT26	Alstom	265	38,2	561,6	640
PG9351(FA)	GE	255,6	36,5	624	609
701F	Mitsubishi	270,3	38,23	651	585,8

\*Данные из доклада М.А. Короткова (каф. «ТЭС» ИГЭУ), Иваново, 2007 г.

\*\*Мощность ГТУ представлена по данным 2006 г.

Как видно из табл. 1, температура газов на выходе из ГТУ достаточно высока, чтобы построить паросиловой цикл на высокие и даже сверхвысокие параметры пара, в том числе с промпрегревом, и получить КПД по выработке электроэнергии на ПГУ на базе этих газотурбинных установок около 55% (см. табл. 2). В схемах современных ПГУ применяются двух- и трехконтурные котлы-утилизаторы.

Удельная выработка электроэнергии на теплофикационных утилизационных ГТУ и ПГУ превышает величину этого показателя для паротурбинных ТЭЦ в 1,5...2,5 раза, что позволяет достигать больших значений экономии топлива в энергосистеме.

Таблица 2 Показатели ПГУ, построенные на базе современных ГТУ\*

Марка ГТУ	SGT5-4000F	GT26	PG9351 (FA)	701F
Температура уходящих газов, °C	93,8	86,4	90,3	93,2
Тепловосприятие котла-утилизатора, МВт	533,9	558,1	565,7	547,7
Мощность ПТУ брутто, МВт	250,5	255,2	261,9	256,3
Мощность ПГУ нетто, МВт	776,5	780,8	768,8	792,8
КПД энергоблока нетто, %	56,4	56,3	54,9	56,1
Расход условного топлива на отпуск э/э, г у.т./(кВт.ч)	218,1	218,6	224,1	219,4

\*Данные из доклада М.А. Короткова (каф. «ТЭС» ИГЭУ), Иваново, 2007 г.

Так, для утилизационной ГТУ:

$$W_{\text{ГТУ}} = \frac{\eta_{\text{ГТУ}}^3}{(1 - \eta_{\text{ГТУ}}^3 / \eta_{\text{эм}}) \eta_{\text{КУ}}} = 0,65...0,75,$$

где  $\eta_{\text{ГТУ}}^3$  – электрический и электромеханический КПД ГТУ ( $\eta_{\text{ГТУ}}^3 \approx 30...38\%$ );

$\eta_{\text{эм}}$  – электромеханический КПД ГТУ ( $\eta_{\text{эм}} \approx 97...98\%$ );

$\eta_{\text{КУ}}$  – КПД котла-утилизатора ( $\eta_{\text{КУ}} \approx 75...85\%$ ).

Для теплофикационной утилизационной ПГУ с противоаварийной паровой турбиной

$$W_{\text{ПГУ}} = \frac{\frac{W_{\text{ПТ}}}{\eta_{\text{эм}}} + 1}{\left( \frac{1}{\eta_{\text{ГТУ}}^3} - \frac{1}{\eta_{\text{эм}}} \right) \eta_{\text{КУ}} \eta_{\text{ТТ}}} + W_{\text{ПТ}} = 1,10...1,45,$$

где  $W_{\text{ПТ}}$  – удельная выработка электроэнергии на базе отборов паровой турбины ( $W_{\text{ПТ}} \approx 0,20...0,45$ );

$\eta_{тп}$  – КПД транспорта теплоты от котла-утилизатора до паровой турбины ( $\eta_{тп} \approx 98\%$ ).

На рис. 1 (сплошной линией) представлены примерные значения удельной стоимости ГТУ (средние цены мирового рынка) по данным справочника Gas Turbine World 2000–2001 Handbook (у.е. соответствует доллару США). Здесь же даны стоимости нескольких ГТУ производителей ближнего и дальнего зарубежья.

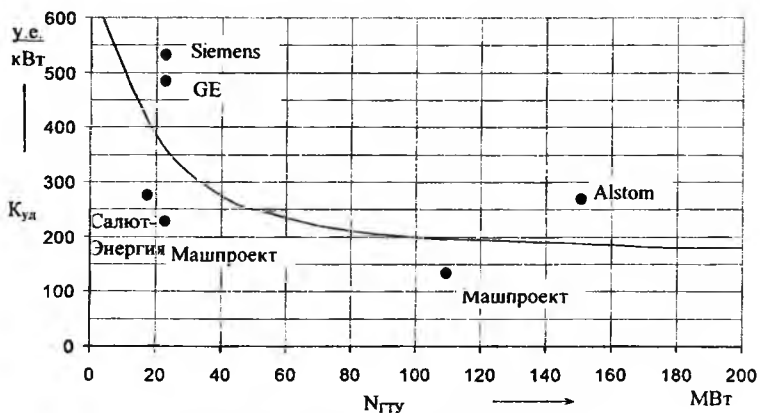


Рис. 1. Удельная стоимость ГТУ

При этом по данным GAS TO POWER – EUROPE. International Gas Union / Energy Delta Institute and The Clingendael Institute, March 2006 удельная стоимость ПГУ составляет 500...700 у.е. на кВт (см. табл. 3).

По данным доклада финансового директора ОАО РАО «ЕЭС России» С.К. Дубинина, 2006 г. удельная стоимость ПГУ в Российской Федерации колеблется от примерно 400 у.е./кВт для ПГУ-750 Киришской ГРЭС (надстройка энергоблока 300 МВт) до почти 1000 у.е./кВт для ПГУ Верхнетагильской ГРЭС. При этом средний уровень составляет около 700 у.е./кВт (см. рис. 2).

Очевидно, реконструкция ТЭС требует меньших капложений, чем строительство новых электростанций. Для примера удельная стоимость основного оборудования ПГУ-230, выбран-

ной для реконструкции Минской ТЭЦ-3, не превышает 300 у.е./кВт.

Таблица 3. Удельные капиталовложения  $K_{уд}$  и электрический КПД разных типов станций по данным различных организаций

Показатель	Наименование организации			
	EIA	MINIFI	Univ. Essen	ECN
Угольные электростанции				
КПД, %	36,7	43...44	38,6	45,4
$K_{уд}$ , у.е./кВт	1300	1750	1025	1500
Парогазовые станции				
КПД, %	53	57,1	55	58,5
$K_{уд}$ , у.е./кВт	500	657,5	525	675
АЭС				
КПД, %	32,8	36,1		
$K_{уд}$ , у.е./кВт	2000	2078,75		2312,5

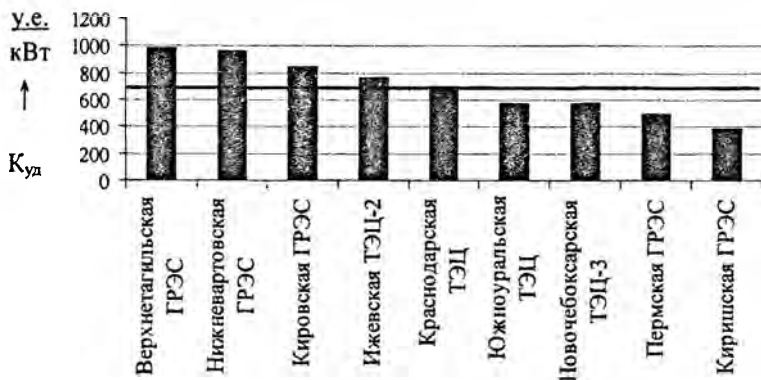


Рис. 2. Удельная стоимость ПГУ в РФ

С учетом всего сказанного можно с уверенностью утверждать, что внедрение современных экономичных и надежных ГТУ и ПГУ (что является ведущей тенденцией развития энергетики стран дальнего и ближнего зарубежья) отвечает насущным потребностям теплоэнергетической отрасли Беларуси.

УДК 621.187

**Исследование теплотехнических показателей контактной  
камеры, использующей теплоту уходящих газов  
при сжигании газообразного топлива**

Жихар Г. И., Закревский В. А.

Белорусский национальный технический университет

На котле ГМ-50-14/250 Жодинской ТЭЦ дополнительно установлен контактный экономайзер, предназначенный для использования теплоты уходящих газов. Насадочный слой камеры контактного экономайзера выполнен из керамических трубок с внешним диаметром 28 мм и длиной 500 мм сложного внутреннего сечения. Керамические трубки покрыты глазурью. Они собраны в кассеты. Нижняя часть насадочного слоя высотой 500 мм выполнена из кассет этих керамических трубок, а верхняя часть высотой 500 мм засыпана внавал кольцами из этих трубок.

Во время исследований контактной камеры нагрузка котла изменялась от 6,94 до 13,89 кг/с, а расход воды на контактный экономайзер был в пределах от 2,78 до 13,89 кг/с.

Исследования контактной камеры при высоте насадочного слоя 1 м показали, что температура уходящих газов из камеры с ростом коэффициента орошения снижается. Например, при коэффициенте орошения 0,5 кг/кг и начальной температуре воды 7°C температура уходящих газов из контактной камеры составила 51°C, а при увеличении коэффициента орошения до 1,5 кг/кг температура уходящих газов из камеры снижалась до 21°C.

С ростом коэффициента орошения температура подогрева воды в контактном экономайзере тоже снижается.

Исследования контактной камеры показали, что с ростом коэффициента орошения тепловосприятие в противоточной контактной камере резко увеличивается и при коэффициенте орошения более двух достигает порядка  $(2723,5-2803,3) \cdot 10^3$  кДж/кг.

Тепловосприятие контактной камеры также зависит от плотности орошения. Например, при увеличении плотности орошения с  $3,1 \frac{M^3}{M^2 \cdot ч}$  до  $9,6 \frac{M^3}{M^2 \cdot ч}$  тепловосприятие контактной камеры увеличивается с  $1885,5 \cdot 10^3$  кДж/ч до  $2723,5 \cdot 10^3$  кДж/ч.

С увеличением плотности орошения возрастает и объемный коэффициент теплообмена. Например, при увеличении плотности орошения с  $3,1 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$  до  $9,6 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$  объемный коэффициент тепловосприятия увеличивается с  $3,175 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$  до  $4,07 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$ .

Как показали исследования контактной камеры, аэродинамическое сопротивление слоя насадки камеры экономайзера зависит от высоты насадки, скорости газов и плотности орошения.

При обработке полученных экспериментальных данных по сопротивлению насадки получена формула для определения аэродинамического сопротивления слоя новой насадки контактной камеры экономайзера в следующем виде

$$\Delta P = (29,652 H_w W_z + 208,1576) [1 + 0,5(h_{cn} - 1)],$$

при  $h_{cn} = 1-1,5 \text{ м}$ , где  $W_z$  – скорость газов, м/с;  $H_w$  – плотность орошения,  $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$ .

Применительно к новой набивке контактной камеры экономайзера получена формула для определения температуры воды на выходе из контактной камеры

$$t_a^* = t_a^n + \frac{0,285}{\frac{W}{G_{cz}} \left( 0,602 \lg \frac{t_z^n}{x_1} - 1,463 \right)} (t_z^n - t_z^*),$$

где  $t_a^*$  и  $t_a^n$  – конечная и начальная температура воды, °С;  $t_z^*$  и  $t_z^n$  – начальная и конечная температура газов, °С;  $\frac{W}{G_{cz}}$  – коэффициент орошения, кг/кг;  $x_1$  – начальное влагосодержание газов, в г/кг сухих газов.

Для определения температуры газов за контактной камерой с новой набивкой получена следующая зависимость:

$$t_2^{\bar{}} = \left[ t_2^{\bar{}} + \frac{0,285 t_2^{\bar{}}}{\frac{W}{G_{cz}} \left( 0,602 \lg \frac{t_2^{\bar{}}}{x_1} - 1,463 \right)} - t_2^{\bar{}} \right] \frac{W}{G_{cz}} \left( 0,602 \lg \frac{t_2^{\bar{}}}{x_1} - 1,463 \right) \frac{1}{0,285}$$

### Выводы

На основании выполненных исследований контактной камеры с новой насадкой можно сделать следующие выводы.

1. Получена зависимость для определения температуры воды на выходе из контактной камеры с новой насадкой.
2. Получена зависимость для определения аэродинамического сопротивления слоя новой насадки контактной камеры.
3. Получена формула для определения температуры газов на выходе из контактной камеры экономайзера с новой насадкой.

УДК 621.181

### Сравнение способов снижения концентрации оксидов азота в продуктах сгорания топлива в газомазутных котлах

Жихар Г. И., Закревский В. А., Жихар И. Г.

Белорусский национальный технический университет

Тепловые электростанции, потребляющие до 30% добываемого топлива, являются крупнейшими источниками загрязнения воздушного бассейна прилегающих регионов токсичными выбросами, содержащимися в продуктах сгорания топлива, в том числе и оксидов азота.

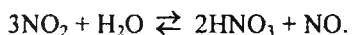
Установлено, что если уровень загрязнения атмосферы при сжигании угля принять за 100%, то сжигание мазута дает 60%, а природного газа 20%.

Однако сжигание природного газа в котлах и печах полностью не устраняет, а лишь уменьшает загрязнение атмосферного воздуха, так как при его сжигании неизбежно образуются окси-

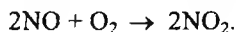
ды в количестве, соизмеримом с аналогичными выбросами при сжигании мазута и каменных углей.

В котле с контактным экономайзером находящийся в продуктах сгорания в небольших количествах диоксид азота вступает в реакцию с водой, нагреваемой в контактном экономайзере, с образованием стехиометрической смеси азотной и азотистой кислот.

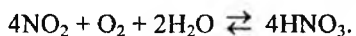
В контактном экономайзере происходит вымывание  $\text{NO}_2$  водой по реакции



Образовавшийся монооксид азота  $\text{NO}$  доокисляется в диоксид азота  $\text{NO}_2$  кислородом воздуха еще в жидкости или на границе раздела фаз по реакции



Затем  $\text{NO}_2$  растворяется в жидкости



Проведенные нами исследования показали, что в воде, прошедшей контактный экономайзер, увеличивается содержание свободной углекислоты с 25,5 мг/л для воды перед контактным экономайзером до 59,1 мг/л для воды после контактного экономайзера при отключенном декарбонизаторе и до 30,5 мг/л при включенном декарбонизаторе.

Содержание оксидов азота в газах котла ГМ-50-14/250 до контактного экономайзера при увеличении нагрузки котла с 6,94 до 13,89 кг/с изменяется с 162 мг/м<sup>3</sup> до 181 мг/м<sup>3</sup>, а в газах после контактного экономайзера соответственно возрастает с 101 мг/м<sup>3</sup> до 109 мг/м<sup>3</sup>. Следовательно, при нагрузке котла 13,89 кг/с содержание оксидов азота в уходящих газах при работе с контактным экономайзером снижается на 40%.

Зависимость концентрации оксидов азота в уходящих газах котла ГМ-50-14/250 от нагрузки описывается следующим уравнением:



$$\text{NO}_x = 2,734D_k + 143,026, \text{ мг/м}^3,$$

при работе котла с отключенным контактным экономайзером и

$$\text{NO}_x = 1,151D_k + 93,012, \text{ мг/м}^3,$$

при работе котла с контактным экономайзером.

Изменение концентрации оксидов азота в уходящих продуктах сгорания при работе котла с контактным экономайзером от производства плотности орошения контактной камеры и нагрузки котла описывается следующей зависимостью:

$$\text{NO}_x = 0,07154H_w D_k + 99,461, \text{ мг/м}^3,$$

$$\text{при } H_w = 3-10 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}.$$

При включенном контактном экономайзере содержание нитритов  $\text{NO}_2^-$  в воде после контактного экономайзера увеличивается по сравнению с содержанием их в сырой воде с 0,13 мг/л до содержания их в воде после контактного экономайзера до 0,32 мг/л для воды после контактного экономайзера. Аналогично изменяется и содержание нитратов  $\text{NO}_3^-$  (мг/л) в воде. Содержание нитратов в сырой воде составляло 5,6 мг/л, а в воде после контактного экономайзера оно равняется 9,0 мг/л. Это указывает на то, что оксиды азота  $\text{NO}_x$  растворяются в воде контактного экономайзера, что приводит к существенному снижению концентрации  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания после контактного экономайзера.

Поэтому контактный экономайзер, имеющий значительную контактную поверхность, можно рассматривать как двухфункциональный агрегат, т.е. для использования теплоты уходящих газов котлов и как установку для очистки газов от содержания в них оксидов азота.

К основным известным способам снижения образования оксидов азота в топочной камере относится рециркуляция дымовых газов в топочную камеру.

Как показал опыт использования рециркуляции газов, наиболее эффективными способами снижения образования оксидов

азота является подача газов рециркуляции через горелки со всем воздухом.

Рециркуляцию дымовых газов целесообразно применять для снижения образования оксидов азота там, где одновременно решается вопрос регулирования температуры перегретого пара.

В настоящее время одним из более эффективных методов подавления образования оксидов азота при сжигании топлива является двухступенчатое сжигание. Двухступенчатое сжигание природного газа позволяет снизить образование оксидов азота на 40-60%.

Эффективность применения различных методов снижения образования  $\text{NO}_x$  в % оценивается в следующих пределах: уменьшение избытка воздуха при сжигании природного газа – 16-26, мазута – 18-19; ступенчатое сжигание природного газа – 40-60, мазута – 22-34; рециркуляция газов при сжигании природного газа – 20-60, мазута – 23-28; уменьшение избытка воздуха + ступенчатое сжигание природного газа – 44-54, мазута – 32-38; комбинация методов при сжигании природного газа – 51-64, мазута – 38-47.

Приведенные данные в [1] показывают, что концентрация оксидов азота в газах за контактным экономайзером снижается на 40-60%. Следовательно, контактный экономайзер позволяет осуществлять достаточно эффективную очистку продуктов сгорания газа от оксидов азота, не ниже, чем широко известные другие способы. Если рассматривать экономическую эффективность метода в случае использования получаемой в контактном экономайзере теплоты, то стоимость снижения выхода оксидов азота с дымовыми газами будет значительно ниже, чем при использовании других методов.

## **Литература**

1. Аронов, И. З. Установка контактных экономайзеров с целью снижения выбросов оксидов азота с дымовыми газами / И. З. Аронов, А. И. Сигал // Химическая технология. – 1988. – №1. – С. 68-70.

УДК 621.181

**Применение контактных экономайзеров на котлах,  
сжигающих природный газ**

Закревский В. А.

Белорусский национальный технический университет

В условиях современных энергетических проблем и роста цен на дефицитные виды топлива (газ и мазут) экономия топлива является важнейшей задачей энергетической отрасли Республики Беларусь.

Актуальность повышения эффективности использования газа в народном хозяйстве растет с увеличением его удельного веса в топливном балансе страны и с ростом его стоимости.

Одним из основных источников повышения эффективности использования природного газа является полная утилизация теплоты уходящих газов котлов. Задача экономии топлива тесно связана с проблемой защиты окружающей среды. Одним из наиболее сложных и актуальных направлений среди экологических проблем теплоэнергетики является сокращение выбросов оксидов азота котельными установками. Проблема охраны окружающей среды от выбросов объектов теплоэнергетики приобрела особую социальную значимость. Оксиды азота относятся к числу наиболее токсичных выбросов теплоэнергетического оборудования. Они являются загрязнителями атмосферы при сжигании всех видов органического топлива, в том числе и природного газа. Поскольку токсичность оксидов азота превышает токсичность большинства других вредных компонентов, поэтому сокращение выброса оксидов азота, крупнейшими источниками которого являются котельные агрегаты и промышленные печи, есть одна из актуальнейших задач по защите атмосферного воздуха от загрязнения.

Для глубокого использования теплоты уходящих газов в котлах широкое распространение в промышленной энергетике получили контактные экономайзеры.

На котле ГМ-50-14/250 Жодинской ТЭЦ дополнительно установлен контактный экономайзер, предназначенный для подогрева воды, используемой на ХВО теплосети или других нужд.

Уходящие дымовые газы после котла попадают через подводящий газоход в контактный экономайзер, проходя через каналы газораспределителя, и равномерно распределяются по всему сечению контактного слоя. Проходя контактный слой, дымовые газы охлаждаются до температуры ниже температуры точки росы, поднимаясь вверх, проходят сепаратор, оставляя капельную влагу, и удаляются через отводящий газоход. Далее, дымовые газы удаляются через систему газоходов дымососом в дымовую трубу.

Во время исследований работы котла ГМ-50-14/250 с контактным экономайзером нагрузка изменялась от 6,94 кг/с до 13,89 кг/с, при этом расчетный расход газа на котел изменялся с 0,559 м<sup>3</sup>/с (2012 м<sup>3</sup>/ч) до 1,114 м<sup>3</sup>/с (4010 м<sup>3</sup>/ч) при работе котла с отключенным контактным экономайзером и с 0,545 м<sup>3</sup>/с (1964 м<sup>3</sup>/ч) до 1,080 м<sup>3</sup>/с (3890 м<sup>3</sup>/ч) при работе котла с включенным контактным экономайзером. Следовательно, при работе с включенным контактным экономайзером расход газа на котел при нагрузке 13,89 кг/с (50 т/ч) снижается на 0,033 м<sup>3</sup>/с (120 м<sup>3</sup>/ч). С увеличением нагрузки котла с 6,94 кг/с до 13,89 кг/с температура уходящих газов возрастает с 116°С до 139°С при работе котла с отключенным контактным экономайзером и с 74°С до 83°С при работе котла с включенным контактным экономайзером.

Максимальное значение КПД котла при работе без контактного экономайзера имеет место при нагрузке порядка 12,5 кг/с (45 т/ч) и составляет 93,27%, и при работе котла с включенным контактным экономайзером максимальное значение КПД составляет 96,12%.

Во время испытаний котла определялась концентрация оксидов азота в продуктах сгорания до и после контактного экономайзера в зависимости от нагрузки котла. Как показали исследования, содержание оксидов азота в газах до контактного экономайзера при увеличении нагрузки 6,94 кг/с до 13,89 кг/с изменяется с 162 мг/м<sup>3</sup> до 181 мг/м<sup>3</sup>, а в газах после контактного экономайзера соответственно возрастало с 101 мг/м<sup>3</sup> до 109 мг/м<sup>3</sup>.

Следовательно, содержание оксидов азота в уходящих газах при работе котла с контактным экономайзером при нагрузке 13,89 кг/с снижается на 40%.

На основании проведенных исследований работы котла можно сделать следующие выводы.

1. При работе котла ГМ-50-14/250 с включенным контактным экономайзером экономия природного газа при нагрузке 13,89 кг/с (50 т/ч) составляет 120 м<sup>3</sup>/ч.
2. Содержание оксидов азота в уходящих газах при работе котла с включенным контактным экономайзером при нагрузке 13,89 кг/с снижается на 40%.

УДК 621.34

### **Оптимизация режимов работы систем централизованного теплоснабжения при количественно-качественном режиме отпуска теплоты**

Седнин А. В., Марченко П. Ю.

Белорусский национальный технический университет

Наиболее актуальным является оптимизация режимов Минской ТЭЦ-4 в летний и переходный периоды ее работы, так как эффективность оптимального распределения тепловых нагрузок на ТЭЦ возрастает при снижении их общего уровня.

Анализ тепловых нагрузок МТЭЦ-4 показывает, что тепловая нагрузка в течении июня - августа изменяется в пределах 140 - 180 Гкал/ч. В мае и сентябре она возрастает до 220 – 240 Гкал/ч, а в переходный период составляет 520 Гкал/ч.

При характерной для летнего периода нагрузке оптимальным является одноступенчатый подогрев сетевой воды (СВ), а именно режим работы блока с полностью открытой поворотной диафрагмой ЦНД и естественным давлением в нижнем отопительном отборе. Эффективность обусловлена отсутствием потерь на дросселирование пара в диафрагме ЦНД и высоким КПД этого отсека турбины.

Таким образом, в летний период блок должен работать с постоянным подогревом СВ и соответствующим расходом воды

через нижний сетевой подогреватель (СП), т.е. при количественном регулировании отпуска теплоты.

Увеличение расхода сетевой воды через СП блоков способствует повышению теплофикационной выработки электроэнергии и экономии топлива в энергосистеме только при значительном уровне тепловых нагрузок (при  $Q_T > 220$  Гкал/ч), когда оптимальным является двухступенчатый подогрев воды без обвода верхнего СП.

Кроме того, необходимо учесть влияние температуры обратной сетевой воды на работу турбины.

Динамика изменения температуры обратной сетевой воды описана в [2,3]. Для расчета необходимо принять ряд допущений [1]:

- При изменении расхода воды в теплосети в ней происходит пропорциональная разрегулировка;
- Заданная доля по схеме присоединения нагрузки ГВС и по оснащенности их регуляторами представляет собой обобщенного потребителя;
- Нагрузка ГВС в ночное время составляет 10% от максимальной;
- Тепловые потери через теплоизоляцию уменьшают температуру прямой и обратной сетевой воды на одинаковую долю, равную половине полной потери тепловой энергии.

Температура прямой СВ в сети при заданной температуре наружного воздуха [3] в зависимости от задаваемой максимальной температуре сетевой воды  $\tau_{o1}^i$ :

$$\tau_{o1} = t_{en}^p + \Delta t_o^i \bar{Q}_o^{0,8} + (\delta \tau_o^i - 0,5\theta^i) \bar{Q}_o,$$

где  $\Delta t_o^i$  – средняя разность температур в отопительном отборе

$$\Delta t_o^i = (\tau_3^i + \tau_{o2}^i) / 2 - t_{en}^p,$$

где  $\tau_3^i$  – расчетная температура воды в стояке местной системы после смешения, °С;  $\bar{Q}_o$  – относительный расход теплоты на отопление при различных температурах наружного воздуха.

$$\bar{Q}_o = \frac{\tau_1 - \tau_{o2}}{\delta \tau_o^p} = \frac{t_{en}^p - t_{нар}}{t_{en}^p - t_n^p} = \frac{Q_o}{Q_o^p},$$

где  $Q_o^p$  – расчетный расход тепла на отопление;  $Q_o$  – расход тепла на отопление при заданной температуре наружного воздуха;  $\delta\tau_o'$  – расчетная разность температур в теплосети  $\delta\tau_o' = \tau_1' - \tau_{o2}'$ ;  $\theta'$  – расчетная разность температур в отопительной системе  $\theta' = \tau_3' - \tau_{o2}'$ .

Расчет тепловых потерь через изоляцию осуществляется в соответствии с пересчетом нормируемых среднегодовых потерь на текущие температуры прямой, обратной сетевой воды, наружного грунта на глубине залегания оси трубопровода.

$$Q_{mn} = Q_{mn}^{норм} (t_{np}^{тек} + t_{об}^{тек} - 2t_o^{тек}) / (t_{np}^{исп} + t_{об}^{исп} - 2t_o^{исп}),$$

где  $Q_{mn}^{норм}$  – нормируемые среднегодовые теплопотери через изоляцию;  $t_{np}^{исп}$ ,  $t_{об}^{исп}$ ,  $t_o^{исп}$  – температуры в прямой, обратной магистрали по фактическому температурному графику и температура окружающей среды, которые использовались для пересчета нормативных тепловых потерь на фактический график;  $t_{np}^{тек}$ ,  $t_{об}^{тек}$ ,  $t_o^{тек}$  – текущие температуры воды в прямой, обратной магистрали и окружающей среды соответственно.

Температуры окружающей среды находятся по формулам:

$$t_o^{тек} = (t_{np}^{тек} M_{подз} + t_n^{тек} M_{надз}) / M;$$

$$t_o^{исп} = (t_{np}^{исп} M_{подз} + t_n^{исп} M_{надз}) / M,$$

где  $M_{подз}$ ,  $M_{надз}$ ,  $M$  – материальная характеристика трубопровода подземной, надземной прокладки и суммарная  $M_{подз} = dL_{подз}$ ,  $M_{надз} = dL_{надз}$ ,  $M = M_{подз} + M_{надз}$ ;  $d$  – наружный диаметр трубопровода;  $L_{подз}$  – длина подземных трубопроводов по каналу;  $L_{надз}$  – эквивалентная длина надземных трубопроводов в однетрубном исчислении с учетом местных сопротивлений.

Температура прямой сетевой воды у потребителя определяется:

$$\tau_{1потр} = \tau_1 - 0,6 Q_{mn} / W_{сеть},$$

а температура обратной сетевой воды на теплоисточнике:

$$\tau_{1ист} = \tau_{2сеть} - 0,4 Q_{mn} / W_{сеть}.$$

Суммарный расход сетевой воды от теплоисточника определяется с учетом утечек через неплотности:

$$W_{\text{сеть}} = W_{\text{сеть}} + W_{\text{ут.}}$$

Имея гидравлический расчет сети, для определения экономичности работы комплекса при той или иной режиме, возможно определить оптимальное количество ступеней и температур количественно-качественного режима центрального отпуска теплоты.

### Литература

1. Разработка технических решений по повышению экономичности и маневренности основного оборудования тепловых электростанций при сниженных нагрузках: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. темы Качан А. Д. – Минск, 2002. – 169 с.
2. Зингер, Н. М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем / Н. М. Зингер. – М.: Энергоиздат, 1986. – 320 с.
3. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети / Е. Я. Соколов. – М.: Энергия, 1975. – 376 с.

УДК 621.165

### Математическая модель энергетической характеристики турбины ПТ-35/90 Витебской ТЭЦ

Попова Ю. Б.

Белорусский национальный технический университет

Энергетическая характеристика (ЭХ) промышленно-теплофикационной турбины (ПТ-турбины) представляет собой зависимость расхода теплоты  $Q_0$  от трех основных параметров: электрической мощности  $N$ , нагрузок производственного  $Q_{\text{п}}$  и теплофикационного  $Q_{\text{т}}$  отборов. Энергетические характеристики могут быть представлены в графическом и аналитическом видах.

Целью данной работы является разработка методики построения аналитической модели энергетической характеристики турбоагрегата ПТ-35-90/10 Витебской ТЭЦ, на основе исходной графической ЭХ (см. рис. ниже).



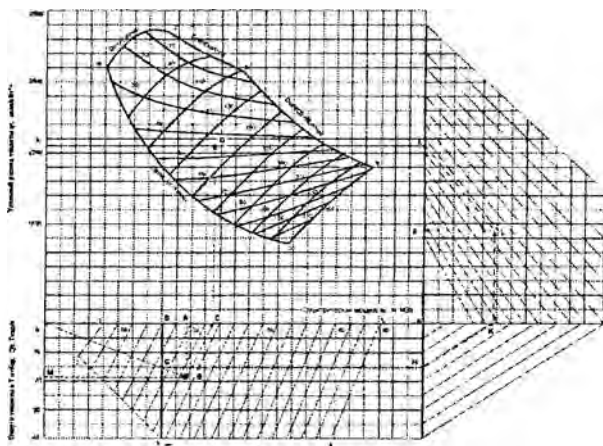


Рис. График зависимости удельного расхода теплоты на выработку электроэнергии от мощности и отпуска теплоты в производственный и теплофикационные отборы (ЭХ турбины ПТ-35-90/10)

Как видно из приведенного выше рисунка, графическая энергетическая характеристика турбины изображена в виде двух квадрантов. Верхний квадрант представляет собой зависимость удельного расхода теплоты от мощности турбины и производственного отбора (при этом теплофикационный отбор выключен). При включении теплофикационного отбора необходимо пользоваться нижним квадрантом и вводить соответствующие поправки. Тогда по заданным значениям, например,  $Q_n = 45 \text{ Гкал/ч}$ ,  $Q_t = 18 \text{ Гкал/ч}$ ,  $N = 19,5 \text{ МВт}$ , удельный расход теплоты определяется в следующей последовательности. Для заданных значений  $N$  и  $Q_t$  (по прямым АВ и МВ) определяем фиктивное значение электрической мощности с поправкой на включение Т-отбора (по линии ВС). Затем, принимая во внимание производственный отбор и используя линию DC, определяем фиктивный удельный расход теплоты (по линии DE' или DE). Уточненное значение удельного расхода теплоты можно определить по дополнительным построениям: пересечение отрезков OB и SS' позволяет получить т. G (отрезок SG в масштабе определяет значение  $Q_t/N$ ). Из т. G по пути G-H-K-L методом параллельного пере-

носа значение  $Q_{\tau}/N$  переносится на вспомогательное правое верхнее поле. Из т. Е параллельно вспомогательным линиям снижения удельного расхода теплоты проводим EL. Ордината т. L (т. F) определяет значение удельного расхода теплоты  $q_{\tau}$  для заданных  $Q_{\text{п}}$ ,  $Q_{\tau}$ ,  $N$ . Расход теплоты  $Q_0$  можно получить по формуле  $Q_0 = Q_{\text{п}} + Q_{\tau} + q_{\tau} \cdot N$ .

Для построения аналитической модели исходную графическую ЭХ предлагается рассматривать в виде двух поверхностей 1-2-3-4-5 и 6-7-8-9-10. Тогда приведенный ниже алгоритм позволит для любого сочетания нагрузок  $Q_{\text{п}}$ ,  $Q_{\tau}$ ,  $N$  определить расход теплоты на турбину в свежем паре, если, данный режим является допустимым.

*Алгоритм построения аналитической модели НЭХ:*

1. Определить пределы изменений нагрузок:  $Q_{\text{п}} \in [0; 110]$  Гкал/ч,  $Q_{\tau} \in [0; 40]$  Гкал/ч,  $N \in [8; 46]$  МВт.
2. Определить зависимость  $Q_{\tau}^{\text{max}} = f(N)$ :
  - если  $N \in [5; 16]$  МВт - аппроксимация линии 2-3;
  - если  $N \in (16; 39,5]$  МВт - аппроксимация линии 3-4 (в данном случае  $Q_{\tau}^{\text{max}} = 40$  МВт на всем участке);
  - если  $N \in (39,5; 46]$  МВт - аппроксимация линии 4-5.
3. Определить зависимость  $N_{\phi} = f(N, Q_{\tau})$ .
4. Определить зависимость  $Q_{\text{п}}^{\text{min}} = f(N_{\phi})$ :
  - если  $N_{\phi} \in [8,2; 16,8]$  МВт - аппроксимация линии 6-7;
  - если  $N_{\phi} \in (16,8; 26,8]$  МВт - аппроксимация линии 7-8 (в данном случае  $Q_{\text{п}}^{\text{min}} = 0$  на всем участке);
  - если  $N_{\phi} \in (26,8; 45]$  МВт - аппроксимация линии 8-9.
5. Определить зависимость  $Q_{\text{п}}^{\text{max}} = f(N_{\phi})$ :
  - если  $N_{\phi} \in [8,2; 33,6]$  МВт - аппроксимация линии 6-10;
  - если  $N_{\phi} \in (33,6; 45]$  МВт - аппроксимация линии 10-9.
6. Определить зависимость  $D_0 = f(N_{\phi}, Q_{\text{п}})$  для отсечения запрещенных режимов при условии, что  $D_0 \in [70; 251]$  т/ч.
7. Определить зависимость  $D_{\text{вх}}^{\text{ЧСД}} = f(N_{\phi}, Q_{\text{п}})$  для отсечения запрещенных режимов при условии, что  $D_{\text{вх}}^{\text{ЧСД}} \in [25; 95]$  т/ч.
8. Определить зависимость  $q_{\phi} = f(N_{\phi}, Q_{\text{п}})$ , учитывая, что  $q_{\phi} \in [1350; 2850]$  ккал/(кВт·ч).

9. Определить зависимость  $\Delta=f(N, Q_{\tau})$ . Для рассмотренного выше примера данная зависимость позволит получить расстояние SG.

10. Определить зависимость  $q=f(q_{\phi}, \Delta)$ .

Реализация данного алгоритма осуществлялась путем проведения серии аппроксимаций, указанных выше поверхностей и ограничивающих их линий с использованием встроенных функций множественной регрессии автоматизированной системы MathCAD 2000. Также разработано и внедрено программное обеспечение для автоматизации процесса построения энергетической характеристики турбины ПТ-35-90/10 Витебской ТЭЦ в аналитическом виде. Разработанное программное обеспечение позволяет вычислять значение расхода теплоты  $Q_0$  как для заданных значений электрической мощности, производственной и теплофикационной нагрузок, так и для их интервалов.

УДК 621.184.3-034.14:621.182.24

### **Повышение качества регулирования температуры перегретого пара за котлом как фактор увеличения срока службы металла пароперегревателя**

Горелышева М. Л., Кулаков Г. Т.

Белорусский национальный технический университет

Износ основных производственных фондов энергетической системы «Белэнерго» в целом составлял на 1.01.2005г. 60.7%.

[1] В связи с этим актуальной становится проблема снижения износа основных производственных фондов, в том числе, за счет существенного улучшения качества регулирования температуры перегретого пара котлов. Необходимо получение количественных параметров, характеризующих увеличение срока службы металла за счет улучшения качества регулирования.

Автоматическая система регулирования температуры перегретого пара должна гарантировать в регулируемом диапазоне работы котла [2]: - устойчивую работу автоматических регуляторов (отсутствие автоколебаний) и ограниченную частоту их включения; - протекание переходных процессов, вызываемых скачкообразным изменением заданного значения нагрузки на

10% (при исходной номинальной нагрузке), с максимальным отклонением температуры свежего пара на выходе из котла на  $\delta$  °С, для промежуточного пара- 10 °С и значениями интегрального квадратичного критерия соответственно 5000 и 10000 (°С)<sup>2</sup>·с. Точность поддержания заданного значения температуры свежего пара на выходе из котла существенно влияет на экономичность его работы, а повышение температуры пара на 10 °С снижает долговечность пароперегревателя из стали 12Х1МФ на 30%. Для улучшения качества регулирования температуры перегретого пара за котлом в широком диапазоне изменения нагрузок к типовой системе автоматического регулирования (САР) с дифференцированием промежуточного сигнала по температуре перегретого пара за местом впрыска добавлено устройство коррекции параметров динамической настройки  $\epsilon$  функции от нагрузки котла или энергоблока [3, 4].

На рис.1 представлены графики оптимальных переходных процессов системы автоматического регулирования температуры перегретого пара за котлом ТГМП-314 Лукомльской ГРЭС.

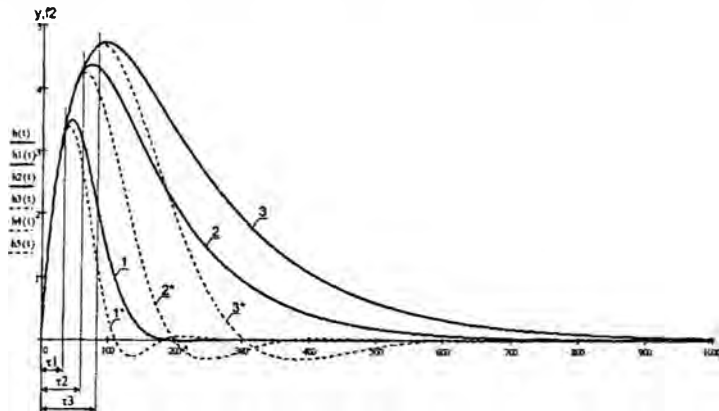


Рис.1 Переходные характеристики по температуре перегретого пара за котлом ТГМП-314 при возмущении расходом пара для разных уровней нагрузок: 1- 100% нагрузка, 2- 50% нагрузка, 3- 30% нагрузка; \*-возможные оптимальные графики переходных процессов новой САР за счет внедрения: 1\*- 100% нагрузка, 2\*- 50% нагрузка, 3\*- 30% нагрузка

При этом параметры оптимальной динамической настройки регуляторов впрысков корректируются автоматически в функции от нагрузки энергоблока с помощью УКПДН.

Из анализа графиков переходных процессов следует, что даже при оптимальных параметрах динамической настройки регуляторов впрысков котлов качество регулирования существенно ухудшается с уменьшением нагрузки. При этом величина дисперсии возрастает более, чем в 2 раза. Это обусловлено тем, что с уменьшением нагрузки котла увеличивается как величина запаздывания по каналу регулирующего воздействия, так и величина инерционности с одновременным уменьшением относительной постоянной времени инерционного участка пароперегревателя. Потенциальная возможность улучшения качества регулирования температуры перегретого пара за счет модернизации САР после времени запаздывания представлена кривыми 1\*, 2\*, 3\* (рис.1).

В работах [5-7] на основе модификации линейного упреждителя Смита [8] рассмотрены способы реализации такой возможности, позволяющие получить частичную автономность и инвариантность многоконтурной системы регулирования при отработке наиболее опасного крайнего внешнего возмущения. При этом качество регулирования будет тем лучше, чем меньше величина запаздывания и больше величина располагаемого регулирующего воздействия, величину которого можно увеличить, связав два последовательно включенных впрыска.

Как показали проведенные нами расчеты по методике, изложенной в [9], уменьшение дисперсии по температуре перегретого пара за котлом ТГМП-314 в 2 раза позволяет увеличить срок службы металла пароперегревателя на 1,7 года. Это позволит существенно повысить надежность работы энергоблока в целом.

**Выводы:** 1.САР температуры свежего пара с УКПДН в функции от нагрузки обладает потенциальной возможностью существенного улучшения качества регулирования в широком диапазоне изменения нагрузок от 100 до 30% за счёт использования структурно-параметрической оптимизации, методов инвариантности и адаптивности. 2.Существенное улучшение качества регулирования свежего пара позволит значительно увеличить срок службы металла и увеличить надежность работы энергоблока.

## Литература

1. Государственная комплексная программа модернизации основных производственных фондов белорусской энергетической системы, энергосбережения и увеличения доли использования в республике собственных топливно-энергетических ресурсов в 2006-2010 годах. Указ Президента Респ. Беларусь, 25 авг. 2005 г., № 399 // Республиканское унитарное предприятие «БЕЛТЭИ». – Минск, 2006.
2. Клюев, А. С. Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов / А. С. Клюев, А. Т. Лебедев, С. И. Новиков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 280 с.
3. Система автоматического регулирования температуры перегретого пара с устройством коррекции параметров динамической настройки / Г. И. Хутский, Г. Т. Кулаков // Теплоэнергетика. – 1968. – № 3. – С. 64– 67.
4. Кулаков, Г. Т. Теоретические основы экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации систем автоматического управления для повышения эффективности использования теплоэлектростанций в переменных режимах: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.07 и 05.14.14 / Г. Т. Кулаков. – Минск, 1989. – 295 л.
5. Кулаков, Г. Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: спр. пособие/ Г. Т. Кулаков. – Минск: Вышэйшая школа, 1984. – 192 с.
6. Кулаков, Г. Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования/ Г. Т. Кулаков. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 135 с.
7. Кузьмицкий, И. Ф. Теория автоматического управления: учеб. пособие для студентов специальности «Автоматизация технологических процессов и производств» / И. Ф. Кузьмицкий, Г. Т. Кулаков. – Минск: БГТУ, 2006. – 486 с.
8. Смит о.Дж. Автоматическое регулирование: Пер. с англ.; под ред. Е. П. Попова. – М.: Физматгиз, 1962. – 848 с.
9. К вопросу оптимизации системы регулирования температуры перегретого пара из учета надежности работы металла пароперегревателя / Ю. П. Свириин, В. А. Птичкин, Г. Т. Кулаков // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1972. – № 9. – С. 139–142.

УДК 621.184

## К выбору варианта реконструкции ТЭЦ малой мощности

Седнин А. В., Богданович М. Л.

Белорусский национальный технический университет

В последние годы наблюдается устойчивая тенденция роста цен на энергоносители для Республики Беларусь, в частности – на природный газ. Данное обстоятельство вынуждает вести постоянное поиск технических решений связанных с эффективным использованием топливно-энергетических ресурсов.

Для ТЭЦ малой мощности существует ряд проблем, решение которых может быть осуществлено за счет изменения типа, вида и состава основного и вспомогательного оборудования, а также тепловой (технологической) схемы энергетического производства. Важность этого обстоятельства отмечают также в Российской Федерации, а именно в Краснодарской энергосистеме [1].

На примере Могилевской ТЭЦ-1, рассмотрим некоторые варианты реконструкции ТЭЦ малой мощности. За исходные величины теплофикационных нагрузок примем 2005 год. В рассматриваемом году выделим три основных периода (режима) работы Могилевской ТЭЦ-1:

- зимний (отопительный, см. табл. 1);
- летний (неотопительный, см. табл. 2);

Таблица 1. Основные показатели Могилевской ТЭЦ-1 за отопительный период 2005 года.

Интервал температур наружного воздуха, °С	Отпуск теплоты			Выработка электроэнергии Э, кВт ч	Расход натурального топлива В, м <sup>3</sup> /ч
	Отборный пар $Q_{отб}$ , Гкал/ч ( $P_1 = 0,45$ МПа, $T_1 = 230$ °С)	Редуцированный пар $Q_{ред}$ , Гкал/ч ( $P_2 = 1,10$ МПа, $T_2 = 230$ °С)	Сетевая вода $Q_{св}$ , Гкал/ч		
+ (8 ÷ 0)	25,480	0,439	41,545	10786,7	10950,1
- (0 ÷ 4)	28,501	0,561	46,038	11554,1	12295,4
- (4 ÷ 8)	30,117	0,697	54,385	13178,5	13611,5
- (8 ÷ 12)	30,702	0,426	60,045	14278,6	15063,7
- (12 ÷ 25)	31,446	0,463	62,196	15191,8	15470,6

Таблица 2. Основные показатели Могилевской ТЭЦ – 1 за летний период 2005 года.

Месяц	Продолжительность $\tau$ , часы	Отпуск теплоты			Выработка электро- энергии $\Sigma$ , кВт·ч	Расход натурального топлива $B$ , м <sup>3</sup> /ч
		Отборный пар $Q_{отб}$ , Гкал/ч	Редуци- рованный пар $Q_{ред}$ , Гкал/ч	Сетевая вода $Q_{сет}$ , Гкал/ч		
Апрель	480	21,165	0,283	23,819	7152,9	7482,3
Май, Июнь, Октябрь	1800	16,399	0,273	20,418	5744,0	6071,6
Июль, Сентябрь	1344	12,544	0,267	18,622	4991,6	5170,9
Август	552	13,786	0,248	15,672	4663,2	4519,8

- ремонтной кампании тепловых сетей. Этот режим не учитываем, в виду сложности определения тепловых нагрузок и относительной малой годовой продолжительности (около 5 %).

В варианты реконструкции ТЭЦ представлены в таблице 3.

Произведя необходимые расчеты, были получены следующие результаты абсолютных приростов выработки электроэнергии, потребления топлива и годовой экономии топлива для каждого из представленных вариантов (см. таблицу 4).

При рассмотрении варианта 1, оказалось невыгодным покрытие нагрузки потребителя  $P_2 = 1,10$  МПа,  $T_2 = 230$  °С отборным паром. Это объясняется малым значением энергопотребления (3232 Гкал/год) и, как следствие, возрастанием влияния внутренних энергетических потерь турбины с отбором  $P_{отб} = 1,10$  МПа.

В варианте 2, было принято решение не разделять циркуляционные контуры колов-утилизаторов по давлениям (контур  $P_1 = 0,45$  МПа,  $T_1 = 230$  °С, контур  $P_2 = 1,10$  МПа,  $T_2 = 230$  °С), так как обоим потребителям, в соответствии с договорными параметрами, необходим пар с температурой  $230 \pm 15$  °С.



Таблица 3. Состав основного оборудования рассматриваемых вариантов реконструкции Могилевской ТЭЦ – 1.

Рассматриваемый вариант	Основное оборудование	
	Котлы	Турбины
Вариант 1: ПТУ ТЭЦ	2 × БГМ – 35 – 3,9/440; 2 × БКЗ – 75 – 3,9/440; 2 × КВГМ – 30.	1 × Р – 12 – 3,4/0,1; 1 × ПР – 12 – 3,4/0,6/0,1.
Вариант 2: ГТУ ТЭЦ	2 × КУ – 50 – 1,2/240; 2 × КВГМ – 30.	2 × ТВМ – 211 RB.
Вариант 3: ГТУ + ПТУ ТЭЦ	2 × КУ – 50 – 1,2/240; 2 × КВГМ – 30.	2 × ТВМ – 211 RB; 3 × ТГ 0,6/0,4 – К 1,3.
Вариант 4: ПТУ + ГПА ТЭЦ	2 × БГМ – 35 – 3,9/440; 2 × БКЗ – 75 – 3,9/440; 1 × КУ – 0,3 – 1,2/240; 2 × КВГМ – 30.	1 × Р – 12 – 3,4/0,1; 1 × ПР – 12 – 3,4/0,6/0,1; 1 × Quanto C190 SP.

Таблица 4. Основные показатели Могилевской ТЭЦ – 1 в зависимости от рассматриваемого варианта реконструкции

Рассматриваемый вариант	Абсолютный прирост:		Экономия топлива В, тыс. м <sup>3</sup>
	выработки электроэнергии ΔЭ, тыс. кВт ч	расхода натурального топлива ΔВ, тыс. м <sup>3</sup>	
Вариант 1: ПТУ ТЭЦ	51063,98	10348,46	4513,66
Вариант 2: ГТУ ТЭЦ	300278,27	43760,47	46077,08
Вариант 3: ГТУ + ПТУ ТЭЦ	310156,67	44443,65	48457,39
Вариант 4: ПТУ + ГПА ТЭЦ	52531,36	10598,6	4697,35

Таким образом, выигрыш от снижения температуры насыщения при выделении контура циркуляции  $P_1 = 0,45$  МПа,  $T_1 =$

230 °С компенсируется проигрышем в величине перегрева пара. Целью совмещения ПТУ с ГТУ в варианте 3, было получение дополнительной выработки электроэнергии за счет подогрева обратной сетевой воды в бойлере, который может рассматриваться как конденсатор без потерь в окружающую среду. То есть давление пара в выхлопном патрубке паровой турбины подбиралось таким образом, чтобы температура насыщения была незначительно выше температуры обратной сетевой воды.

Выбор тепловой мощности ГПА варианта 4, основывался на минимальном устойчивом часовом значении потребления теплоты из коллектора  $P_2 = 1,10$  МПа,  $T_2 = 230$  °С. При таком подходе число часов использования ГПА с комбинированной выработкой электроэнергии на базе теплового потребления возрастает до своего максимального значения.

Из анализа данных таблицы 4 видно, что с точки зрения системной экономии топлива наиболее целесообразно идти по пути совместного применения ГТУ и ПТУ, наименее – чисто ПТУ (даже при оптимальном составе оборудования).

Рассмотрим характерные достоинства и недостатки, присущие ГТУ ТЭЦ по сравнению с ПТУ ТЭЦ со средними параметрами свежего пара (для нашего случая).

Достоинства:

- Отсутствие трубопроводов II категории I-й группы подведомственных Проматомнадзору [3]. Максимальная категория применяемых трубопроводов – IV, что упрощает требования к приемке в эксплуатацию, контролю и диагностике, а также к ремонту с применением электросварки в процессе эксплуатации.
- Пониженные параметры свежего пара позволяют снизить требования к показателям качества питательной воды [4], и следовательно, упрощается ХВО, и снижаются расходы на подготовку воды, для восполнения внутренних потерь.
- Пониженные требования по содержанию кислорода в питательной воде [4].
- Отказ от различного рода корректировки питательной воды, что также снижает расходы на ХВО. Например, для Могилевской ТЭЦ – I расходы связанные на корректировку питательной

воды с помощью гидразингидрата и аммиака за 2005 год составили  $Z_{кр}^{на} \approx 3000$  у.е. (в ценах на 01.06.2006 г.).

Недостатки:

- При низких температурах наружного воздуха (в период максимального теплового потребления) снижается паропроизводительность котлов-утилизаторов и возрастает нагрузка на водогрейные котлы.
- Отсутствие резервных источников для обеспечения бесперебойного снабжения паром производственных потребителей 1-й категории в аварийных ситуациях. Установка в котлах-утилизаторах аварийных горелок усложняет и удорожает схему.
- Нет опыта проектирования, эксплуатации и ремонта ТЭЦ подобного рода.

*Выводы*

1. При существующем уровне цен на природный газ проводить реконструкцию ТЭЦ малой мощности на базе паротурбинного цикла при сохранении начальных параметров пара, как в качестве основного недопустимо.
2. Эффективность применения ГТУ ТЭЦ характеризуется не только высокими технико-экономическими показателями, но и пониженными текущими расходами на ХВО, что может компенсировать текущие расходы на обслуживание и ремонты газотурбинных двигателей и воздушных компрессоров.

### **Литература**

1. Галушко, В. Ф. Использование заводских ТЭЦ для увеличения производства электрической и тепловой энергии в Краснодарском крае / В. Ф. Галушко // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 4. – С. 28–29.
2. Паровые турбины малой мощности КТЗ / В. И. Кирюхин, И. М. Тарасенко, Е. П. Огурцова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.
3. Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды. – Минск, 1998.
4. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов. – Минск, 2006.
5. Яковлев, Б. В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения / Б. В. Яковлев. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2002. – 448 с.

# Энергетическое строительство

УДК 626.8

## Техническое состояние гидротехнических сооружений Лошицкого водоема и рекомендации по его очистке

Круглов Г. Г., Кунцевич Н. М., Линкевич Н. Н.

Белорусский национальный технический университет

Река Лошица является правым притоком р. Свислочь. Она сливается из нескольких мелких притоков, протекающих микрорайоны Юго-Запад и Курасовщина, огибает аэропорт № 1 и микрорайон Лошица г. Минска. В 50-е годы прошлого столетия на р. Лошица в пределах усадебно-паркового комплекса был построен подпорный гидроузел, включающий паводковый водосброс, выполненный по типу шлюза-регулятора, и земляную плотину малой длины. Створ гидроузла был выбран удачно, и водохранилище хорошо вписывается в парковый комплекс на одном берегу и территорию со старинными зданиями на другом. Однако в городской черте в реку сбрасывались различные стоки. Это повлекло загрязнение не только реки, но и водохранилища, которое не эксплуатировалось, не очищалось и не благоустраивалось, хотя местными жителями в первое время весьма активно использовалось в целях отдыха и рыбной ловли. После строительства микрорайона Лошица требуется оздоровление и благоустройство района застройки.

В связи с разработкой проекта “Очистка водоема р. Лошицы с реконструкцией инженерных сооружений и благоустройством прибрежной зоны Лошицкого усадебно-паркового комплекса” нами были выполнены поиск и изучение документации по водосливной и земляной плотинам Лошицкого водоема, проведен детальный осмотр конструктивных элементов плотины, описано техническое состояние конструкций, выявлены разрушения и дефекты. При этом была определена прочность бетона на сжатие неразрушающим методом с помощью сертифицированного склерометра Шмидта. Измерения проводились для каждого элемента бетонного

В верхнем бьефе имеются просадки грунта в местах сопряжения правого берега и земляной плотины с открылками береговых устоев, а на низовом откосе плотины имеются локальные размывы.

Для организованного сбора и отвода фильтрационных вод в нижнем бьефе необходимо устройство дренажа (трубчатого или наклонного) с отводом воды в русло реки.

Для уменьшения обходной фильтрации в верхнем бьефе рекомендуется устройство глиняного экрана на верховом откосе плотины и на правом берегу в местах сопряжения с открылками береговых устоев. Толщина экрана 0,3...0,5 м, который сверху перекрывается защитным слоем песка толщиной не менее 1 м. Последний закрепляется посевом трав или одерновкой по слою растительного грунта толщиной 15...20 см.

Остатки пешеходного мостика на островок рекомендуется разобрать и возвести заново.

В настоящее время р. Лошица сильно загрязнена из-за сброса в нее неочищенных сточных вод. В месте пересечения ее с ул. Кижеватова отчетливо видно насколько грязная вода протекает по трубе. В то же время через шандоры водосбросной плотины сбрасывается осветленная вода. В дождливые периоды водоем загрязняется из-за поступления поверхностных ливневых вод. Некоторое очищение воды происходит в водоеме вследствие уменьшения скоростей течения и осаждения наносов, а также за счет очистки ее водной и береговой растительностью.

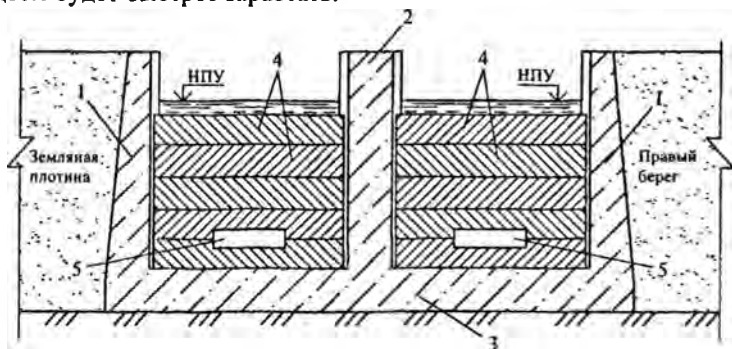
Для очистки водоема и благоустройства береговой зоны водоем необходимо опорожнять. Опорожнение его можно осуществлять путем подъема шандор, установленных в пролетах водосброса. Механизмов для захвата и подъема шандор в настоящее время на водосбросе нет. Подъем их может осуществляться с помощью клешевых захватов и тросов, пропущенных через петли на эстакаде водосброса. Для удаления поднятой шандорной балки, низовая стенка швеллера, образующего эстакаду, срезана.

По материалам проекта шандорные балки должны были изготавливаться из сосны, но их конструкций и размеров в проектных материалах нет. Очевидно, что их повторное использование, после реконструкции плотины, невозможно, так

как они работали около 40 лет, постоянно находились в воде, разбухли и при подъеме могут быть серьезно повреждены.

Понижение уровня воды в водоеме при его опорожнении должно быть медленным, не более 0,3...0,5 м в сутки, чтобы избежать больших скоростей потока в нижнем бьефе, размыва берегов и затоплений территории на участке от водоема до р. Свислочь. Постепенное понижение уровня воды в водоеме будет обеспечивать медленное понижение уровня грунтовых вод на окружающей водоем территории, что обеспечит устойчивость берегов и конусов автодорожного моста на ул. Маяковского. Кроме того, постепенная сработка водоема обеспечит в нем небольшие скорости течения, вследствие чего донные отложения водоема не будут размываться и сбрасываться в р. Свислочь, способствуя загрязнению Чижовского водохранилища.

Если после реконструкции отметка нормального подпорного уровня останется прежней, то после очистки ложа водоема отметки поверхности земли на правом берегу необходимо искусственно повысить на 0,5 ... 1 м, так как в настоящее время он заболочен. Понижать отметку уровня воды в водоеме с целью осушения правого берега нецелесообразно, так как при уменьшении глубины воды она будет лучше прогреваться, а водоем будет быстрее зарастать.



**Рисунок 1 – Поперечный разрез водосбросной плотины:**  
*1 – береговые устои; 2- бычок; 3 – тело водосливной плотины с широким порогом; 4 – шандорные балки; 5 – донные отверстия*

Для улучшения качества воды в водоеме, необходимо выполнить мероприятие по очистке сточных вод, поступающих в р. Лошица. Но так как полностью избежать попадания ливневых вод в реку и водоем невозможно, то следует после реконструкции предусмотреть сброс в нижний бьеф не только поверхностных вод (как в настоящее время), но и пропуск воды из придонной части водоема, которая содержит больше наносов и более загрязнена. Кроме того, наличие в водосбросной плотине донных отверстий будет способствовать созданию донных скоростей и, следовательно, пропуску наносов в нижний бьеф, что будет удлинять сроки заиления водоема.

Так как тело водосбросной плотины с широким порогом представляет собой плиту небольшой толщины, то устроить в ней донные отверстия невозможно. В связи с этим предлагается выполнить донные отверстия в шандорах, по следующей схеме (рисунок 1).

В каждом водосливном пролете в одной или двух нижних шандорных балках, которые как и существующие, могут быть выполнены деревянными, вырезаются полуотверстия. Например, при высоте шандорной балки в 20 см и более глубина выреза может составлять 7...8 см, а длина около 1 м. Такие вырезы не ослабят прочность шандорной балки, а будучи составленными вместе они образуют в каждом пролете донное отверстие высотой 14...16 см и длиной 1 м (см. рисунок). Если вырез сделать только в одной нижней балке и установить ее сделанным вырезом на порог плотины образуется донное отверстие высотой 7...8 см и длиной 1 м. Точные размеры донных водосливных отверстий должны быть подобраны таким образом, чтобы их пропускная способность была меньше межженного расхода воды в р. Лошица. В этом случае постоянно часть расхода воды в реке будет переливаться сверху через шандорные балки и в водоеме будет поддерживаться постоянный нормальный подпорный уровень на отметке, близкой к отметке верха шандорных затворов. Нормальный подпорный уровень водоема после очистки и реконструкции целесообразно оставить на той же отметке, при этом наполнение водоема необходимо производить постепенно с повышением уровня воды не более 0,5 м в сутки.

УДК 628.3

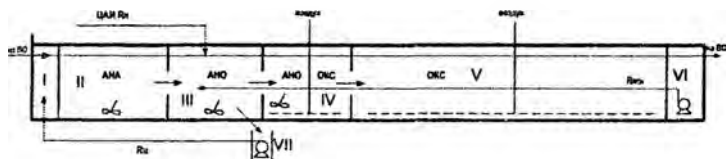
## Усовершенствование работы КОС г. Сестрорецка

Мишуков Б. Г., Соловьева Е. А.

СПБГАСУ, г. Санкт-Петербург, Россия

На очистных станциях г. Санкт-Петербурга и пригородов использованы и функционируют несколько технологических схем удаления азота и фосфора. На Сестрорецких сооружениях применена схема Кейптаунского университета (УКТ) с некоторыми изменениями. Технологическая схема блока биологической очистки (биоблока) Сестрорецкой станции показана на рисунке 1.

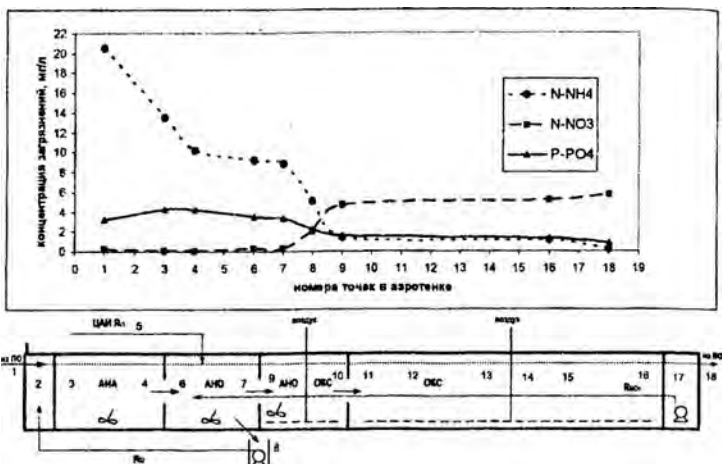
Характерные особенности схемы: двойная перекачка ила – сначала в аноксидный отсек (денитрификатор), а из конца денитрификатора ил перекачивается в камеру перемешивания (деоксидный отсек I) и далее направляется в анаэробный отсек II. Кроме того, имеется маневренный отсек IV, в котором установлены мешалка и аэрационная система, благодаря чему этот отсек может быть как аноксидным, так и оксидным. В конце аэробной зоны V в сборном канале иловой смеси устроен еще один деоксидный отсек VI, где удаляются излишки растворенного кислорода перед возвратом нитратсодержащего потока  $R_{NO_3}$  в аноксидный отсек III. Мешалки в основных отсеках тихоходные («банановые»), а в отсеках I, IV и VII –



**Рис. 1. Технологическая схема биологической очистки Сестрорецкой станции аэрации:**

*ПО – первичные отстойники; АНА – анаэробная часть; АНО – аноксидная часть; ОКС – оксидная часть; ВО – вторичный отстойник; ЦАИ – циркулирующий активный ил;  $R_{I1}$ ;  $R_{I2}$ ;  $R_{NO_3}$  – циркуляция ила и нитратов*





**Рис. 2. Фактический график работы биоблока:**

Точками 1-18 обозначены места отбора проб;  
*N-NH<sub>4</sub>*; *N-NO<sub>3</sub>* – азот аммонийный и нитратный; *P-PO<sub>4</sub>* –  
 фосфор фосфатов

скоростные. Система аэрации включает дисковые аэраторы с резиновой мембраной, регулируемую арматуру и ротационные воздуходувки.

Для общесплавной системы канализации города и пригородов характерно значительное разбавление бытовых стоков поступлением дождевых, талых и инфильтрационных вод. Это обстоятельство затрудняет проведение денитрификации и анаэробной обработки, и для снижения негативного воздействия недостатка органических веществ в схему предварительной подготовки был введен отстойник – сбразиватель (ацидофикатор). Один отстойник работал в обычном режиме, а в другой (сбразиватель) ежедневно перекачивался весь задержанный осадок, в него подавалось 20-30 % расхода поступающего стока. Больше половины объема сбразивателя было занято бродящим осадком, который представлял собой однородную массу без крупных примесей. Развитие процесса брожения оценивали по окислительно-восстановительному потенциалу (ОВП) и потемнению сточных

вод вследствие образования сульфида железа. После использования одного из первичных отстойников как сбраживателя ОВП стал изменяться и достигал более низких значений в анаэробной зоне аэротенка.

Благодаря наличию решеток с тонкими прозорами и аэрируемых песколовков брожение осадка не сопровождалось образованием корки и слоя плотного осадка на дне сбраживателя. Сбраживание осадка положительно отразилось на результатах очистки сточных вод. В анаэробной части блока происходит вытеснение фосфатов, в аноксидной – денитрификация, в оксидной части – потребление фосфора и нитрификация (рис. 2).

Результаты работы очистной станции приведены в табл. 1. Параметры работы: расход сточных вод 14-15000 м<sup>3</sup>/сут, продолжительность обработки в биоблоке 12-13 ч. В настоящее время осваивается раздельное центрифугирование осадка и избыточного ила для сокращения возврата фосфора с фугатом и сливной водой.

Таблица 1

Показатели состава, мг/л	ноябрь 2006 г.		декабрь 2006 г.	
	вход	выход	вход	выход
Концентрация взвешенных веществ	140	4,4	150	9,5
ХПК	320	52	440	49
БПК <sub>5</sub>	120	3,9	130	4,7
Азот общий	23	11	30	11
Азот аммонийный	22	0,32	23	0,3
Азот нитратный	0,11	8,8	0,1	9,2
Фосфор общий	4,0	0,67	3,4	0,54
Фосфор фосфатов	1,8	0,56	1,3	0,21

## Литература

1. Мишуков, Б. Г. Удаление азота и фосфора на очистных сооружениях городской канализации / Б. Г. Мишуков, Е. А. Соловьева // Приложение к журналу «Вода и экология. Проблемы и решения». – СПб.: ЗАО «Водопроект-Гипрокоммунводоканал», 2004. – 72 с.

УДК 532.546

## Анализ закономерностей процессов сушки зерна и модель описания межзернового контактного теплообмена

Акельев В. Д., Байлук Н. Д., Занкевич В. А.

Белорусский национальный технический университет

В большинстве случаев сушка зерна производится конвективным методом с помощью сушильного агента (нагретого газа, воздуха). Совокупность параметров внешнего воздействия на зерно в процессе сушки характеризует режим сушки. Режим сушки зависит от многих параметров, но основными являются: температура сушильного агента ( $t_{c.a.}$ , °C), его влажность ( $\varphi_{c.a.}$ , %), скорость его потока через зерновой слой ( $v_{c.a.}$ , м/с).

Эти параметры влияют не только на длительность сушки, но и на качество высушенного зерна. Поэтому необходимо найти оптимальный режим сушки, чтобы при минимальной длительности процесса и наименьшем расходе теплоты получались наилучшие технологические свойства зерна.

Нахождение полей влагосодержания  $u(x, y, z, \tau)$  и температуры  $t(x, y, z, \tau)$  в зерновом слое связано с решением системы нелинейных дифференциальных уравнений массо- и теплопереноса при соответствующих граничных условиях, отображающих способ и режим сушки [1...3]. Точное решение данных уравнений затруднительно из-за сложности строения зерна. Зерновые культуры относятся к капиллярным коллоидно-пористым телам и процесс тепло- и массопереноса в поверхностном слое, эндосперме и зародыше зерновки различен [2, 3, 5], а уравнения не учитывают эффекты нестационарности и влияния поверхностных явлений [4].

Представляется целесообразным рассматривать весь процесс сушки зерна, происходящий при переменном режиме, как совокупность процессов, происходящих при постоянном режиме, когда температура воздуха, влажность и скорость движения его остаются постоянными в течение каждого этапа всего процесса сушки зерна. Эти этапы можно установить на основании анализа закономерностей переноса влаги и теплоты [1]. Перенос влаги происходит под действием перепада влагосодержания (изо-термическая диффузия), перепада температуры (термическая диффузия) и перепада общего давления (конвективная диффу-

зия). Градиенты влагосодержания и температуры при соответствующем построении режима сушки могут иметь одинаковое направление или противоположное. В первом случае они усиливают движение влаги, а во втором случае один градиент тормозит действие другого [1...3]. Закономерности протекания процесса сушки зерна характеризуются зависимостями  $W_3^c = f(\tau)$ ,  $N = f(W_3^c)$ ,  $t_3 = f(W_3^c)$  ( $W_3^c$  – влажность зерна,  $\tau$  – время,  $N$  – скорость сушки,  $t_3$  – температура зерна).

Экспресс-метод экспериментального определения данных зависимостей разработан авторами.

Анализ закономерностей процесса сушки зерна показывает, что для получения наилучших технологических свойств зерна необходимо определить область допустимых и недопустимых режимов сушки. Эти области определяются для каждого этапа или стадии сушки. В теории сушки влажных материалов определены два периода сушки. Вначале скорость сушки увеличивается до какого-то предела, потом она постоянна на протяжении всего периода. Поэтому этот период называют периодом постоянной скорости сушки. Затем, на протяжении второго периода, скорость сушки снижается. Поэтому его называют периодом убывающей скорости сушки. В течение этих периодов зерно проходит определенные стадии сушки, которые условно можно определить как стадии прогрева, подсушки, досушивания. Таким образом, получаем не один допустимый режим сушки, а несколько режимов – для каждого этапа свой допустимый режим.

К рассмотрению предлагается способ сушки зерна в многозонной сушилке с ведением процесса сушки по этапам.

Соответственно, для каждого этапа определены предельно допустимые параметры состояния зерна, на основании которых рассчитываются предельно допустимые параметры воздуха и определяется режим сушки. Предельно допустимые параметры семенного зерна, например, пшеницы представлены в [2]. Эти параметры указывают на то, что максимальная температура воздуха (сушильного агента) может быть не более 95...100°C (при  $\Delta t = \max$ ).

Разработана модель для характеристики процессов тепло- и влагообмена в период отлежки зерна. В качестве материалов

модели взяты изотропные пористые тела в форме шара диаметром  $d$ , имеющие разную температуру и влажность и находящиеся в контакте друг с другом. В модели рассматривается слой зерна толщиной  $H$ . В модели с учетом хаотического характера зерновой структуры использован подход Куни и Каганера, в котором учитывается влияние числа контактов  $N_k$  на одну частицу. В [6] показано, что распределение флуктуаций  $N_k$  в насыпном слое подчиняется закону Гаусса, а зависимость  $N_k$  от пористости  $\varepsilon$  описывается соотношением

$$N_k = 19 - 28 \cdot \varepsilon. \quad (1)$$

Для определения теплопереноса за счет контактов вводится контактная теплопроводность  $\lambda_k$ , которая зависит от геометрии зерновки, взаимного расположения, числа и площади контактов, пористости (скважистости), модулей упругости, давления на зерновку.

Установлена связь  $\lambda_k$  с эффективной скоростью распространения продольной ультразвуковой волны по зерновкам  $v_e$ .

$$\lambda_k = A \cdot (1 - \varepsilon)^a \cdot p^b \cdot (v_e^2 \cdot \rho_z)^d, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – пористость;

$A, b, c, d$  – постоянные величины;

$p$  – давление на поверхность контакта;

$\rho_z$  – плотность зерновки;

$v_e$  – эффективная скорость распространения продольной ультразвуковой волны по зерновкам.

Определены значения  $\lambda_k$  для гороха ( $d \approx 5$  мм)  $\lambda_k = 0,18$  Вт/(м·К), пшеницы  $\lambda_k = 0,12$  Вт/(м·К).

Приведена оценка вкладов в тепловой поток между зерновками в зерновом слое гороха  $H = 20d$ ,  $\varepsilon = 0,4$  при условии, что зерновки распределены хаотично, половина зерновок имеет температуру  $20^\circ\text{C}$  и влажность  $W_1^c = 10\%$ , вторая –  $70^\circ\text{C}$  и  $W_2^c = 20\%$ . Считаем, что отношение теплопроводности зерновки  $\lambda_z$  и воздуха  $\lambda_a$   $\lambda_z/\lambda_a = 1$ , а отношение температуропроводности  $a_z/a_a = 100$ . Соотношения тепловых потоков через каркас зерновки, воздушную прослойку и за счет теплового излучения равны  $0,41 : 0,5 : 0,09$ . По величинам тепловых потоков можно оценить коэффициенты теплоотдачи от зерновок с температу-

рой  $t_1$  к зерновкам с температурой  $t_2$ . Усредняя потоки определяем установившуюся температуру зернового слоя  $t_c = 42^\circ\text{C}$ .

В модели не рассматривается теплообмен при активном вентилировании, но скорость и время прогрева зернового слоя зависит от скорости и температуры сушильного агента, толщины зернового слоя [1, 2, 5]. Контактный тепло- и массоперенос широко используется в комбинированных технологических процессах сушки зерна [2]. В расчетах процессов в период отлежки следует иметь в виду, что процесс выравнивания по температуре происходит значительно быстрее, чем по влагосодержанию. Это связано с тем, что коэффициент диффузии влаги в зерновых культурах является сложной функцией влагосодержания и температуры. Выбор способа расчета коэффициентов диффузии влаги зависит от толщины зернового слоя [1, 3, 5].

Принятые допущения о поэтапной сушке зерна с постоянным режимом ведения процесса на каждом этапе, анализ закономерностей изменения параметров, характеризующих режим сушки, а также данные предельно допустимой температуры нагрева семенного зерна пшеницы указывают на целесообразности изготовления сушилки в виде модулей, в которых будет обеспечен постоянный режим обработки зерна воздухом, а подогрев его до  $t_{c.a.} = 95\dots 100^\circ\text{C}$  обеспечит экономию топливно-энергетических ресурсов по сравнению с подогревом до  $t_{c.a.} = 600\dots 700^\circ\text{C}$  в устройствах, в которых происходит сгорание натурального топлива.

## Литература

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М., 1968.
2. Жидко, В. И. Зерносушение и зерносушилки / В. И. Жидко, В. А. Резчиков, В. С. Уколов. – М., 1982.
3. Пабис, С. Тепло- и массоперенос / С. Пабис. – т. 6, ч.2. – Киев, 1968.
4. Гринчик, Н. Н. Инженерно-физический журнал / Н. Н. Гринчик [и др.]. – т.76, № 6, 2003.
5. Гинзбург, А. С. Влага в зерне / А. С. Гинзбург. – Мн.: Ураджай, 1975.
6. Аэров, М. Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес, Д. А. Наринский. – М.: Химия, 1979.

**Микроклимат помещений православных храмов**

Борухова Л. В., Тумащик Е. П., Шатилло Е. В.  
Белорусский национальный технический университет

Наступил период возвращения к жизни, реставрации старых и строительства новых церквей и храмов, традиционно являющихся доминантами застройки городов и других населенных пунктов. От проектировщика, занимающегося храмостроительством, требуется овладение многими специальными знаниями как теоретического, в том числе богословского, так и практического, прикладного характера. Специфической особенностью храмостроительного искусства и творчества является необходимость их подчинения каноническим церковным требованиям, основанным на православной догматике и храмостроительной традиции.

Отличительными чертами храмов являются:

- массивные ограждающие конструкции, а следовательно большая тепловая инерция конструкций, которая дает регенеративный эффект, заключающийся в накоплении летнего тепла и выхолаживании в холодный период наружных слоев ограждения;
- неординарная структура внутреннего пространства, вытянутый сверху объем помещения, уменьшение толщины стен барабана главы, при которой происходит неравномерное распределение температуры по высоте помещения храма;
- периодичное пребывание большого количества людей, а следовательно, необходимость применения нескольких режимов работы систем отопления и вентиляции;
- специфические требования к параметрам микроклимата и ограждающим конструкциям в связи с наличием росписи на стенах храмов.

Все это говорит о нестационарности процессов тепло и массообмена в помещении и необходимости использования нестационарных моделей теплового режима здания.

Отсутствие опыта в проектировании столь специфических сооружений, а так же некачественное выполнение строительных работ приводит к возникновению проблем при дальнейшей эксплуатации зданий. В частности примеры таких случаев были

выявлены при обследовании храмов Свято-Елисаветинского монастыря.

При проведении обследований были выполнены следующие работы:

- для определения сопротивления теплопередаче наружных стен, барабанов и куполов храмов были измерены температуры поверхностей ограждающих конструкций и температуры наружного и внутреннего воздуха;

- для более наглядной картины теплопотерь здания, а также определения дефектных областей в конструкциях храма была произведена тепловизионная съемка;

- для оценки тепловлажностного режима храма были измерены относительная влажность и температура внутреннего воздуха в основных помещениях храмов в течение суток при помощи метеорологических термографа и гигрографа;

- для анализа работы системы вентиляции были произведены замеры скоростей воздуха анемометром на входе в вытяжные каналы и на выходе из вытяжных шахт;

- визуальный осмотр технического состояния ограждающих конструкций с целью выявления дефектов и анализ причин их появления.

На основании проведенных обследований были сделаны следующие выводы:

- температура внутреннего воздуха в помещениях храмов составляет 16...18°C, что соответствует нормативным требованиям [1];

- в основных помещениях храма относительная влажность воздуха составляет 60...70%, что превышает допустимую [1];

- сопротивление теплопередаче наружных ограждений храма, особенно конструкций барабана и купола не соответствует нормативным требованиям [4], что в дальнейшем при наличии повышенной относительной влажности приводит к выпадению конденсата на внутренних поверхностях наружных ограждающих конструкций. Об этом также свидетельствуют существующие дефекты храмов, такие как шелушение внутреннего отделочного покрытия барабана, купола, стен и откосов;

- в большинстве случаев работа системы вентиляции не обеспечивает требуемый воздухообмен и равномерное провет-



ривание помещений, а в некоторых помещениях организованная вентиляция не предусмотрена;

- выполнение строительных работ не соответствует нормативным требованиям (при строительстве храма в д. Лысая Гора Минского района Свято-Елисаветинского монастыря утеплитель, заложенный в конструкцию стен, не был изолирован от воздействия окружающей среды, что приведет к насыщению его влагой и потере теплозащитных свойств);

- неправильная организация системы наружного водоотвода здания послужила причиной намокания наружных стен храмов, что приводит к снижению теплозащитных характеристик наружных ограждающих конструкций.

Проведенное обследование показало, что в существующих реконструированных и построенных храмах не обеспечиваются требуемые теплозащитные характеристики наружных ограждений. В комплексе с неверно организованной работой системы вентиляции это не позволяет обеспечивать нормируемые параметры микроклимата, что в свою очередь приводит к преждевременному разрушению конструкций храмов, внутренней отделки и настенных росписей.

### **Литература**

1. СП 31-103-99. Здания, сооружения и комплексы православных храмов. – М.: Госстрой, 2000 – 42 с.
2. АВОК СТАНДАРТ-2-2004. Храмы православные. Отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха. – М.: НП АВОК, 2004 – 14 с.
3. СНБ 4.02.01-03. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – Минск.: МАиС, 2003 – 82 с.
4. СНБ 2.04.01-97. Строительная теплотехника. – Минск.: МАиС, 1997. – 39 с.
5. Бодров, В. И. Создание микроклимата уникальных сооружений / В. И. Бодров, П. Т. Крамаренко, А. Г. Кочев. // XXVII науч.-техн. конф. «Научно технический прогресс в строительстве»: тез. докл. – Пенза, 1993. – С. 10-11.

УДК 697.1.

**Влажностный режим стен панельных зданий после выполнения дополнительной наружной теплоизоляции**

Протасевич А. М., Лешкевич В. В.

Белорусский национальный технический университет

В связи с повышенными требованиями к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций повсеместно выполняется утепление наружных стен с помощью эффективных утеплителей, таких как пенополистирол и каменная вата. Производится утепление, как эксплуатируемых зданий, так и вновь возводимых.

В подавляющем большинстве случаев теплоизоляция зданий массовых серий выполняется с помощью устройства мокрых штукатурных систем (легких и тяжелых).

Между тем, на данный момент до конца не выяснено поведение данных систем утепления в процессе эксплуатации под воздействием тепло-влажностных факторов и атмосферных воздействий.

Тепловлажностный режим наружных стен с дополнительной теплоизоляцией из пенополистирола и каменной ваты имеет значительные отличия, обусловленные, прежде всего, различными теплотехническими характеристиками. Процессы переноса теплоты и массы формируют характер распределения влаги особенно в первые годы эксплуатации фасадных систем.

На данный момент отсутствуют целенаправленные исследования влияния легких систем наружной теплоизоляции на влажностный режим стен зданий. В первую очередь это касается эксплуатируемых зданий с наружными панельными стенами.

В качестве примера на рисунке 1 приведены распределения массовой влажности по толщине трехслойных железобетонных панелей с дополнительной наружной теплоизоляцией плитами из каменной ваты и пенополистирола. Исследования проводились на жилых зданиях с нормальным влажностным режимом. Массовая влажность материалов определялась путем отбора проб с последующим их взвешиванием и сушкой. Отбор проб производился в конце зимы. Срок эксплуатации систем наружного утепления 7...8 лет.

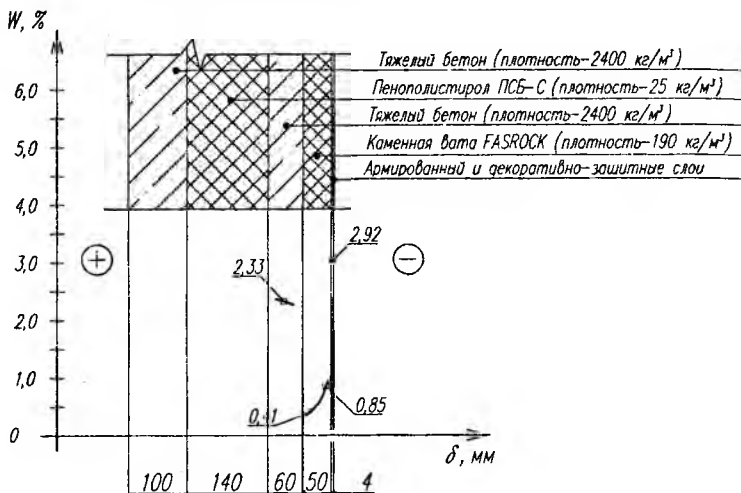
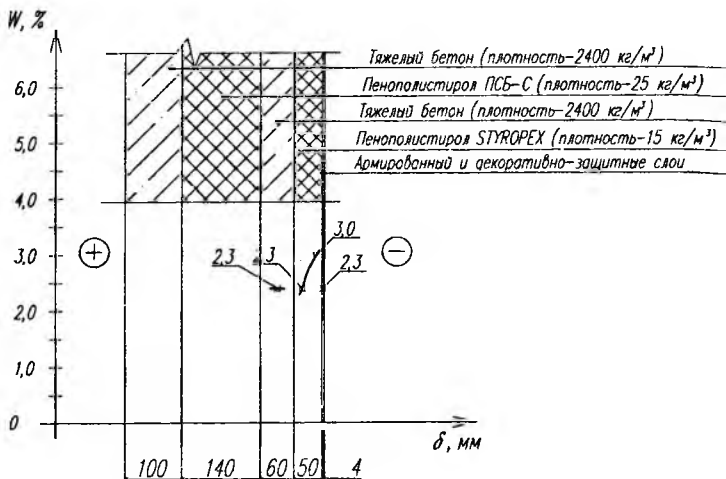


Рисунок 1 - Распределения массовой влажности по толщине трехслойных железобетонных панелей с дополнительной наружной теплоизоляцией

Влажность каменной ваты и пенополистирола в легкой штукатурной системе за срок эксплуатации не превышает расчетных массовых соотношений по требованиям СНБ 2.04.01-97 «Строительная теплотехника». Однако характер распределения массовой влажности при использовании различных утеплителей отличается.

У легкой штукатурной системы с пенополистирольным утеплителем массовая влажность пенополистирола вблизи поверхности панели близка к массовой влажности тяжелого бетона панели, в тоже время наблюдается повышение влажности вблизи укрывного штукатурного слоя.

При использовании в качестве утеплителя плит из каменной ваты, картина распределения массовой влажности несколько иная. Влажность минераловатного утеплителя по абсолютному значению ниже массовой влажности окружающих ее слоев. Вблизи наружного укрывного слоя в обоих случаях наблюдается повышение влажности утеплителя.

Результаты выполненных исследований показывают, что влажностное состояние утеплителя в легких штукатурных системах зависит от типа утепляемой конструкции (подосновы) и ее начальной влажности. Так, при низком сопротивлении паропроонианию утепляемой стены может происходить конденсация водяного пара и образование льда на стыке теплоизоляции и укрывного штукатурного слоя. Подобная ситуация может наблюдаться также при высокой начальной влажности утепляемой стены.

Высокая влажность укрывного слоя теплоизоляции создает условия для возникновения напряжений и возникновения микротрещин.

Анализ проведенных исследований показывает достаточно сложную картину формирования влажностного режима наружных стен зданий со штукатурными системами. Перемещение и накопление влаги создает условия для возникновения напряжений и деформация в защитных слоях и в местах контакта их с тепловой изоляцией. Поэтому должен быть дифференцированный подход в проектировании наружного утепления зданий и разработке технологий проведения строительных работ в зависимости от типа здания, места его возведения, вида и свойств теплоизоляции.

УДК 697.1.003.1

**Аэродинамические особенности систем вентиляции  
жилых зданий с «теплыми» чердаками**

Протасевич АМ, Якимович ДД, Короткий ВН, Черванева ЕА  
Белорусский национальный технический университет

С целью выяснения причин неудовлетворительной работы систем естественной вентиляции зданий с теплыми чердаками и определения пути их нормализации выполняется комплекс исследований по изучению аэродинамических особенностей системы вентиляции зданий с «теплыми» чердаками. Программа включает выполнение:

- предварительных натурных исследований на зданиях с нарушениями вентиляции квартир;
- аэродинамических исследований на моделях вытяжных шахт с различными оголовками;
- сравнительных натурных исследований систем вытяжной вентиляции с шахтой в стандартном исполнении и с шахтой, оборудованной дефлектором.

При проведении предварительных исследований истечения воздуха из оголовков стояков вентсистем и распределения его в объеме чердака были выполнены измерения расходов и скорости воздуха в каналах двух верхних этажей и в сборном канале. Анализ результатов показывает, что в эксплуатационных условиях, т.е. при открытых каналах, наблюдается разброс скоростей истечения из них воздуха. В отдельных каналах двух верхних этажей периодически происходит опрокидывание циркуляции или прекращение движения потоков. При частичном перекрытии магистральных каналов и уменьшении их сечения, движение потоков через каналы-спутники нормализуется, увеличивается скорость воздуха, отсутствует опрокидывание циркуляции. Полученная закономерность реагирования воздушных потоков друг на друга указывает на необходимость проведения детальных исследований условий повышения производительности и располагаемого напора вытяжной шахты секции и ее влияния на работоспособность всей системы вентиляции.

Аэродинамические исследования по повышению напора вытяжной шахты проводились в аэродинамической трубе. Объектом исследований являлись модели покрытия «теплого» чердака

здания с вентиляционной шахтой и помещением машинного отделения лифта. На стенде были проведены аэродинамические испытания моделей оголовков с дефлекторами и без них различных форм. Аэродинамические исследования на моделях показали возможность повышения располагаемого давления и предотвращения задувания наружного воздуха внутрь «теплого» чердака и в системы вытяжной вентиляции верхних этажей при оборудовании шахт дефлекторами.

Экспериментальная проверка результатов аэродинамических стендовых исследований выполнена на жилом доме серии 464 У1. На двух секциях дома были одновременно проведены испытания вытяжных вентиляционных шахт. При этом вытяжная шахта секции «Б» проектная. А на шахте секции «А» смонтирован дефлектор. За основу конструкторской разработки дефлектора выбрана модель, продувка которой показала наиболее приемлемые аэродинамические характеристики для существующего проектного оголовка шахты. Данная конструкция представляет прямоугольный дефлектор с размерами, позволяющими смонтировать его на существующих вытяжных вентиляционных шахтах.

Сравнительные измерения скоростей движения воздуха в шахтах, сборных магистральных каналах и каналах-спутниках вентиляционных стояков секций «А» и «Б» выполнены одновременно при температуре наружного воздуха  $t_n = 2^\circ\text{C}$  и скорости ветра  $v = 4$  м/с. Результаты натурных испытаний вентшахты с дефлектором и расчеты показали его более высокую производительность по объему удаляемого воздуха по сравнению с вентшахтой с жалюзийными решетками. Объем воздуха, удаляемого оснащенной дефлектором шахтой секции «А» на 40% превышает производительность проектной вытяжной шахты с жалюзийными решетками секции «Б». Средний объем воздухоудаления шахтами в пересчете на одну квартиру десятиэтажной секции жилого дома составляет: для шахты с дефлектором –  $170 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; для проектной шахты с жалюзийными решетками –  $121 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Анализ результатов натурных исследований выявил также изменение характера воздушных потоков в объеме чердака в зависимости от конструкции вытяжной шахты.

Проведенные экспериментальные стендовые и натурные исследования «теплых» чердаков показали, что улучшение работы каналов вытяжных систем квартир верхних этажей может быть обеспечено выбором рациональной конструкции вытяжной шахты. Дефлектирующие свойства оголовка вентшахты при ветровом воздействии позволяют увеличить располагаемое давление системы удаления воздуха, обеспечив работоспособность естественной вентиляции квартир зданий.

Заключение.

1. В жилых зданиях с «теплыми» чердаками воздухоудаление из квартир, в том числе и верхних этажей, может быть обеспечено системами естественной вентиляции.
2. Повышение располагаемого давления вытяжных систем осуществимо выбором конструкции оголовка шахты, позволяющей использовать его конструктивные свойства при ветровом воздействии.
3. Условием работоспособности естественной вентиляции является обязательное выполнение требований по герметичности «теплых» чердаков, как камер статического давления, и по обеспечению притока воздуха в квартиры.
4. Обеспечение притока воздуха в квартиры верхних этажей приведет к нормализации воздухообмена в этих квартирах, а применение дефлекторов предотвратит задувание наружного воздуха в объем чердака и опрокидывание движения его в системах естественной вытяжной вентиляции.
5. При проектировании систем вентиляции недостаточно внимания уделяется разделу аэродинамики и расчетам движения воздушных потоков в помещениях зданий, в объемах «теплых» чердаков и т.д. Решением данной проблемы является определение условий организации воздухообмена более сложным, но достаточно эффективным путем исследований моделей зданий и их частей в аэродинамических трубах.
6. Для строящихся зданий серии 464 У1 разработана принципиальная схема дефлектора, обладающего небольшим аэродинамическим сопротивлением и более высоким коэффициентом использования динамического давления ветрового потока по сравнению с проектным оголовком вентшахты.

УДК 621.311.22

## Определение удельных расходов топлива на ТЭС, использующих детандергенераторные установки

Копко В. М., Качан С. А., Руммо В. Н.

Белорусский национальный технический университет

В настоящее время на электростанциях, сжигающих природный газ, внедряются детандергенераторные установки (ДГУ), использующие потенциальную энергию избыточного давления топливного газа для выработки электроэнергии.

Подогрев расширяемого в детандере газа осуществляется паром из отборов паровых турбин с выработкой ими дополнительной теплофикационной мощности. Таким образом, ДГУ включаются в тепловую схему станции и снижают потери теплоты в цикле паросиловых установок.

Эффект от получаемой дополнительной теплофикационной мощности можно отнести либо на работу паротурбинных установок, либо на работу ДГУ.

При первом способе расчетов на отпуск электроэнергии от ДГУ относится теплота  $Q_{ДГУ}$ , физически отпущенная из отборов паровых турбин. При этом удельный расход топлива (УРТ) на отпуск электроэнергии от ДГУ составит

$$b_{ДГУ1} = \frac{3600}{N_{ДГУ}^{нет}} \frac{Q_{ДГУ}}{Q_{ну}^p \eta_k \eta_{тп}}, \quad (1)$$

а УРТ на отпуск электроэнергии паротурбинным блоком снизится против его работы с отключенным ДГУ и найдется как

$$b_{бл1} = \frac{3600}{(N_3^{бр} - \Delta N_3)(1 - \varepsilon_{сн})} \frac{Q_0 - Q_{ДГУ}}{Q_{ну}^p \eta_k \eta_{тп}}, \quad (2)$$

где  $N_{ДГУ}^{нет}$  – мощность ДГУ нетто;

$N_3^{бр}$  – электрическая мощность паровой турбины брутто при отсутствии в тепловой схеме ДГУ;

$\Delta N_3$  – снижение мощности паровой турбины вследствие отбора пара на ДГУ;

$\varepsilon_{сн}$  – относительный расход электроэнергии на собственные нужды блока;



$Q_0$  – расход теплоты в свежем паре на турбину;  
 $Q_{\text{нп}}^p$  – низшая теплотворная способность условного топлива;  
 $\eta_k$  – КПД котлоагрегата;  
 $\eta_{\text{тп}}$  – КПД транспорта теплоты;  
 3600 – коэффициент перевода единицы мощности в единицу выработки электроэнергии.

При **втором способе** расчетов на отпуск электроэнергии от ДГУ относится теплота, отпущенная из отборов паровых турбин с учетом ее энергоценности [1].

При этом УРТ на отпуск электроэнергии паротурбинным энергоблоком останется неизменным, а на отпуск электроэнергии детандергенераторной установкой – существенно снизится.

Удельные расходы условного топлива на выработку электроэнергии блоком и ДГУ соответственно равны:

$$b_{\text{бл2}} = \frac{3600}{(N_3^{\text{бп}} - \Delta N_3)(1 - \varepsilon_{\text{от}})} \frac{Q_0 - \Delta Q_0}{Q_{\text{нп}}^p \eta_k \eta_{\text{тп}}}; \quad (3)$$

$$b_{\text{дгу2}} = \frac{3600}{N_{\text{дгу}}^{\text{нет}}} \frac{\Delta Q_0}{Q_{\text{нп}}^p \eta_k \eta_{\text{тп}}}, \quad (4)$$

где  $\Delta Q_0$  – изменение расхода теплоты в свежем паре, соответствующее изменению мощности  $\Delta N_3$ .

С учетом того, что коэффициент ценности теплоты отбора [1] равен

$$\xi = \Delta Q_0 / Q_{\text{дгу}}, \quad (5)$$

получаем

$$b_{\text{дгу2}} = \xi \cdot b_{\text{дгу1}}. \quad (6)$$

Если принять, что энтальпия газа после расширения в детандере равна энтальпии на входе в ДГУ (перед теплообменниками подогрева газа), то ориентировочно получим

$$b_{\text{дгу1}} = 140 \dots 160 \text{ г у.т./}(кВт \cdot ч);$$

$$b_{\text{дгу2}} = 60 \dots 75 \text{ г у.т./}(кВт \cdot ч).$$

Как видно, при **первом способе** расчетов удельный расход топлива на ДГУ находится на таком уровне, как если бы для

подогрева газа использовалась теплота не отработавшего в турбине пара, а непосредственно сжигаемого в котлоагрегате топлива.

При втором способе расчетов удельный расход топлива на отпуск электроэнергии от ДГУ снижается примерно в два раза против величины, полученной при первом способе, и становится ниже топливного эквивалента киловатт-часа, равного 123 г у.т./кВт·ч).

При этом значение среднего по блоку и детандергенераторной установке удельного расхода топлива, а также суммарный эффект от эксплуатации ДГУ на ТЭС не зависят от принятого способа расчетов.

Аналогичные результаты можно получить при использовании нормативной энергетической характеристики паротурбинного оборудования [2].

Отнесение эффекта от дополнительной теплофикационной выработки на работу энергоблока упрощает расчеты и делает их более наглядными. Однако учет этого эффекта при оценке эффективности работы детандергенераторных установок позволяет более точно рассчитывать реальный срок их окупаемости и выявлять преимущества использования ДГУ на ТЭС, где имеются источники низкопотенциальной теплоты сетевой воды или отработавшего пара.

Выбор наиболее предпочтительного способа расчетов определяется их целевым назначением: внутростанционное определение показателей или системная и государственная отчетность. При этом, естественно, для системной и государственной отчетности должна быть принята единая для всех ТЭС энергосистемы методика.

### **Литература**

1. Рубинштейн, Я. М. Исследование реальных тепловых схем ТЭС и АЭ / Я. М. Рубинштейн, М. И. Щепетильников. – М: Энергоиздат, 1982. – 272 с.
2. Яковлев, Б. В. Показатели детандергенераторных установок, используемых на ТЭС / Б. В. Яковлев, С. А. Качан, А. А. Базыленко // Энергия и менеджмент. – 2007. – № 1. – с. 24 – 26.

**Процессы естественной конвекции  
в отапливаемых помещениях**

Захаревич А. Э.

Белорусский национальный технический университет

Изучение процессов переноса в системе: отопительные приборы, ограждения, человек и окружающие его предметы, средства производства и т.п. является необходимым условием решения следующих актуальных проблем: обеспечения требуемых санитарно-гигиенических и (или) технологических параметров микроклимата; сохранности сооружений, материальных и культурных ценностей.

Применяемые в настоящее время нормативные методики теплотехнических расчетов и проектирования систем отопления позволяют решать инженерные задачи с использованием средних значений расчетных величин и не позволяют получить численное значение локальных и мгновенных параметров микроклимата.

При работе систем отопления в формировании параметров микроклимата помещения значительную роль играет естественная конвекция. Формируемые в процессе естественной конвекции (ЕК) температурное и скоростное поля воздушной среды можно найти при решении системы дифференциальных уравнений, состоящей из уравнения движения (Навье-Стокса), уравнения неразрывности и уравнений переноса [1,2].

Относительно малые перепады температур, которые обычно имеют место в объемах отапливаемых помещений, позволяют при решении оговоренной выше системы дифференциальных уравнений принять допущение Буссинеска – Обербека [1,2].

Система уравнений ЕК весьма сложна даже для численного решения и анализа, аналитическое решение ее пока невозможно. В настоящее время (за исключением весьма упрощенных случаев) решение трехмерных задач получить не удастся, в том числе и ввиду особых требований к вычислительной технике. По этой причине в исследовательской работе ограничиваются решением двухмерных задач. Этот подход принят и нами при решении поставленных задач.

При решении плоских задач удается значительно упростить вычислительный процесс путем перехода к системе уравнений с применением в виде аргументов функции тока  $\psi$  и завихренности  $\omega$  [1,2]. Решение уравнений ЕК конкретизируется начальными и граничными условиями для температуры и скорости, на основании которых выводятся соответствующие соотношения для функции тока и завихренности.

В нашем исследовании для решения задач ЕК принят метод конечных разностей (МКР). Область непрерывного изменения аргументов в МКР заменяется сеткой, в узловых точках которой и определяются значения искомой функции. Функции и производные в каждом узле аппроксимируются некоторыми линейными комбинациями значений соответствующих параметров, входящих в уравнения и краевые условия [1].

На рис. 1-4 представлены результаты двух вариантов расчета, осуществленных по программе, разработанной автором под руководством д.т.н. Дячека П.И. Алгоритм построен на основе консервативной монотонной аппроксимации дифференциальных операторов для стационарной двумерной задачи ЕК. Уравнения, представленные с помощью  $\psi - \omega$  аргументов, относятся к уравнениям эллиптического типа и решаются итерационным методом Зейделя с применением параметров релаксации. В приводимых ниже результатах расчета температурного поля задавались граничные условия первого рода, при определении поля скоростей на границе области использовано условие прилипания.

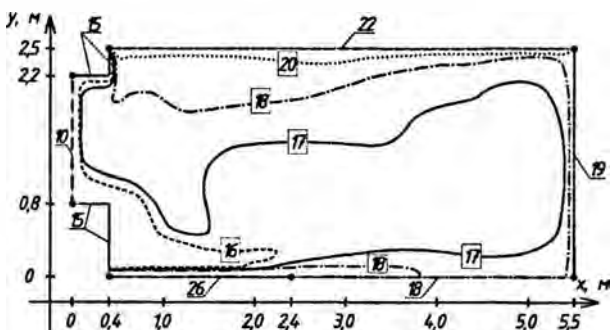


Рис. 1. Температурное поле, вариант расчета №1

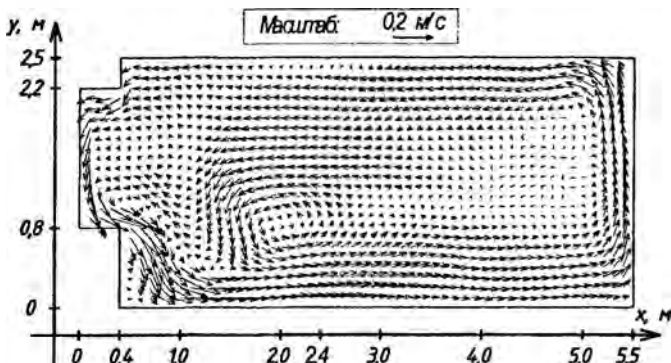


Рис. 2. Поле векторов скорости, вариант расчета №1

Расчеты выполнены на равномерной сетке с шагом 0,1 м. Расчетная область размером и формой представляет вертикальный разрез помещения по окну. Путем задания двух вариантов граничных условий для температуры моделируются различные виды отопительных приборов. Вариант №1 – «теплый пол» шириной 2 м в приоконной зоне с  $t = 26^{\circ}\text{C}$  (рис. 1). Вариант №2 – отопительная панель под окном с  $t = 50^{\circ}\text{C}$  (рис. 3). Температуры остальных поверхностей представлены на рисунках. На рис.1 и 2 видно, что при напольном отоплении холодные потоки воздуха, образующиеся на поверхности окна с  $t = 10^{\circ}\text{C}$ , опускаются вниз и настилаются на поверхность пола. Формируется зона дискомфорта, особенно нежелательная при нахождении в помещении детей. В то же время повышать температуру напольной системы отопления выше  $26^{\circ}\text{C}$  не допускается по санитарно-гигиеническим требованиям. Анализ результатов второго варианта расчета (рис. 3 и 4) показывает, что воздух, нагретый отопительной панелью под окном, поднимается вверх и преграждает путь более холодным ниспадающим потокам воздуха от окна, которые локализуются в нише. Таким образом, более комфортные для человека тепловые условия создаются при использовании второго варианта системы отопления.

В настоящее время разрабатывается модель ЕК в отапливаемом помещении, в которой будут учтены процессы теплопередачи в ограждающих конструкциях с различным конструктивным решением, перенос теплоты в пограничном слое, формируемом на внутренней поверхности ограждений, реальный ха-

рактический характер изменения параметров наружного воздуха, лучистый и конвективный теплообмен между поверхностями в помещении и отопительными приборами.

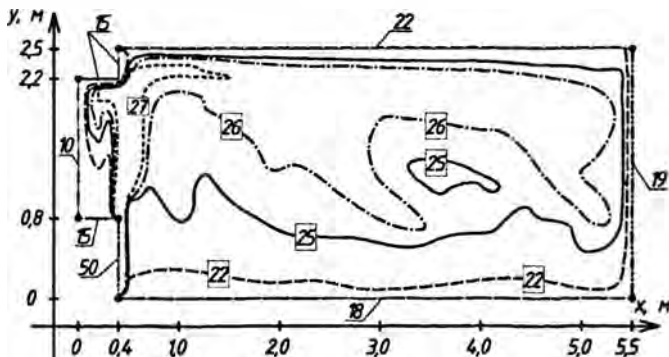


Рис. 3. Температурное поле, вариант расчета №2

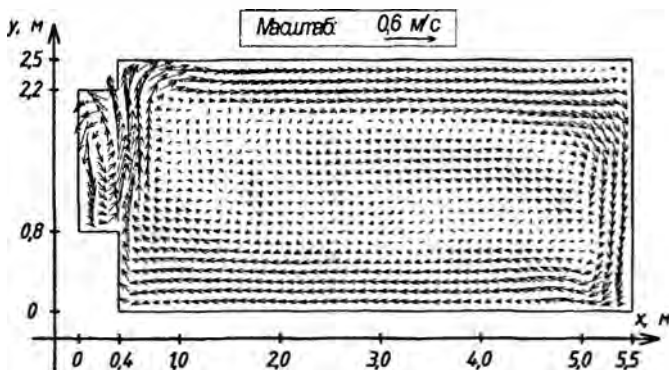


Рис. 4. Поле векторов скорости, вариант расчета №2

Вывод. Расчеты показывают, что тип отопительного прибора оказывает значительное влияние на распределение параметров микроклимата и уровень теплового комфорта в помещении.

#### Литература

1. Берковский, Б. М. Вычислительный эксперимент в конвекции / Б. М. Берковский, В. К. Полевиков. – Мн.: Университетское, 1988. – 167 с.
2. Цаплин, А. И. Численное решение задач конвективного теплообмена: учеб. пособие / А. И. Цаплин. – Пермь: ППИ, 1985. – 84 с.

УДК 621.039(063)

## Проблемы развития атомной энергетики в Беларуси

Пшоник М. Г.

Белорусский национальный технический университет

В подавляющем большинстве развитых и развивающихся стран давно пришло понимание того, что реальной альтернативы атомной энергетике нет.

Вопрос о развитии в Беларуси атомной энергетики не является новым. Еще в соответствии с Энергетической программой СССР, принятой в 1983 г., предполагалась переориентация республики на атомную энергетику.

По сути дела Беларусь с самого начала была "атомной республикой". Ведь в непосредственной близости от границ с нами было построено 12 атомных энергоблоков, суммарная мощность которых в 1,7 раза превышала мощность белорусских электростанций. Это реакторы Смоленской, Ровенской, Игналинской и Чернобыльской АЭС.

Авария на Чернобыльской АЭС привела к закрытию программы развития атомной энергетики. Поскольку строительства электростанций на органическом топливе в это время не велось, то к 1991 году дефицит установленной электрической мощности в республике составлял 40%, а электроэнергетики – около 20%.

С 1975 по 1990 год удельное потребление электроэнергии на душу населения в Беларуси возросло на 2,4 мегаватт/часа. Удельная же мощность электростанций за этот период в нашей стране возросла на 0,1 кВт в расчете на каждого жителя, что в 5 раз меньше, чем в СССР и в 6 раз меньше, чем в США. В итоге образовались "ножницы", с которыми столкнулась Беларусь: обретая независимость, она получила в наследство от Советского Союза энергоемкую экономику, практически не имея собственных топливно-энергетических ресурсов. В 1991г. их доля составляла всего около 8 % общего энергопотребления.

В конце 90-х гг. в республике наметился рост производства. По анализу специалистов потребление электроэнергии к 2015г. составит около 45 млрд. кВт·ч, в тепловой энергии – около 80 млн.Гкал. В соответствии с прогнозом установленная мощность всех энергоисточников должна составить 8,6...9,4 млн.кВт.

В последние годы потребность республики в электроэнергии на 70...80% удовлетворяется за счет выработки на собственных электростанциях (в основном на импортном газе) и на 20...30% - за счет импорта энергии из России (Смоленская АЭС) и Литвы (Игналинская АЭС). Но вследствие вывода из эксплуатации этих АЭС к 2015 г. импорт электроэнергии не будет превышать 5 млрд. кВт·ч в год, следовательно, около 40 млрд. кВт·ч необходимо будет покрывать за счет собственного производства.

Общей характеристикой для большинства электростанций является повышенный и постоянно нарастающий износ основного оборудования. К настоящему времени оборудование электростанций имеет износ свыше 60%, мощность оборудования, *полностью* выработавшего парковый ресурс, составляет 600 МВт. Производственный потенциал Белорусской энергосистемы (на 01.2005г.) был представлен 27 электростанциями, при этом установленная мощность всех энергоисточников в республике - примерно 7,8 млн. кВт.

Изношенность энергетического оборудования такова, что из этого количества к 2015 г. в работоспособном состоянии без реконструкции останется только около 3,8 млн. кВт.

Таким образом, хотя в настоящее время суммарная установленная мощность энергоисточников достаточна для полного самообеспечения республики электроэнергией, однако во многих случаях эксплуатация устаревшего оборудования становится невыгодной в сравнении с импортом электроэнергии из соседних государств, так как себестоимость производства выше стоимости импортируемой электроэнергии.

В настоящее время в топливно-энергетическом балансе республики доминирующим является природный газ. Доля использования газа в топливном балансе энергосистемы достигла уровня 95 % и 79 % в балансе котельно-печного топлива страны.

Газ, несмотря на несомненные преимущества перед другими видами топлива, обладает существенным недостатком с точки зрения энергетической безопасности – невозможно обеспечить значительные запасы в местах его потребления. При наличии одного поставщика газа и импорте энергоресурсов в размере 85 % от общей потребности их, использование газа в таких масштабах приводит к снижению энергетической безопасности страны.



Следует учитывать, что цены на импортируемый газ из России, основного поставщика, в перспективе возрастут. К 2015 г. ожидается почти четырёхкратное увеличение внутренней оптовой цены на природный газ в России по сравнению с 2005 г.

По исследованиям института социологии НАН РБ, стратегическая модель развития энергетики страны должна базироваться на 7 основных критериях. Три четверти (74,5 %) опрошенных выделили в качестве ведущего критерия экологическую безопасность, т. е. сохранение условий проживания населения на данной территории, а 38 % опрошенных на второе место поставили энергетическую безопасность страны.

Понятно, почему для жителей Беларуси особенно значимы эти критерии. Во-первых, на примере Чернобыля мы на собственном опыте убедились, что авария на атомной электростанции может произойти по чьей-то небрежности. С 1971 по 1984 гг. на АЭС мира произошла 151 серьезная авария, при которой случился "значительный выброс радиоактивных материалов с опасным воздействием на людей". С тех пор года не проходило, чтобы в той или иной стране мира не происходило серьезной аварии на АЭС, а иногда — и по нескольку аварий. Во-вторых, реальной опасностью являются радиоактивные отходы атомных электростанций, и т.д., и т.п.

Но атомная энергетика имеет и немаловажные достоинства. Американские специалисты подсчитали: если бы к началу 90-х годов в СССР все атомные электростанции заменили на угольные той же мощности, то загрязнение воздуха стало невероятно велико. Это привело бы к 50-кратному увеличению преждевременных смертей в XXI в., даже в сравнении с самыми пессимистичными прогнозами последствий чернобыльской катастрофы. А такие проблемы современного индустриального общества, как обеспечение сохранности природы, чистоты воды, воздушного бассейна ("парниковый эффект", глобальное потепление, "кислые" дожди, отравление рек...).

#### **Выводы:**

1. Потребности Республики Беларусь в электрической и тепловой энергии на период до 2020 года могут быть обеспечены за счет:

- реконструкции имеющихся мощностей и строительства новых установок на органическом топливе;

- использования имеющегося потенциала энергосбережения;
- вовлечения в энергобаланс местных и возобновляемых источников энергии;

- ввода энергоисточников на ядерном топливе.

2. Целесообразность развития в республике атомной энергетики обусловлена следующими факторами:

- низкой обеспеченностью собственными топливными ресурсами;

- необходимостью диверсификации видов энергоносителей и частичного замещения импортируемых природного газа и мазута;

- возможностью создания долговременных запасов ядерного топлива и снижением зависимости от необходимости непрерывных поставок импортируемого природного газа;

- ядерное топливо дешевле органического в несколько раз (16 долл.США за 1 т у.т.), не является монополией страны-поставщика и может быть закуплено в разных странах;

- имеется возможность закупать ядерное топливо на 10 и более лет вперед;

- введение в энергобаланс ядерного энергоисточника приведет к снижению себестоимости производимой электроэнергии по сравнению с другими вариантами за счет уменьшения затрат на топливо;

- работа атомных станций в значительно меньшей мере зависит от непрерывности поставок и колебаний цен на топливо, чем станций на органическом топливе;

- экологическая чистота.

3. Оптимальным вариантом развития энергосистемы РБ является ввод альтернативных энергоисточников на ядерном топливе, с достижением к 2020 году мощности АЭС в 2 млн.кВт. При этом повышается энергетическая безопасность Республики Беларусь за счет существенного снижения зависимости от внешних поставок первичных энергоресурсов и диверсификации энергоносителей.

5. Беларусь столкнется с отсутствием квалифицированных кадров в области атомной энергетики (прежние специалисты в пенсионном возрасте) и отсутствием баз их подготовки.

6. Необходимо создать при БНТУ кафедру по подготовке специалистов в области использования атомной энергии.

# Энергоэффективные технологии

УДК 629.735

Энергосбережение в системах производства сжатого воздуха

Ганжин А. А., Ковалёв М. В.

Белорусский национальный технический университет

На предприятиях машиностроения на производство сжатого воздуха расходуется до 20% всей потребляемой электроэнергии, до 10% всех затрат на энергетические ресурсы. Стоимость топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) постоянно растет, опережая рост других затрат. Ежегодно увеличивается внимание к проблемам экономии ТЭР, повышается уровень требования к вопросам эффективности их использования. Основа энергосбережения – внедрение новых технологических процессов, пересмотр действующих норм, максимум использования вторичных энергоресурсов (ВЭР). Малозатратные мероприятия по экономии ТЭР практически все реализованы. Необходим переход к новым технологиям, требующим значительных капитальных вложений, существенного пересмотра действующих схем и решений. Система производства сжатого воздуха обладает значительными резервами экономии за счет использования таких ВЭР, как теплота систем охлаждения, на основе использования новой технологии – теплонасосных установок (ТНУ), что позволяет повысить потенциал теплоты и использовать ее в системах теплоснабжения предприятий (системах горячего водоснабжения).

Основным препятствием к внедрению ТНУ до настоящего времени являлась их высокая стоимость и низкие цены на теплоту, что приводило к низкой итоговой эффективности (большой срок окупаемости). В последнее время постоянно растет стоимость теплоты, снижается стоимость ТНУ, срок окупаемости вскоре может составить 5-6 лет, что уже реально позволит получать кредиты для использования ТНУ.

Сжатый воздух давлением 6-10 атм широко используется в технологии практически во всех цехах и службах: в системе воздушного транспорта, в системах автоматики, для привода

ряда механизмов, воздушных ковочных и прессовых машин, простых системах обдувки, системах окраски (распыления), в ряде насосов и др. Воздух сжимается в компрессорах (с электродвигателями для привода), в отдельных станциях или отдельными агрегатами непосредственно в цехах. Затраты электроэнергии составляют до 0,1 кВтч/м<sup>3</sup>. Большинство потребителей требует высокого качества воздуха – удаления влаги до уровня 3-5 г/м<sup>3</sup> (учитывая работу систем автоматики, требования к качеству окраски и др.).

Нормами производства предусмотрена обязательная установка систем удаления влаги на выходе из компрессорной станции. При сжатии воздух в компрессоре нагревается до 150°С и вся влага (с внешним воздухом) испаряется. Для конденсации паров воздух необходимо охладить до уровня 40°С. Охлаждение, конденсация и удаление влаги осуществляется обязательно системами принудительного охлаждения за счет циркуляции воды систем оборотного (или прямого охлаждения).

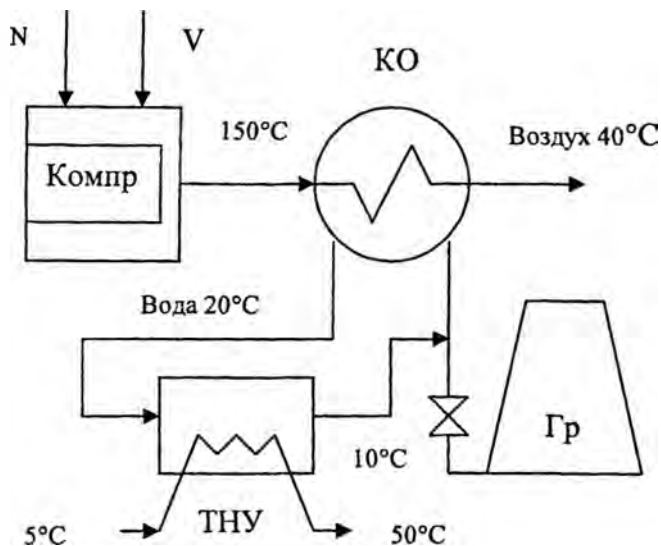


Рис.1 Схема использования ТНУ

Работает достаточно сложная система охлаждения при которой в атмосферу (в градирне) выбрасывается теплота, отнимаемая от сжатого воздуха – до 30% всей энергии на сжатие. До настоящего времени нет проектных решений по снижению затрат в производстве сжатого воздуха. Решение возможно на основе использования ТНУ – путем пропуска подогретой до 20°C оборотной воды после охладителя через испаритель ТНУ и охлаждения ее до 8-10°C. Фактически ТНУ заменяет градирню, вся теплота охлаждения утилизируется и в конденсаторе ТНУ повышается до уровня 50-60°C, что позволяет использовать ее в системе горячего водоснабжения предприятия.

Так например при работе компрессора «К-250» производительность  $V = 15000$  м<sup>3</sup>/ч. Воздух в КО охлаждается с 150°C до 40°C. С охлаждающей водой в градирне выбрасывается в атмосферу до 0,4 Гкал/ч. Возможна выработка полезной теплоты (при коэффициенте преобразования  $\varphi = 4$ )  $Q = 0,4 * 4 / (4 - 1) = 0,54$  Гкал/ч или  $Q = 0,54 * 5000 = 2700$  Гкал/год.

Следует отметить, что на сегодняшний день при завышенных ценах на электроэнергию и заниженных на теплоту использование для компрессора электрического привода при всех его эксплуатационных преимуществах сводит на нет экономический выигрыш от внедрения ТНУ, но при ожидаемом в будущем повышении цен на топливо и выравнивании цены на тепловую и электрическую энергию срок окупаемости этой перспективной технологии составит 5-6 лет.

Также необходимо рассматривать и такие методы использования ВЭР систем воздухообеспечения как подогрев холодного воздуха до уровня 70-80°C за счет установки дополнительного воздухоподогревателя, где уходящий после компрессора горячий воздух будет отдавать энергию холодному. Это позволит снизить потери в системе охлаждения. Подогрев воздуха повысит его энергетическую ценность, снизит расход на 10-15%. При этом, однако, увеличиваются затраты на транспорт воздуха. Тем не менее снижается стоимость капитальных вложений в утилизацию ВЭР за счет использования сравнительно дешевого отечественного оборудования.

## Капля магнитной жидкости в измерительных системах

Баштовой В. Г., Рекс А. Г., Рекс П. А.,  
Гришук Е. А., Никандров Е. С.

Белорусский национальный технический университет

Жидкостные измерительные системы силового воздействия основаны на использовании гравитационных сил для противодействия измеряемой силе. К таким измерительным системам можно отнести датчики давления, акселерометры, датчики угла наклона, в которых гравитационная сила компенсирует силу давления либо инерционную силу. Неоспоримым преимуществом данных систем является высокая чувствительность. Так, жидкостные микроманометры могут использоваться для измерения малых давлений, а также малых скоростей газовых потоков.

Настоящая работа направлена на поиск путей повышения чувствительности жидкостных измерительных систем.

Рассматривается статическое равновесие капли магнитной жидкости с постоянным магнитом внутри в криволинейной в вертикальной плоскости цилиндрической трубке (рис. 1).

Цилиндрическая трубка диаметром  $D_T$  изогнута в вертикальной плоскости с радиусом закругления  $R$ . Один конец трубки (верхний) сообщается с атмосферой, а другой (нижний) – с источником избыточного давления, создающим силу давления  $F$  на каплю.

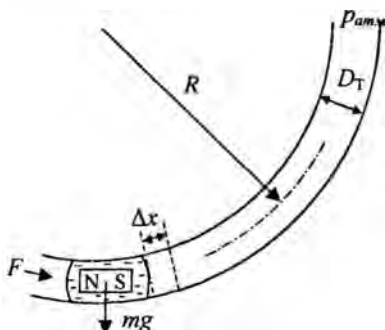


Рис. 1. Геометрия задачи

Магнит притягивает к себе магнитную жидкость и покрывается ею со всех сторон. В результате образуется капля магнитной жидкости, характеризуемая высокой устойчивостью и способная перемещаться с малым трением как единое целое при силовых воздействиях. При достаточно большом объеме магнитной жидкости капля полностью герметично перекрывает сечение трубки и является подвижным жидким поршнем.

В начальный момент, когда давления по обе стороны капли равны друг другу, она под действием силы тяжести находится в нижней части трубки. При повышении давления  $p$  на каплю действует сила давления  $F$ , и капля начинает перемещаться вдоль трубки вверх на некоторое расстояние  $\Delta x$ . Поскольку капля сместилась из положения равновесия, то появляется составляющая силы тяжести  $F_{\tau}$ , направленная вдоль трубки и противоположно силе давления  $F$ . Движение капли осуществляется до тех пор, пока сила давления не уравновешивается продольной составляющей силы тяжести. Поскольку трубка криволинейная, то с увеличением перемещения  $\Delta x$  растет и величина  $F_{\tau}$ . Составляющая силы тяжести  $F_{\tau}$  определяется положением капли в трубке. Следовательно, каждому значению силы давления соответствует вполне определенное равновесное положение капли. Очевидно, что максимальное линейное перемещение капли  $\Delta x_{\max}$  соответствует предельному угловому перемещению, равному  $\pi/2$ , а пределом  $F_{\max}$  действующей силы давления является сила тяжести капли жидкости с магнитом.

Для экспериментов использованы самарий-кобальтовые магниты, магнитные жидкости на основе трансформаторного масла ММТр-31 и керосина МК-28 и МК-37 с намагниченностями насыщения 31,2, 28 и 37,1 кА/м и плотностями соответственно 1274, 1158 и 1270 кг/м<sup>3</sup>.

Использованы стеклянные трубки с внутренними диаметрами от 4 до 8 мм, радиусами закругления  $R$  трубок: 25, 50, 100 и 150 мм.

В экспериментах давление создавалось поршневой системой и измерялось микроманометром типа ММН с допустимой погрешностью показаний  $\pm 0,5\%$ . Величина перемещения капли жидкости в трубке определяется визуально микроскопом МИ-1.

Под действием силы давления капля смещается из положения равновесия. Ее угловое перемещение не зависит от кривизны канала  $R$ , поскольку противодействующая гравитационная сила  $F_g$  одинакова для всех каналов при равных угловых перемещениях. Линейное же перемещение капли  $\Delta x$  определяется радиусом изгиба канала. Так, например, чувствительность капли к действию давления  $\Delta x/\Delta p$  для канала с  $R=150$  и  $25$  мм составляет соответственно  $0,8$  и  $0,12$  мм/Па. Особенно чувствительна капля к воздействию давлений, когда ее угловое смещение близко к  $90^\circ$ . Тогда величина  $\Delta x/\Delta p$  достигает значений порядка  $2$  мм/Па.

Величина линейного перемещения капель зависит от их массы. Это связано с гравитационным механизмом уравнивающей действующей на каплю силы давления. С уменьшением массы капли уменьшается противодействующая силе давления составляющая силы тяжести капли. В результате повышается чувствительность капли к действию давления (рис.2.), которая для капли массой  $210$  мг достигает  $1$  мм/Па на начальном участке зависимости. Для сравнения, чувствительность микрометра типа ММН со спиртовым заполнением не превышает  $0,6$  мм/Па.

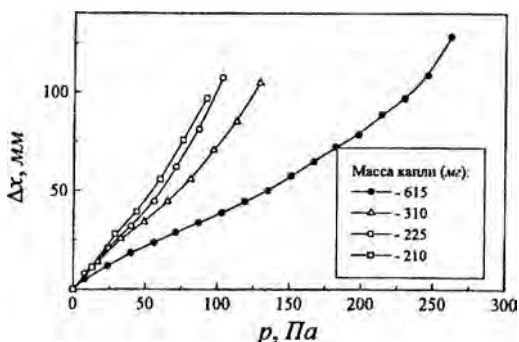


Рис. 2. Зависимость линейного перемещения капли магнитной жидкости от давления в криволинейных каналах

Работа выполнена при поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь.



УДК 629.735

**К вопросу использования когенераторов  
при выработке тепловой и электрической энергии**

Кравченко Е. В., Шостик Е. В.

Белорусский национальный технический университет

**Когенерация** – это совместный процесс производства электрической и тепловой энергии внутри одного устройства – когенерационной установки. Когенерационная установка состоит из приводного двигателя, генератора, системы отбора тепла и системы управления [1].

В когенерационной установке единичной мощностью до 5 МВт в качестве приводного двигателя, как правило, используются поршневые двигатели внутреннего сгорания. Их применение обусловлено высокой экономичностью и степенью маневренности без существенного снижения экономических показателей, низкой удельной стоимостью и большим сроком службы. В качестве электрического генератора в когенерационной установке используют электрические генераторы асинхронного и синхронного типов с выходным напряжением 0,4; 6 и 10 кВ.

Система утилизации тепла состоит из двух или трех независимых контуров и системы аварийного сброса тепла, обеспечивающих утилизацию тепла охлаждающей жидкости, масла и выхлопных газов приводного двигателя. Топливо, используемое в когенерационной установке, влияет на экономические показатели работы самой установки. В связи с этим используют природный газ благодаря его относительно низкой стоимости и доступности.

Когенераторы представляют собой агрегаты по комплексному производству тепла и электроэнергии. Они имеют эффективность использования энергетических ресурсов (газ, нефть) на 20-30% выше, чем оборудование, вырабатывающее только электроэнергию или только тепло. Общая схема когенерационной установки приведена на рис.1.

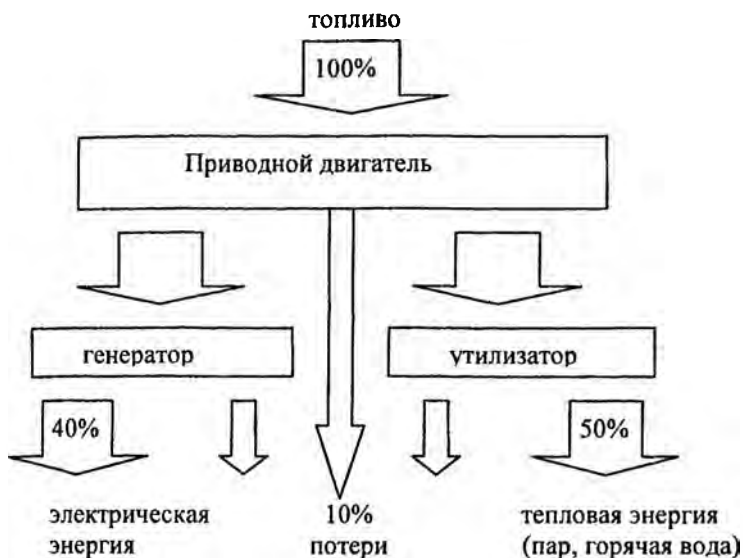


Рис.1. Общая схема когенерационной установки

Внедрение когенераторов позволяет существенно снизить затраты на потребляемую энергию, что дает существенный экономический эффект для конечного потребителя, а также решить проблему пиковых нагрузок, недостатков централизованных систем. Преимущества когенерационной установки и в том, что они часто используются в качестве аварийных источников электроэнергии там, где не допускаются перебои в питании сети.

Недостатком когенераторов является ограниченная мощность до 3 МВт для одной машины. Средний промышленный потребитель имеет установленную мощность в 1-2 МВт. При необходимости могут быть установлены несколько параллельно работающих когенераторов. Они позволяют решить острый вопрос неравномерного суточного потребления электроэнергии. При отсутствии нагрузки невостребованные когенераторы могут быть остановлены.

При применении когенерационного способа производства тепла и электроэнергии экономится около 40% топлива. Тепло и электроэнергия вырабатываются в непосредственной близости от потребителя. Тепло, возникающее в когенерационной установке, используется при отоплении объектов, при подготовке теплой технической воды, или при подготовке технологического тепла.

На сегодняшний день существует множество аргументов в защиту выбора когенерационных технологий. Когенераторы обладают замечательными особенностями: дешевизной электро- и теплотенергии, близостью к потребителю, отсутствием необходимости в дорогостоящих ЛЭП и подстанциях, экологической безопасностью, мобильностью, легкостью монтажа и многими другими факторами .

Сооружение когенерационных установок не требует существенных затрат. По сравнению с затратами на строительство новых электростанций, которые обходятся в 1000-1500\$ на один кВт мощности, удельная стоимость 1 кВт мощности предлагаемых когенераторов составляет ~500\$. Таким образом, когенераторы являются экономически привлекательными для промышленного потребителя. Затраты на проектирование, закупку, ввод в эксплуатацию и амортизацию когенераторов окупаются уже на 2-3 году эксплуатации при расчетном сроке службы оборудования 25-30 лет (180-200 тыс. часов). Предлагаемые установки имеют межремонтный ресурс 60-63 тыс. часов и низкую стоимость эксплуатационных расходов: расходов газа – менее 0,3 м3, расход масла – менее 0,4 г на 1 кВт/час[1].

### **Литература**

1. Клименко, В. Н. Энергетические характеристики когенерационной установки на частичных тепловых нагрузках / В. Н. Клименко, П. П. Сабашук, Ю. Г. Клименко // Промышленная теплотехника. – 1997. – № 3. – С. 51–56.

**Применение солнечных систем горячего водоснабжения в условиях Беларуси**

Кривошеев Ю. К., Червинский В. Л

Белорусский национальный технический университет

Как известно [1], солнечное теплоснабжение, т.е. использование солнечной энергии для горячего водоснабжения и отопления в жилищно-коммунальной и производственной сферах получило в мировой практике наибольшее распространение по сравнению с другими направлениями применения этого энергоисточника. Для оценки эффективности солнечного теплоснабжения в том или ином пункте или регионе недостаточно только климатической информации, но необходимо иметь количественные данные, характеризующие эффективность применения солнечных энергоустановок. Под установками солнечного теплоснабжения подразумеваются наиболее распространенные установки и системы, основанные на использовании плоских солнечных коллекторов, в которых осуществляется нагрев теплоносителя. Такие системы называются активными в отличие от пассивных систем, в которых поглощение и аккумулирование солнечной энергии осуществляется непосредственно элементами строительных конструкций зданий. Режимы работы активных энергоустановок могут быть следующими:

участие в покрытии нагрузки отопления и горячего водоснабжения (режим круглогодичного горячего водоснабжения);

участие в покрытии нагрузки только горячего водоснабжения в течение всего года (режим круглогодичного горячего водоснабжения);

участие в покрытии нагрузки только горячего водоснабжения и только в неотапительный период (режим сезонного горячего водоснабжения).

Первые два режима требуют исполнения установки по двухконтурной схеме, когда в первом (коллекторном) контуре теплоносителем является незамерзающая жидкость, а тепло к потребителю отводится через теплообменник. Установки, работающие по третьему режиму, могут быть одноконтурными с заполнением водой.

Методы расчета активных систем позволяют на основе использования климатической информации и с учетом характеристик используемого оборудования определять их основные параметры - коэффициент замещения нагрузки (доля солнечной энергии в покрытии нагрузки)  $f$  за некоторый рассматриваемый период времени (месяц, сезон, год), полезная производительность установки  $Q$  за этот период, площадь солнечных коллекторов в установке  $F$ . При фиксированной площади коллекторов  $F$  величины  $f$  и  $Q$  связаны очевидным соотношением  $Q = fL$ , где  $L$  - тепловая нагрузка за рассматриваемый период.

Авторами проведена работа по расчетному определению указанных основных характеристик солнечных установок горячего водоснабжения в различных регионах Беларуси с целью выявления эффективности использования таких установок. Для этого было выделено 3 расчетных пункта: Витебск, Минск, Гомель (север, центр, юг), по которым имелась необходимая климатическая информация, а именно средние за месяц значения суммарной и рассеяной радиации на горизонтальную поверхность и среднемесячная температура воздуха. Результаты расчета прихода суммарной солнечной радиации на наклонную поверхность коллектора (МДж/м<sup>2</sup>день) представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Приход солнечной радиации на наклонную поверхность коллектора для различных климатических зон РБ

	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь
Витебск	13,89	17,27	19,24	18,29	15,52	11,92
Минск	14,19	17,88	19,57	18,55	15,97	12,64
Гомель	14,76	17,95	19,55	19,05	17,20	13,71

Для дальнейшего расчета был использован так называемый  $f$  - метод [2]. Он состоит в том, что вначале определяется расход теплоты на горячее водоснабжение в данном конкретном месяце  $Q$ . Сезонная доля солнечной энергии в покрытии тепловой нагрузки (или степень замещения топлива) равна:

$$f_{\text{сез}} = \sum f Q_{\text{сез}} / \sum Q_{\text{сез}}$$

Коэффициент замещения  $f$  эмпирически можно связать с двумя безразмерными комплексами:

$$X = F K (T_A - \bar{T}_B) \Delta t / Q, \quad Y = F \eta_0 \bar{E} n_d / Q,$$

где  $\Delta t$  - число секунд в месяце;  $T_A$  - базисная температура, принятая равной  $100^\circ\text{C}$ ;  $T_B$  - среднемесячная температура наружного воздуха,  $^\circ\text{C}$ ;  $\bar{E}$  - среднемесячный дневной приход суммарной солнечной радиации на наклонную поверхность коллектора,  $\text{Дж}/(\text{м}^2 \text{день})$ ,  $F$  - площадь коллектора,  $\text{м}^2$ ,  $K$  - суммарный коэффициент тепловых потерь,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{K})$ ,  $\eta_0$  - эффективный оптический КПД коллектора.

Безразмерные комплексы  $X$  и  $Y$  имеют определенный физический смысл:  $Y$  можно трактовать как отношение количества энергии, поглощаемой пластиной коллектора в течение месяца, к полной тепловой нагрузке;  $X$  — отношение месячных тепловых потерь коллектора при базисной температуре к полной месячной тепловой нагрузке.

Зависимость между  $X$ ,  $Y$  и  $f$  можно аппроксимировать следующим уравнением:

$$f = 1,029 Y - 0,065 X - 0,245 Y^2 + 0,0018 X^2 + 0,0215 Y^3,$$

где  $0 < Y < 3$  и  $0 < X < 18$ .

Результаты расчета были проведены для простейшего коллектора с однослойным остеклением ( $K=8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{K})$ ,  $\eta_0=0,85$ ) при ежедневном расходе 90 литров на человека горячей воды температурой  $55^\circ\text{C}$ . Установлено, что в условиях г. Гомеля (юг Беларуси) при площади коллектора  $1 \text{ м}^2$ , приходящейся на одного человека, будет достигнут коэффициент замещения  $f=0,5$ . В других же регионах РБ этот коэффициент меньше на незначительную величину.

## Литература

1. Системы солнечного тепло- и холодоснабжения // под ред. Э. В. Сарницкого и С. А. Чистовича. – М.: Стройиздат, 1990.
2. Бекман У. Расчет систем солнечного теплоснабжения / У. Бекман, С. Клейн, Дж. Даффи. – М.: Энергоиздат, 1982.

УДК 004.67

**Автоматизация расчетов систем теплоснабжения  
в курсовом проектировании**

Погирницкая С. Г., Янцевич И. В.

Белорусский Национальный технический университет

При курсовом проектировании по техническим дисциплинам студенты выполняют сложные взаимосвязанные между собой расчеты, анализируют полученные результаты, производят выбор метода расчета, строят графические зависимости и др. При этом неотъемлемой частью проектирования является выбор многочисленных данных из справочной и нормативной литературы (СНиП, ГОСТ, правила и пр.).

В задачу преподавателя входит не только оценить знания и навыки, полученные студентом в ходе проектирования, но и проверить правильность выполненных расчетов и построения графических зависимостей. В ходе такой проверки возникает необходимость проведения большого количества вычислений, пусть даже и с большой степенью округления. При этом задачу усложняет значительное количество исходных данных и многовариантность заданий на проектирование. Существует также возможность большого количества расчетов по одной и той же формуле с различными данными.

Уменьшить трудозатраты на проверку и ее повысить качество позволяет использование возможностей приложения Excel из пакета программ MS Office для автоматизации расчета и построения графиков.

Авторами составлена компьютерная программа автоматизирующая расчет, иллюстрирующая возможности MS Excel для организации курсового проектирования дисциплины «Производство, транспорт и потребление тепловой энергии» для студентов специальности 1 43.01.06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент». Целью курсового проекта является выполнение для различных городов тепловых и гидравлических расчетов, построение графиков, выбор оборудования. При этом количество справочных и нормативных источников доходит до 15, число вариантов заданий – до 60.

При составлении программы использовались такие возможности Excel как функции и формулы, сортировка данных, мастер диаграмм, автофильтр.

Программа имеет простую и ясную структуру: файл включает в себя несколько листов. Каждый лист предназначен либо для ввода данных, либо содержит справочный материал или расчет по конкретному разделу проекта.

Первый лист «задание» содержит ячейки для ввода исходных данных задания на курсовой проект, согласно которым в дальнейшем производится автоматический выбор данных из последующих листов. С помощью функции «ПРОСМОТР» по номеру варианта происходит выбор названия города, определяющего климатологические данные для расчета. Фрагмент этого листа представлен в таблице:

Вариант №	55				
Жилой район	А	Б	В	Г	Д
Город	Минск				
Площадь квартала, га	22	16	20	12	17
Этажность застройки	3	8	6	9	6

Отдельные листы содержат справочный материал – таблицы данных из справочных и нормативных источников. По этим таблицам согласно номеру варианта или другим показателям, заданным на первом листе «задание», производится выбор параметров, необходимых для расчета. При этом используются функции Excel «ЕСЛИ», «ПОИСКПОЗ», «ПРОСМОТР».

На последующих листах выполняется необходимый расчет (например, тепловых нагрузок), данные для которого с помощью функции «ПРОСМОТР» выбираются из предыдущих листов и обрабатываются с помощью мастера формул. По итогам этого расчета на следующем листе с помощью мастера диаграмм производится построение графиков (например, графиков тепловых нагрузок), представленных на рис. 1. При этом для корректировки области построения графиков используется «АВТОФИЛЬТР» в исходной таблице.



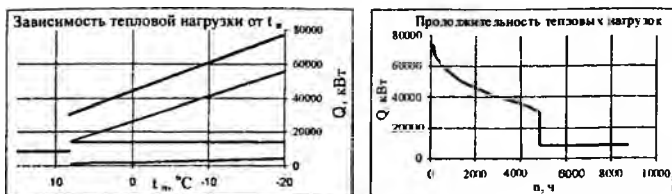


Рис. 1

Вся структура документа и содержание листов соблюдает строгую последовательность расчета, предлагаемой той или иной методикой.

Во всем документе организована взаимосвязь между страницами при помощи ссылок на ячейки. Для удобства работы с программой при оформлении документа используются цветовой маркер, всплывающие примечания, выделение и объединение ячеек, различные начертания шрифта. Это облегчает зрительную работу с программой.

Для удобства работы преподавателя с программой автоматизированного расчета студентам предлагается в пояснительной записке весь расчет оформлять в виде сводных таблиц, в которые заносят исходные данные и результаты расчета. В пояснительной записке студенты выполняют расчет для одного варианта, остальные «однотипные» расчеты сводят в сводные таблицы.

Сводные таблицы позволяют осуществить наглядность расчета и удобство при проверке, а также минимизировать объем пояснительной записки курсового проекта. Форма сводных таблиц предлагается преподавателем.

Взаимосвязь данных и расчетных формул автоматизированного расчета позволяют выявить ошибки и неточности на любом этапе проектирования.

Как видим, использование возможностей MS Excel и дальнейшее его изучение позволяют преподавателю не только сократить трудозатраты при выполнении определенных задач, но, и делают его труд творческим, эффективным, открывают новые возможности совершенствования методик преподавания учебных дисциплин, повышают качество обучения студентов.

Хутская Н. Г., Космачева Э. М.

Белорусский национальный технический университет

В качестве основных уравнений, выражающих связь между составом органической массы древесины и полученным из нее газом, предлагаются следующие [1]:

- уравнение баланса углерода
- $\alpha \text{CO}_2 + \beta \text{CO} + \delta \text{CH}_4 = 42; \quad (1)$

- уравнение баланса водорода
- $2 \delta \text{CH}_4 + h \text{H}_2 = 30 \pm X; \quad (2)$

- уравнение баланса азота
- $Y \text{N}_2 = 26,5 + 1,88 (\alpha \text{CO}_2 - \delta \text{CH}_4 \mp X); \quad (3)$

- $\frac{\beta \text{CO}}{\alpha \text{CO}_2} = m; \quad (4)$

- $\frac{\alpha \text{CO}_2 + \beta \text{CO} + \delta \text{CH}_4}{2 \delta \text{CH}_4 + h \text{H}_2} = \frac{42}{30 \pm X} = n. \quad (5)$

Здесь  $\alpha, \beta, \delta, h, Y$  - число молей соответственно  $\text{CO}_2, \text{CO}, \text{CH}_4, \text{H}_2, \text{N}_2$ , полученных при газификации одного моля органической массы топлива;  $X$  - количество молей водорода, выделившихся при разложении гигроскопической влаги (знак плюс) или окислившись в воду из органической массы (знак минус).

Для древесного газа практические пределы изменения величин  $m$  и  $n$  следующие [1]: а)  $m = 1,0 \dots 1,7$ . При низких температурах  $m$  ближе к 1,0, а при сухом топливе и подогреве воздуха  $m$  ближе к 1,7, б)  $n = 1,3 \dots 1,8$ . При высокой температуре в активном слое  $n$  ближе к 1,8, а при большой влажности топлива и отсутствии подготовки в бункере  $n$  стремится к 1,3.

Для определения состава газа решается система уравнений (1) – (5). Результаты расчета состава газа – продукта газификации древесины, для различной ее влажности  $W^P$ , представлены в таблице.

СОСТАВ ГАЗА (продукта газификации древесины), в %						
Наименование компонента	при влажности древесины $W^p$ , %					
	10	15	20	25	30	35
CO <sub>2</sub>	12,7	12,8	12,9	13,0	13,1	13,2
CO	19,1	19,3	19,5	19,6	19,7	19,9
CH <sub>4</sub>	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0
H <sub>2</sub>	14,9	16,1	17,6	18,4	19,2	20,2
N <sub>2</sub>	51,5	49,9	48,1	47,1	46,0	44,8
ВСЕГО:	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Расчет рабочего процесса газификации древесины проверяется составлением материального и теплового балансов.

В материальном балансе учитываются все вещества, вводимые и отводимые из газогенератора, а также и влагосодержание газа. Соответственно этому, приходными статьями материального баланса являются топливо, воздух и влага, а расходными считаются генераторный газ, недожог, зола и влага.

Теплота, выделившаяся и поглощенная в результате химических реакций процесса, подсчитывается в тепловом балансе и дает возможность определить температуру газа и КПД газогенератора.

Для оценки степени использования твердого топлива (древесины) в газогенераторе определяется его КПД [1]

$$\eta_{\Gamma\Gamma} = \frac{Q_n E}{Q_n^p}, \quad (6)$$

где  $Q_n$  – низшая теплота сгорания газа, кДж/м<sup>3</sup>;  $E$  – выход газа с 1 кг древесины, м<sup>3</sup>/кг;  $Q_n^p$  – низшая теплота сгорания 1 кг древесины, кДж/кг.

Для древесины [3]

$$Q_n^p = 4,19 \left( 4370 - 50 W^p \right) \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \quad (7)$$

Для оценки процесса газификации можно также пользоваться термохимическим коэффициентом полезного действия газогенератора  $\eta_{\Gamma\Gamma}^{\text{ТХ}}$ , представляющим собой отношение низшей

теплоты сгорания газа (продукта газификации) к теплоте углерода  $Q_{\text{угл}}$ , пошедшего на его образование:

$$\eta_{\text{ГГ}}^{\text{ТХ}} = \frac{Q_{\text{H}}}{Q_{\text{угл}}}; \quad (8)$$

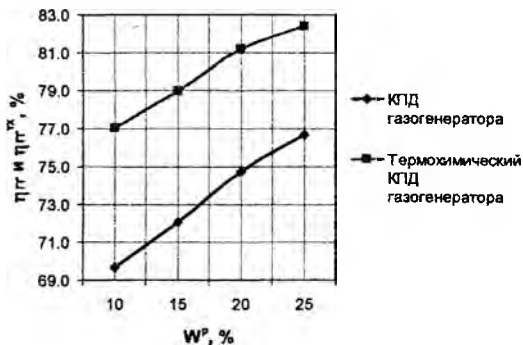
$$Q_{\text{угл}} = \frac{12}{100 \cdot 22,4} \left( \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 \right) 33939, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}. \quad (9)$$

Исследования показывают [1], что при обратном процессе увеличение влажности оказывает существенное влияние на протекание реакций в активной зоне генератора. С увеличением влажности топлива химический состав газа ухудшается, снижается термический коэффициент полезного действия газогенератора, увеличивается расход топлива.

При относительно невысокой начальной влажности древесины ( $W^p = 10 \dots 30\%$ ) в результате подсушки ее в соответствующей зоне в составе газов, движущихся в зону восстановления,

присутствует водяной пар. Его тем больше, чем выше  $W^p$ , что стимулирует (в пределах  $W^p < 30\%$ ) протекание реакций, улучшает состав газа, повышает КПД газогенератора.

Зависимость КПД газогенератора от влажности древесины ( $W^p < 30\%$ )



### Литература

1. Коллеров, Л. К. Газомоторные установки / Л. К. Коллеров. — М.: Машгиз, 1951. — 239 с.

# Информационные технологии и автоматизация

УДК 378:618.3

## Современные технологии организации виртуальных рабочих станций на платформе Windows 2003

Дербан А. Н., Дербан Д. Н.

Белорусский национальный технический университет

Тестирование программного продукта на различных платформах возможно двумя способами: установка нескольких операционных систем на один сервер или установка одной операционной системы с применением технологии виртуальных машин. Перечислим основные недостатки тестирования программного продукта первым способом:

- необходимость перезагрузки сервера в другую операционную систему для последующего тестирования программного обеспечения в ней;
- для надёжной работы различных операционных систем требуется специфическая настройка и установка программного обеспечения и драйверов оборудования.

Эти недостатки влекут за собой потерю времени.

Одним из программных продуктов, реализующих второй способ, является Virtual Server 2005 R2 от компании Microsoft. Данное программное обеспечение поддерживает следующие операционные системы: Microsoft Windows Server 2000/2003, Microsoft Windows XP Professional в версиях как для 32 разрядных процессоров, так и для 64 разрядных.

Виртуализация как технология активно развивается не только в рамках конкретных программных решений, но и находит применение на уровне аппаратной реализации центральных процессоров. Последние технические достижения ведущих производителей микропроцессорной техники, таких как Intel и AMD, позволяют более эффективно использовать ресурсы процессора, т.к. большинство приложений и задач являются не сложными, поэтому появляется возможность их одновременной работы без потери производительности системы

в целом. Использование терминальных решений в повседневной практике построения корпоративных информационных систем является наилучшим способом решения проблем с совместимостью программного обеспечения, быстрым развертыванием готовых программных комплексов, а также упрощает решение проблем с резервным копированием жизненно важной для компании информации. Следует отметить, что службы терминалов позволяют предоставлять доступ клиентам к общим приложениям из операционных сред любых платформ, кроме того терминальные клиенты не требуют повышения производительности аппаратных ресурсов со стороны клиента. Эта особенность позволяет использовать устаревших парк вычислительной техники, при этом сохраняется возможность масштабирования производительности комплекса за счет модернизации терминального сервера.

Приложение Virtual Server 2005 R2 позволяет авторизовывать пользователя и назначать ему соответствующие права на основе локальных учётных записей, либо на основе учётных записей домена, в рамках которого работает сервер. При установке новой операционной системы в рамках уже существующей, Virtual Server 2005 R2 эмулирует прерывания для устанавливаемой платформы, такие же, как если бы она устанавливалась на физическую машину с параметрами, указанными пользователем в настройке Virtual Server 2005 R2 для конкретной операционной системы. Перечислим основные настройки виртуальной машины: объём оперативной памяти виртуальной машины (указанное пользователем количество будет зарезервировано из уже существующего физически объёма памяти сервера), ёмкость жёсткого диска (жёсткий диск виртуальной машины представляет собой файл с расширением vhd с объёмом, указанным пользователем), сетевые подключения с локальной сетью, интерфейс подключения жёсткого диска (IDE или SCSI), а также имя образа виртуальной машины. Определив перечисленные выше параметры для виртуальной операционной системы можно фактически приступить к её установке. Аппаратные средства, не указанные пользователем, выбираются Virtual Server 2005 R2 автоматически. В рамках Virtual Server 2005 R2 возможна

установка следующих операционных систем: операционные системы семейства Microsoft Windows, кроме Microsoft Windows Vista, Red Hat Enterprise Linux 2.1&3.0, SuSE Linux Enterprise Server 9.0. Количество виртуальных операционных систем, работающих в рамках Virtual Server 2005 R2 ограничено лишь аппаратными возможностями сервера. Вся информация о конфигурации виртуальной операционной системы содержится в файле имя\_вирт\_машины.vmc. После установки операционной системы рекомендуется создать резервную копию файла vhd виртуальной машины, которая будет храниться в рамках единой корпоративной системы восстановления от сбоев.

Работа Microsoft Virtual Server 2005 R2 на платформе Microsoft Windows Server 2003R2 тестировалась на базе следующего аппаратного обеспечения: сервер HP ProLiant ML 350, процессор Intel Xeon 2,4 ГГц., 2 винчестера ёмкостью 200 ГБ каждый, 6 ГБ оперативной памяти. Описанная выше платформа обеспечила отказоустойчивую работу следующих операционных систем: одной Microsoft Windows 2000 Server, двух Microsoft Windows 2003 Server Enterprise Edition, четырёх Microsoft Windows 2003 Server Standard Edition, и одной Microsoft Windows XP Professional. Тестирование программных продуктов производилось следующим образом: виртуальные операционные системы подключались к локальной сети компании через физический адаптер сервера HP ProLiant ML350, системным администратором заводились учётные записи пользователей, с соответствующими правами, разрешался удалённый доступ к виртуальной операционной системе средствами клиента управления удалённым рабочим столом Microsoft RDP Client. Затем коллектив программистов соединялся с виртуальными станциями средствами RDP клиента и осуществлял тестирование программных продуктов.

За шесть месяцев тестирования разрабатываемого программного обеспечения не произошло ни одного сбоя как в системе Windows 2000/3/Microsoft Virtual Server 2005 R2, так и в виртуальных станциях, работающих в рамках неё. Это позволяет судить о Microsoft Virtual Server 2005 R2 как о надёжном и отказоустойчивом программном обеспечении, применение которого экономически целесообразно для средних и крупных компаний разработчиков программного обеспечения.

**Условия сходимости результатов у альтернативных методов моделирования производственных систем**

Новичихина Е. Р.

Белорусский национальный технический университет

Объектом исследования являются модели производственных систем (ПС), под которыми понимаются участки или линии обработки деталей машино- или приборостроения. Рассматриваются имитационные модели (ИМ) и модели, построенные по методу динамики средних (ДС).

Цель исследования:

- проверка соответствия результатов моделирования ПС аналитическими и имитационными методами,
- валидация концептуальных моделей.

Под валидацией [1] понимается проверка, соответствует ли концептуальная модель реальной системе для рассматриваемого аспекта и задачи. Другими словами, это проверка: правильно ли мы представляем и формализуем объект моделирования и приемлемы ли принятые допущения. Валидация является одним из этапов оценки адекватности, за которой следуют этапы верификации и анализа точности.

Метод ДС представляется очень удобным для моделирования ПС на уровне анализа рабочих позиций. Этот метод прост и не трудоемок в разработке и программной реализации.

Идея метода динамики средних основана на составлении и решении системы дифференциальных уравнений Колмогорова для так называемого «среднего элемента» системы. Применительно к ПС в качестве такого среднего элемента рассматривается «средний станок», который обладает усредненными характеристиками всех имеющихся в системе станков. Искомые величины в уравнениях – это коэффициенты пребывания «среднего станка» в различных состояниях.

Метод позволяет создать одну универсальную модель для любых ПС с параметрической настройкой на объект и условия путем изменения только исходных данных. Что и было реализовано в рамках комплекса [2].



Состав возможных состояний оборудования ПС известен, устоялся и даже строго регламентирован. Эти состояния – работа (машинное время) и простои по различным причинам. В соответствии со структурой годового фонда времени оборудования граф состояний «среднего станка» в модели содержит 13 вершин. Интенсивности переходов между состояниями рассчитываются из значений среднего времени до наступления каждого состояния и до выхода из него (интенсивность - это величина, обратная времени).

Суть проблемы применения метода ДС заключается в том, что потоки событий в моделируемой системе должны быть пуассоновскими (простейшими). Т.е. время их наступления и длительность должны быть распределены по экспоненциальному закону, причем без смещения, начиная с нуля. Однако известно, что в реальных ПС, особенно автоматизированных, эти условия почти всегда отсутствуют. Так время обработки деталей определяется управляющей программой ЧПУ и внутри партии постоянно. То же самое касается времени установки-снятия, выдачи накопителя и т.п. Период стойкости инструмента чаще всего распределен по нормальному закону. Транспортное обслуживание, хотя часто и подчиняется экспоненциальному закону, но никогда не бывает равным нулю, т.е. имеет какое-то минимальное значение. Оказывается, что только потоки отказов, починок, поступления заказов или отсутствия работы подходят под допущение.

Встает вопрос об адекватности моделей ДС, когда их допущения частично не соответствуют действительности.

Для этого требовалось выявить степень влияния допущений метода ДС на результаты моделирования ПС, а также установить границы применимости метода с учетом требуемой погрешности.

Результаты моделирования по методу ДС сравнивались с результатами работы имитационных моделей (ИМ), использующих различные законы распределения. Для этого были разработаны имитационные модели, которые полностью воспроизводили структуру и переходы графа «среднего станка» в модели ДС. Отличие ИМ от ДС состояло в том, что они могли оперировать любыми законами распределения времен.

Для разработки ИМ был использован специализированный язык GPSS Word, библиотека (PLUS) которого предлагает более 40 различных законов.

Кроме того, результаты работы моделей ДС сравнивались с имеющейся статистикой по эксплуатации 2-х реальных ПС.

Анализируемым показателем ПС и критерием ее эффективности является суммарное время выполнения станком годового планового задания.

За критерий применимости метода ДС было принято отклонение его результатов по коэффициенту загрузки  $K_z$  в сравнении с результатами имитационных моделей без допущений не более 1 %.

Исследования показали, что наибольшее отклонение за период 1 год получено в сравнении с результатами ИМ модели, использующей экспоненциальный закон распределения – 0,9%. По соглашению это менее допустимого 1 %. По остальным моделям расхождение составило 0,1-0,3 %.

Для наиболее реалистичных условий с комбинацией детерминированных величин и случайных величин с разными законами отличие результатов составляет 0,3 %, т.е. приемлемо.

Эти результаты хорошо согласуются с имеющейся статистикой по эксплуатации двух реальных ПС: участка токарной обработки ступицы трактора на МТЗ и участка прессования втулок на заводе резинотехнических изделий «БелТат-М». Расхождения составили также менее 1 %.

Т. о., можно утверждать, что метод ДС дает более оптимистическую оценку (занижает) суммарного времени выполнения годового задания. Метод приемлем для моделирования ПС с допустимой погрешностью 1% при условии, что моделируемый период составляет не менее 1 года.

### **Литература**

1. Лоу, А. М. Имитационное моделирование. Классика CS / А. М. Лоу, В. Д. Кельтон. – 3-е изд. – СПб.: Питер, Ктев: ВHV, 2004 – 847 с.

2. Новичихина, Е.Р. Программный комплекс для моделирования производственных систем / Е. Р. Новичихина, П. П. Шардыко // Материалы научн. конф. учащихся, студентов и аспирантов, посвященной 85-летию БНТУ, Минск, 15-17 ноября 2005 г. – Мн.: БНТУ, 2005. – С. 17–21.

УДК 621.311.017004.18:683.3

**Принципы построения системы автоматизированного  
контроля режимов внештатных ситуаций  
энергопредприятия**

Гутич И. И.

Белорусский национальный технический университет

Функция регистрации внештатных ситуаций складывается из следующих основных задач:

- хронологическая регистрация (осциллографирование) срабатываний коммутационных аппаратов, устройств защиты, режимной и противоаварийной автоматики, значений токов короткого замыкания и других параметров;
- экспресс-анализ внештатных ситуаций, формирование сообщений и автоматическое представление оперативному персоналу;
- формирование массивов информации для реализации других функций и передачи в энергосистему.

Задача регистрации и экспресс-анализа внештатных ситуаций реализуется вычислительной подсистемой, содержащей пакет прикладных программ для распознавания и анализа аномальных режимов и аварийных ситуаций. Подсистема осуществляет экспресс-анализ наиболее тяжелых видов повреждений, выделяет и концентрирует необходимую информацию, готовит экстренные сообщения для автоматического представления персоналу, дающие ответы на вопросы: что?, где?, когда?, формирует массив данных аварийной регистрации и передаёт его для последующей обработки.

Подсистемой регистрируются и анализируются следующие виды внештатных ситуаций:

- все виды коротких замыканий;
- асинхронные режимы;
- работа технологических защит;
- работа защит от внутренних повреждений оборудования.

Одним из основных видов аномальных режимов работы электрической сети является перегрузка оборудования, а наиболее распространенным и опасным видом повреждения - короткие замыкания.

Для решения задачи экспресс-анализа аварийных процессов, могут использоваться два подхода, основанных на эвристических методах. Для сокращения времени решения принимается табличная форма организации структур данных и, в соответствии с этим, определены основные элементы архитектуры подсистемы. Однако, наряду с сокращением времени решения задачи, такой подход требует значительных ресурсов оперативной памяти, снижение которых достигается за счёт использования для идентификации аварийных ситуаций методов теории распознавания образов, в частности метода сокращенного логического базиса. В результате, основные математические действия выполняются при организации структуры данных, а просмотр таблиц, с использованием входных данных для вычисления адресов в этих таблицах, реализуется ЭВМ в виде процедур.

Задача решается следующим образом. На основании эмпирических соотношений между множеством признаков

$(A_1, \dots, A_n)$  и совокупностью распознаваемых событий

$(K_1, \dots, K_m)$ , налагающих определённые ограничения на возможные комбинации истинности событий, формируются столбцы таблиц базиса,  $Vc[A_1, \dots, A_n; K_1, \dots, K_m]$ , т.е. функциональная модель предметной области. Полученный сокращенный базис устанавливает соответствие между колонками базисов

$Vc[A_1, \dots, A_n]$  и  $Vc[K_1, \dots, K_m]$  и определяет, тем самым, с помощью дополнительной информации  $G(A_1, \dots, A_n)$ , регистрируемой в аварийном режиме, искомую неизвестную функцию  $F(K_1, \dots, K_m)$ , удовлетворяющую уравнению

$\overline{G}(A_1, \dots, A_n) + F(K_1, \dots, K_m) = I$ , и имеющую явное разрешение относительно хотя бы одного из аргументов. Анализ ситуации и механизм принятия решения по её распознаванию состоит в формировании из полученной информации векторов признаков событий и поразрядном сравнении полученных векторов признаков со столбцами таблиц базиса, находящегося в памяти ЭВМ, и, при их совпадении, считается соответствующий столбец, устанавливающий состояние анализируемого элемента.

По результатам анализа формируется массив информации и передается в базу данных.

Представление информации является одной из основных функций автоматизированной системы контроля и управления энергопредприятий. Основная оперативная информация по схеме главных электрических соединений представляется в виде мнемосхем, обобщенная информация, отражающая состояние всего объекта в целом, представляется в виде обзорной видеограммы, имеющей меню. Детализация информации состоит в разделении схемы на отдельные фрагменты. Разделение выполняется по отдельным присоединениям (энергоблок, линия, и др.). При этом, разделение схемы на фрагменты выполняется таким образом, чтобы каждый фрагмент был логическим продолжением соответствующего другого фрагмента и при совместном рассмотрении они представляли собой единое целое. Вызов фрагмента осуществляется посредством меню. Дальнейшей детализацией является представление информации об отдельных режимах работы присоединения с учетом всех вариантов подключения к разным системам шин, режимов их работы, в первую очередь аварийных, где может представляться каждый режим работы или вариант схемы в виде отдельной видеограммы, представляемой автоматически или с помощью меню режимов работы присоединения.

Представление схемы главных электрических соединений на экранах цветных графических видеотерминалов, даже после разделения её на отдельные фрагменты, представляет сложную задачу, относящуюся к классу слабоструктурированных.

Решение этой задачи ведется путем построения логических моделей по эвристическим правилам, поскольку корректно поставить на формальном уровне задачу и реализовать по стандартной схеме: математическая модель, алгоритм, программа не представляется возможным. В связи с этим задача решается с использованием методов ситуационного исчисления (управления).

УДК 621.18

### Автоматизация стенда тестирования двигателей

Лившиц Ю. Е., Чайкин Ф. С.

Белорусский национальный технический университет

При приобретении двигателя стороннего производителя МАЗ должен производить проверку на соответствие автомобиля нормам Евро, так как именно он несет ответственность за все технические характеристики автомобиля перед покупателем. Помимо того, производителю необходима уверенность в том, что двигатель может работать с определенным крутящим моментом и тяговой мощностью в соответствии с его паспортными данными при агрегатировании его с различным навесным оборудованием.

Для проведения испытаний на МАЗе существует специальный тестировочный стенд, на котором можно полностью промоделировать все режимы работы дизельных двигателей. При проведении испытаний датчиками снимаются показания параметров двигателя, по полученным данным строятся кривые мощности и крутящего момента в различных режимах работы. Во время проведения испытаний отслеживаются следующие параметры: температура и давление охлаждающей жидкости, масла, воздуха, выхлопных газов; расход топлива; интенсивность потока воздуха, охлаждающей жидкости, масла; частота вращения двигателя, вентилятора системы охлаждения, ротора турбокомпрессора; крутящий момент и дымность выхлопа двигателя. Для этого используется 24 датчика с дискретными и аналоговыми выходными сигналами.

Однако проведение тестирования значительно осложнено отсутствием общей системы контроля за прохождением испытаний и сбора информации. Управление дроссельной заслонкой ДВС, нагрузкой, а также сбор данных производится операторами.

Поэтому встает задача автоматизации процесса тестирования и сбора информации о ходе проведения испытаний с целью упрощения самого процесса испытаний, снижения временных и трудовых затрат, а следовательно и финансовых расходов,

связанных с ними и автоматизации получения протокола испытаний.

В качестве решения предлагается система автоматизированного контроля за проведением тестирования и сбора информации на основе контроллера и ЭВМ. Для создания системы был выбран контроллер фирмы Peus Systems GmbH, доказавший свою надежность и идеально подходящую для решения подобных задач функциональность за 15 лет работы на автозаводах ведущих мировых автопроизводителей (VW, BMW, General Motors). Программное обеспечение системы реализовано на продукте Automator Suite, который предоставляет разработчику широкие возможности по созданию систем автоматизированного контроля за различными процессами, визуализации элементов контроля и обработке данных.

Таким образом, разработанная система позволяет снимать показания с датчиков, установленных на двигателе, с частотой 10 Гц. Предоставляется возможность вывода данных на монитор ПК в числовой и графической форме для анализа в режиме реального времени и записи в файл для последующего анализа по окончании проведения теста. Данные с датчиков поступают на контроллер, где поток информации с каждого датчика обрабатывается специально разработанным для него драйвером, приводится к удобной конечному пользователю форме и поступает на ПК. Основная часть алгоритмов контроля и сбора информации реализована программно на ЭВМ в рамках программного пакета Automator Suite. Система не только реализует сбор и сохранение данных, но и сигнализирует о нарушении условий проведения теста, а также автоматически производит отключение питания тестировочного стенда при обнаружении серьезных сбоев в работе оборудования.

Одной из отличительных особенностей разработанной системы является возможность контроля за процессом прохождения испытаний с помощью ПК в реальном времени. Для обмена данными между контроллером и ЭВМ используется протокол TCP/IP. На ЭВМ выделяется некоторая область памяти для общих переменных системы, т.е. драйверы, работающие на контроллере, и программное обеспечение системы на ЭВМ могут использовать одни и те же переменные,

что облегчает процесс обмена данными и повышает его скорость.

В качестве решения предлагается система автоматизированного контроля за проведением тестирования и сбора информации на основе контроллера и ЭВМ. Для создания системы был выбран контроллер фирмы Peus Systems GmbH, доказавший свою надежность и идеально подходящую для решения подобных задач функциональность за 15 лет работы на автозаводах ведущих мировых автопроизводителей (VW, BMW, General Motors). Программное обеспечение системы реализовано на продукте Automator Suite, который предоставляет разработчику широкие возможности по созданию систем автоматизированного контроля за различными процессами, визуализации элементов контроля и обработке данных.

Для непосредственного наблюдения за поведением системы в процессе прохождения испытаний на ПК созданы графические панели оператора, где отображаются текущие значения всех исследуемых параметров в виде чисел, графиков и анимированных элементов контроля. Предусмотренная система сигнализации об ошибках выводит на дисплей ЭВМ информацию о нарушении условий теста и предлагает способ ликвидации нестандартной ситуации оператору. Перед началом испытаний оператор может сам выбрать одну из заданных моделей двигателя с заложенными значениями контролируемых параметров, после чего в случае выхода какого-либо из контролируемых значений за границы нормального для данного типа двигателей диапазона сработает система сигнализации. Архитектура программного обеспечения обладает достаточной гибкостью для быстрого изменения конфигурации системы и дополнения ее элементами самообучения.

Система прошла апробацию в производственных условиях и показала свою эффективность. После устранения несущественных недостатков система будет внедрена.

В перспективе предусматривается возможность создания мобильной системы тестирования для комплексного испытания автомобилей в условиях реальной эксплуатации.



УДК 531.708

## Оценка качества промышленных смесей методом измерения тока привода смесителя

Гульков Г. И., Сотцев А. В., Скачек А. В., Артюшик В. С.  
Белорусский национальный технический университет

В настоящее время подавляющее большинство предприятий при производстве смесей полагается на априорные характеристики, заданные в соотношении компонентов. Качество продукта определяется не постоянно и требует длительного времени. Существующие методы определения твердости и прочности бетона не позволяют вносить изменения в рецептуру непосредственно при изготовлении смеси. В итоге незначительные нарушения в работе дозирующих агрегатов узла или линии проводят к тому, что количество брака увеличивается в несколько раз. К тому же, постоянно ужесточающиеся требования к качеству бетонов и асфальтов ставят перед руководителями предприятий все новые и новые задачи по доработке технологических процессов, что сопряжено с большими затратами.

Повысить качество смеси и избавиться от случайных погрешностей позволяют не прямые методы непрерывного контроля качества. Основным из таких методов является определение и поддержание водно-цементного и песчано-цементного соотношения для бетонов и соотношения песок-битум для асфальтов.

В настоящее время существуют разработки, позволяющие напрямую связать количество и соотношение воды, песка и цемента с твердостью и прочностью бетона.

Для решения этого вопроса чаще всего применяется метод оценки влажности смеси в смесителе, соединенный с измерением влажности исходного песка. У данного метода по существу всего одно преимущество: использование представленных на рынке влагомеров, которые серийно выпускаются во многих странах мира. Кроме указанного преимущества данный метод имеет ряд недостатков. К ним относятся: сложность встраивания и дороговизна влагомеров (один влагомер стоит не менее трех тысяч долларов США), недостаточная их надежность, повышение требований к

механической части смесителей, а также к уровню подготовки обслуживающего персонала. К тому же такой метод не применим при производстве асфальта.

Обычно влагомеры применяют в следующей конфигурации оборудования узла. Один влагомер встраивают в расходную емкость песка, второй – в смеситель. Также в смеситель встраивают трубку для равномерной подачи воды. При работе в зависимости от влажности песка и измеренной влажности смеси в смесителе добавляется необходимое количество воды. При таком способе производства существенными недостатками являются: не учитывается влажность щебня или гравия, которые иногда входят в состав смеси, увеличивается время смешивания и всего цикла за счет добавления дополнительных порций воды, время готовности смеси определяется человеком-оператором самостоятельно или автоматикой по усредненному (с запасом) времени.

Большинство из указанных недостатков отсутствуют при определении качества смеси через ток двигателя смесителя. Основой данного метода является зависимость тока двигателя от соотношения компонентов смеси. Для его реализации используется микропроцессорное устройство, позволяющее определять ток двигателя в каждой фазе. Это устройство устанавливается в шкафу управления линии и подключается последовательно с питанием двигателя. Устройство оснащено измерителем напряжения, что позволяет повысить точность измерения.

Опытная эксплуатация таких устройств, условно названных консисометрами, показала, что каждому типу бетонной или асфальтной смеси соответствует своя нагрузочная характеристика двигателя, которая определяется рядом параметров (см. рис.1). К параметрам нагрузочной характеристики относятся: время нарастания  $t_1$ , время установления ( $t_3-t_2$ ), скорость нарастания и скорость установления. Увеличение количества цемента в смеси приводит к уменьшению времени нарастания и увеличению времени установления, а изменение соотношения вода-цемент приводит к различным уровням абсолютного значения нагрузки на двигатель.

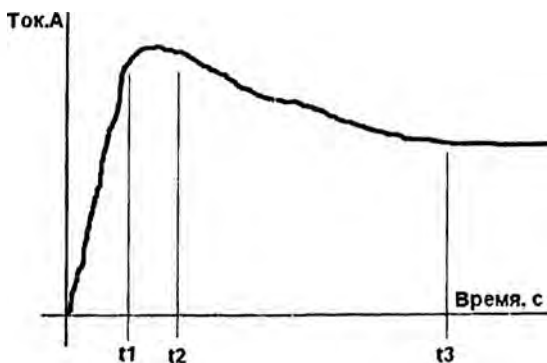


Рисунок 1 – Нагрузочная характеристика двигателя

При работе устройство непрерывно анализирует изменение тока и выделяет участки нагрузочной характеристики, соответствующие смешиванию. При смешивании производится сравнение характеристики с записанной в памяти и центральному управляющему устройству передаются корректирующие действия. К таким действиям относятся увеличение дозы воды или песка, увеличение или уменьшение времени смешивания и др.

Данный метод имеет следующие преимущества: результаты корректировки не зависят от влажности компонентов смеси, время смешивания соответствует необходимому, исключено неполное перемешивание, за счет рационализации времени смешивания существенно экономится электроэнергия и уменьшается ее удельный вес в стоимости продукции, что приводит к значительной экономии, стоимость устройства не превышает 1000 долларов США. Недостатком метода является необходимость четкого определения нагрузочных характеристик привода для каждого типа смеси, а также зависимость от выработки и технического состояния смесителя. Однако эти недостатки устранимы путем исследования и измерения процессов производства смесей и введения дополнительных корректирующих коэффициентов. Кроме того, при производстве асфальтных смесей данный метод представляется единственно допустимым из-за невозможности применения других (прямых) способов.

УДК 531.708

## Автоматизация дозирования сыпучих материалов

Шардыко П. П., Климов С. Н.

Белорусский национальный технический университет

Автоматизированная система управления процессами приготовления исходных материалов на ОАО «Гомельстройматериалы» состоит из двух независимых систем - АСУ процессом приготовления шихтовых материалов и АСУ приготовлением связующих материалов. Обе системы построены по многоуровневому принципу

Верхний уровень систем реализован в виде пульта оператора и представляет собой свободно программируемый контроллер фирмы "Omron" с модулями входов и выходов, позволяющими принимать сигналы датчиков и отдавать команды на исполнительные устройства с напряжением постоянного тока 24 В. Программы, записанные в память контроллера обеспечивают отработку необходимого алгоритма работы участков, имеют возможность их корректировки и позволяют работать как в автоматическом, так и в полуавтоматическом режимах работы. Интерфейс пользователя реализован применением тактильного дисплея фирмы "Omron", что позволяет упростить работу оператора за счет отсутствия клавиатуры и ручного манипулятора.

Средний уровень систем организован в виде двух шкафов. Первый - шкаф электроавтоматики, в котором размещены весовые контроллеры, обслуживающие соответствующие дозаторы, а также устройство релейной автоматики, обеспечивающие необходимые блокировки. Второй - шкаф пускозащитной аппаратуры, в котором размещены электрические аппараты, обеспечивающие пуск, токовую и тепловую защиту исполнительных устройств технологического оборудования.

Нижний уровень систем состоит из комбинации датчиков, выключателей, исполнительных устройств на технологическом оборудовании обеспечивающих реализацию установленного технологического регламента, с целью унификации и упрощения обслуживания системы принят единый тип

бесконтактных выключателей, датчиков уровня выключателей конечного положения.

Для построения автоматизированной дозирующей весоизмерительной системы на базе контроллера, необходимо представить систему в виде взаимосвязанных компонентов.

В общем виде дозирующая весоизмерительная система, основанная на микроконтроллере, состоит из тензометрического датчика силы, аналого-цифрового преобразователя, микропроцессорного устройства вычисления массы, модуля дискретных входов-выходов, исполнительных механизмов. На рисунке 1 приведена структура весоизмерительной системы, основанной на контроллере.



Рисунок 1 – Структурная схема автоматизированной весоизмерительной системы

Следовательно, основными задачами, стоящими перед разработчиком являются: выбор измерительной схемы, элементной базы и разработка принципиальной схемы контроллера, которые обеспечивали бы точное определение веса при воздействии неблагоприятных внешних факторов. Важным фактором в автоматизированной системе дозирования сыпучих материалов является верный выбор и расчёт исполнительных механизмов, которые должны быстро и точно исполнять команды управляющего контроллера.

Исходя из структуры системы, большое значение уделяется выбору тензометрического датчика. Наиболее распространены тензорезисторные датчики силы [1]. Деформации в них определяют по изменению сопротивления тензорезисторов, укрепленных на упругом элементе. Простая технология изготовления, высокая чувствительность и точность измерения, относительно низкая стоимость обусловили широкое

распространение таких датчиков. Их основной недостаток – температурный дрейф нуля и рабочего коэффициента передачи, если не использованы специальные методы температурной стабилизации.

Использование микроконтроллера предоставляет возможность калибровки тензометрического датчика. Калибровка позволяет программно компенсировать нелинейность характеристик датчика и конструкции путем использования кусочно-линейной аппроксимации. Данные калибровочной таблицы, а также другие настраиваемые параметры системы хранятся в энергонезависимой памяти микропроцессора. Применение быстродействующего АЦП и RISC процессора позволяет производить обработку информации в реальном времени с высокой частотой съема информации с тензометрического датчика силы.

Разработанная система, полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям, поскольку она позволяет не только повысить производительность приготовления смесей, улучшить качество дозирования за счёт применения контроллера, сократить число работников, но и предоставляет гибкие возможности управления, быстрой перенастройки на производство продукции, состоящей из других компонентов. Благодаря трехуровневому построению АСУ появились возможности управления технологическим процессом по заданной программе, удалённого контроля работы системы. Ведение баз данных требуемых рецептов смесей позволило мгновенно изменять соотношение компонент.

Система автоматизирует большинство процессов дозирования в данной сфере производства, при этом использование автоматизированной системы прямым образом отражается на себестоимости и качестве продукции.

## **Литература**

1. Тензорезисторные датчики силы весов для технологического и коммерческого взвешивания. Технология регулировки их параметров / Годвиковский В.А. [и др.]. – М.: «Машиностроение», 1982.

**Выбор программной среды для графического обучения  
промышленных роботов**

Курьян Д. Н.

Белорусский национальный технический университет

Для повышения производительности подготовки управляющих программ для промышленных роботов (ПР) и снижения требований к подготовке технолога-программиста предложена концепция программирования ПР методом обучения на графических моделях [1].

Текст управляющей программы ПР на выбранном языке программирования формируется автоматически в процессе обучения ПР принудительным показом. Однако, показ осуществляется не на реальном ПР, а на его трехмерной графической модели прямо на экране. Взятие запястья ПР рукой оператора и принудительное перемещение его в нужные положения имитируется захватом и протягиванием изображения курсором.

При реализации этой концепции встал вопрос выбора программной среды для графического моделирования структуры ПР.

Структуру любого манипулятора и другого механизма окружения можно представить комбинацией модулей всего трех типов: звенья, вращательные и поступательные кинематические пары. В свою очередь каждый структурный модуль можно представить одним набором компоновочных элементов. Получаем унифицированные модули. Можно предложить и единожды разработать такую базовую конструкцию этих модулей, что любая конкретная конструкция будет получаться из базовой чисто параметрически. Это означает, что нужная трансформация модуля осуществляется автоматически, без программирования и рисования, путем задания с клавиатуры требуемых размеров по указанному измерению. Т.о. мы получаем универсальный конструктор для сборки прямо на экране любых структурных моделей. Причем не только ПР и любого другого периферийного оборудования (станков, приспособлений, накопителей, транспорта и т.д.).

В качестве инструмента создания структурных модулей используется САПР общего назначения. Это позволяет при необходимости использовать в модели вместо структурных элементов сразу готовые конструктивные элементы и добиваться формы, полностью соответствующей оригиналу. Это может понадобиться, например, для точного анализа столкновений. Автоматическое отслеживание столкновений также заложено в упомянутых САПР.

Специализированные САПР для робототехнических комплексов (РТК) значительно отличаются от традиционных САПР. Они должны иметь возможность осуществлять моделирование геометрии, кинематики и динамики роботов, а также планировать траекторию манипулятора.

Существующие САПР РТК нашли широкое применение на производстве. Дадим сравнительную оценку наиболее характерных представителей таких систем.

Delmia/IGRIP (Interactive Graphics Robot Instruction Program) [2] представляет собой интерактивный инструмент для разработки, оценки эффективности и off-line программирования многокомпонентных роботизированных комплексов. IGRIP позволяет в конструировать РТК сварки, покраски, автоматизированного контроля и для ряда других областей применения.

Одной из широко распространенных на территории СНГ систем является САПР Robotax – совместная разработка кафедры автоматического управления БГУИР и фирмы Буран [3]. Robotax представляет собой систему сквозного проектирования РТК сварки, построенную на базе САПР Autocad фирмы Autodesk.

В настоящее время многие передовые фирмы-производители промышленных роботов, такие как Fanuc и Motoman, используют систему автоматизированного проектирования CATIA для создания роботов в виртуальной среде. Помимо задач проектирования РТК система CATIA также используется многими потребителями промышленных роботов. Например, BMW использует для решения задач выбора оптимального расположения и применения роботов в различных производствах.



С помощью базового пакета CATIA и ее многочисленных модулей-приложений можно проектировать роботы, создавать кинематические модели, задавать ограничения и т.д.

С помощью продукта SimDesigner, который встраивается в интерфейс CATIA, можно произвести динамический и прочностной анализ [3].

В рассмотренных системах обучение робота происходит путем программирования всех вариантов движения. Возможно также обучение путем геометрического построения траекторий, заданием границ и точек с дальнейшей привязкой к ним робота. Также есть возможность получить движение от точки к точке, в каждой из которых задано шесть координат.

Следует отметить, что большинство известных САПР РТК располагают библиотеками уже готовых структурных схемам как роботов, так других компонентов робототехнических комплексов, таких как транспортно-накопительные устройства, устройства ориентации и выдачи. Это значительно сокращает трудоемкость создания графических моделей и сцен конкретных РТК, разработки и отладки управляющих программ.

## **Литература**

1. Новичихин, Р. В. Концепция программирования роботов на графических твердотельных моделях / Р. В. Новичихин, Д. Н. Курьян, А. Н. Дербан // Наука – образованию, производству, экономике: материалы четвертой международной науч.-техн. конф. в 2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол. Б. М. Хрусталева [и др.]. – Мн.: БНТУ, 2006. – Том 1. – С. 110–113.

2. Мачульский, И. И. Робототехнические системы и комплексы / И. И. Мачульский. – М.: Транспорт, 1999.

3. Комплекс программных средств «Роботах» для автоматизации проектирования сварочного производства/ Н. С. Куркин, Е. П. Кукареко, А. П. Пашкевич // Справочник. Инженерный журнал. – 1997. – № 1.

4. Голдовский П. А. Проектирование и моделирование промышленных роботов в системе CATIA. САПР и графика / П. А. Голдовский. – 2006. – № 4.

## Разработка автономного мобильного робота

Прокопович Г. А., Сычев В. А., Новичихин Р. В.  
Белорусский национальный технический университет

Целью научно-исследовательской работы является разработка базовой модели мобильного робота (МР), который служил бы единой основой для создания различных комплексов специального назначения. Кроме того, базовый комплект МР должен использоваться, в качестве универсальной экспериментальной установки для быстрого макетирования, исследования, испытания и доводки различных компоновок МР.

При разработке МР учитывался мировой опыт и наметившиеся тенденции.

Высокая мобильность и проходимость МР определяются, прежде всего, типом движителя. В 100 анализируемых моделях МР встречаются следующие решения по шасси: колеса (58%), гусеницы (36%), шагающий педипулятор (4 модели), катки (2), корпус - катящийся шар (1), корпус – шар со складывающимися лепестками (1), корпус – изгибающийся и «кувыркающийся» на присосках (1), толкающие рычаги – «кузнечик» (1), многосекционный корпус, перемещаемый по частям (1), воздушная подушка (1).

Основные решения по силовому приводу следующие: электродвигатели постоянного тока (95%), двигатель внутреннего сгорания, гибридный (ДВС – электрогенератор - электродвигатель). Соответственно, источниками энергии являются аккумуляторные батареи (70%) или топливо. Известны разовые случаи применения газотурбинного двигателя, солнечных батарей.

Управляются по радиоканалу 90% МР, 6% - по электрическому или опто-волоконному кабелю, остальные - чередуют или дублируют эти оба способа. Есть случаи управления лазерной ИК-системой.

Информационно-управляющая система обычно включает: телекамеры (переднего и заднего вида для вождения, обзорную, ближнего вида рабочей зоны манипулятора, иногда – вида реконфигурируемого или фронтального элемента шасси), датчики внутренней и внешней информации, средства

визуализации и обратной связи (монитор, шлем с индикацией, динамик, вибратор и др.), органы управления перемещением, манипуляциями, спецсредствами (пульт, джойстик, руль, шлем с датчиком поворота, экзоскелетон и др.), приемо-передающая аппаратура, управляюще-вычислительный комплекс (промышленный компьютер, ноутбук).

Другие характеристики МР: масса до 150(65%) – 800(30%) кг, скорость 1- 20 км/ч, автономность 1-7 ч.

В результате анализа мирового опыта и располагаемых возможностей была разработана конструкция базового МР для исследования, отработки вариантов и комплектования различных модификаций для практического применения.

Особенностью конструкции МР является его многофункциональность, модульность, трансформируемость, внутреннее очувствление.

Основой всех модификаций МР служит унифицированная одноосная транспортная секция с встроенными в каждую ступицу оси индивидуальным электроприводом.

На ступицу оси можно установить колесо, гусеничный каток, звездочку, шестерню или рычаг.

Комплект стыковочных узлов секций позволяет комбинировать различные варианты их соединения:

- жесткое соединение (рама),
- поступательное вертикальное соединение (ступенчатая или подрессоренная рама),
- телескопическое горизонтальное соединение (рама с переменной базой),
- шарнирное соединение (седельный, ломающийся или скручивающийся прицеп),
- приводное подвижное соединение («ломающаяся» рама).

Последний случай предназначен для резкого уменьшения габаритов и радиуса поворота МР в труднодоступных местах, для изменения геометрии гусениц при преодолении препятствий типа «бордюр», «ступеньки» и «барьер», для смещения края опорной поверхности относительно центра тяжести МР при преодолении препятствий типа «склон» и т.д. Для изменения взаимного углового положения секций используются электроприводы осей самих секций. Каждая секция может

использоваться чисто как движитель, дополнительно нести источник энергии для себя и всех остальных секций, нести спецоборудование.

Относительная автономность секций, их вариантность исполнения, переменное количество и произвольный способ стыковки позволяют компоновать все известные, а также гипотетические схемы МР.

Помимо самоходного шасси на базе секций в механическую подсистему базового МР также входит:

- энергетические модули (аккумуляторный и гибридный),
  - универсальная грузовая или монтажная платформа для спецоборудования,
  - съемный бортовой манипулятор,
  - магазин сменных рабочих органов для манипулятора.
- ориентировочные характеристики базового МР:
- грузоподъемность тележки – 120 кг,
  - грузоподъемность манипулятора – 2,5 кг,
  - время автономной работы – 2-5 ч,
  - скорость перемещения – 0,5...20 км/ч,
  - радиус действия – 100 м (кабель), 5 км (радио),
  - привод – электрический постоянного тока,
  - источник энергии – аккумуляторные батареи,
  - движитель – колесный, гусеничный, рычажный, комбинированный, (в том числе и с изменяющейся геометрией).

В настоящий момент создан действующий макет МР в уменьшенном масштабе. Основной задачей исследований на макете является проверка и отладка программного обеспечения и аппаратной части системы управления МР. Система управления уже показала свою работоспособность и справляется со следующими задачами: прием задания на конечную цель маршрута, поиск и отработка маршрута по электронной карте и визуальным маркерам-ориентирам, распознавание образов по изображению от бортовой телекамеры, составление плана незнакомой сцены (местности), самостоятельное планирование маршрута в условиях препятствий.

УДК 001: [37+658+338] (063)

**К вопросу компактного описания  
руководства пользователя программных средств**

Бугай О. В., Юденков В. С.\*

Белорусский национальный технический университет  
Белорусский государственный технологический университет\*

Часто при создании различного рода учебно-методических пособий их авторы сталкиваются с проблемой нехватки планируемого листажа для изложения требуемого материала. При этом существенная доля объема пособия приходится на описание особенностей использования программных инструментальных средств. Для компактного описания подобных руководств пользователя предлагаем воспользоваться следующими условными обозначениями:

имя исходного пункта: - Окно Browser;, Menu;, Панель Diagram и т.д.  
RClick – нажатие правой кнопки мыши;  
DbClick – двойной щелчок мышью;  
LClick\_V – при нажатой левой кнопке мыши;  
LClick\_^ – отпустить левую кнопку мыши;  
[имя кнопки] – нажать кнопку с заданным именем;  
-> – выбрать;  
= – присвоить значение;  
<- – присвоить принятому по умолчанию новое значение;  
<текст> – описание параметра, опции, значения и т.д.;  
{вариант1} | вариант2 | ...} – альтернатива;  
1 { }• - итерация от 1-го до n раз;  
( ) – необязательный элемент (параметр).

С использованием этих обозначений можно инструкцию к построению диаграммы последовательности. в среде Rational Rose свести в табл. 1.

Операции, связанные с построением диаграммы  
последовательности и рекомендации по их выполнению

Таблица 1

Операция	Рекомендуемая последовательность действий, примечания
1	2
1. Создание диаграммы последовательности	Окно Browser: <Значок реализации прецедента> → RClick → New → Sequence Diagram → New Diagram ← = <Требуемое имя диаграммы последовательностей>
2. Создание объектов в диаграмме последовательности	Окно Browser: <Значок реализации прецедентов> → DbClick – откроется окно диаграммы → 1{Окно Browser: <Требуемый объект> → Click_ Y → Окно диаграммы: Click_ ^   <Diagram> → [Object] → Окно диаграммы: Click → <New Object> ← = <Требуемое имя>}. – повторить для всех объектов сценария
3. Создание сообщения в диаграмме последовательности	1{Панель Diagram: [Object Message] → Окно диаграммы: <Объект-источник> → Click_ Y → <Объект-приемник> → Click_ ^ → <Линия сообщения> → DbClick → Message Specification → Name = <Текст сообщения> → [OK]}. – повторить для всех сообщений
4. Связывание объекта диаграммы последовательности с классом	Окно Browser: <Требуемый класс> → Click_ Y → Окно диаграммы: <Требуемый объект> → Click_ ^
5. Связывание диаграмм	Панель Diagram: [Note] → Окно диаграммы: <Требуемая позиция> → Click → Окно Browser: <Элемент для ссылки> → Click_ Y → Окно диаграммы: <Объект-приемник> → Click ^
6. Следование по ссылке	Окно диаграммы: <Требуемая ссылка-примечание> → DbClick

Компактное представление оценивания бизнес-процессов средствами VPwin может быть выполнено также с помощью этого подхода. К примеру, во фрагменте таблице № 2 показаны типичные операции выполнения стоимостного анализа.

Таблица 2

Операция	Рекомендуемая последовательность действий, примечания
1. Стоимостный анализ (ABC)	ABC (Activity Bases Costing) – может проводиться только тогда, когда создание модели закончено
1.1. Открытие модели и начальные установки	Меню: File → Open = <Модель, подлежащая оценке> → Model → Model Properties... → Model Properties → Display → [ABS data] → [Cost] → ABS Units – устанавливаем единицы измерения денег и времени
1.2. Описание центров затрат	Меню: Model → Cost Center Editor → I{Cost Center = <Имя статьи расхода> → Definition → <Описание статьи расхода> → [Add]}• – повторяем для всех статей расхода → [Close]
1.3. Задание стоимости работ (с самого нижнего уровня декомпозиции)	<Выбранная работа> → RClick → Costs = <В окне диалога вносим расходы по статьям (Cost Centers), частоту проведения работы (Frequency) и продолжительность (Duration)>
1.4. Задание режима подсчета затрат по работе	I{[Compute from Decompositions] – автоматический   [Over ride Decompositions] – вручную}•
1.5. Получение отчета по стоимостному анализу	Меню: Tools → Reports ► → Activity Cost Report

Такой подход позволяет создавать не только более компактные, но и более удобные для пользователя инструкции по работе с программными средствами. В частности, подобное описание работы в CASE – средствах AllFussion Process Modeler, AllFussion Erwin Data Modeler и Rational Rose можно представить в текстовом документе в 1,5 печ. лист.

УДК 004.432 (035)

## Проблемы распознавания символов на изображении и алгоритмы для их решения

Политыко Э. Д.

Рассматривается алгоритм OCR (оптического распознавания символов), предназначенный для распознавания последовательностей символов (цифр, букв, знаков) на изображении, поступающем в компьютер через WEB-камеру, либо любое другое устройство в форматах bmp, jpg, png, tif, gif. Распознавание базируется на синтезе шаблонов и последовательном сравнении их с объектом распознавания (образцом) и вычислении оценки надежности распознавания и производится, как и обычно, после процесса бинаризации изображения.

Алгоритм был использован для решения задач определения номеров автомобилей (Задача 1) и в системе слежения за местностью (Задача 2).

Задача 1 известна как задача ANPR (Automatic number plate recognition) или LPR, ALPR, AVI, CPR. Связанные с ней вопросы хорошо освещены в <http://www.licenseplaterecognition.com/> и [http://en.wikipedia.org/wiki/Automatic\\_number\\_plate\\_recognition](http://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_number_plate_recognition)

Специфика Задачи 2:

- размеры и координаты мест (ячеек), где символы могут быть расположены на изображении, известны;
- количество символов и их размещение в ячейках неизвестно;
- фон, на котором располагаются символы случайный.

Синтез шаблонов – интерактивный процесс. Синтезируется два множества шаблонов. Шаблоны обоих множеств строятся на основании изучения и трансформации целей (содержимого ячеек). Процесс построения множества I – итеративный.

Предположим, что имеется  $N$  изображений для изучения.

1. Извлечь все цели из первого изображения, содержащие различные символы.
2. Извлечь цели из других изображений, чтобы получить полное множество возможных символов.



3. Построить множество 2: обработать извлеченные цели – заменить лишние черные пиксели белыми, недостающие белые заменить черными, чтобы получить идеализированное изображение. Присвоить им индексы, соответствующего символа.

4. Положить  $k = 1$ .

5. Построить множество 1 в нулевом приближении:

- a. Произвести минимальную обработку целей, убирая некоторые черные пиксели и добавляя белые.
- b. Присвоить им индексы соответствующего символа.
- c. Если имеются цели, являющиеся шумом на изображении #  $k$ , то добавить их к множеству шаблонов после редактирования: стараться сохранить общие черты и удалить специфические.
- d. Присвоить им индекс «Шум».
- e. Если нет целей, являющихся шумом на изображении #  $k$ , то положить  $k + = 1$  и перейти к шагу 5с.

6. Добавить шаблоны с шумом к множеству 2.

7. Выполнить оценку шаблонов для всех  $N$  изображений и добавить новые шаблоны к множеству 1, а новые шаблоны с шумом также и к множеству 2.

Оценка проводится путем сравнения шаблонов с целями и выбора двух шаблонов, дающих наилучшее совпадение. Назовем их соответственно "первым наименьшим" и "вторым наименьшим".

Несколько рекомендаций по генерации множеств шаблонов:

- все шаблоны с одинаковым индексом должны быть попарно различными в достаточной степени;
- каждый новый шаблон следует проверять на всем множестве изображений;
- если шаблон используется при распознавании только как второй наименьший и разница между результатами сравнения первого и второго шаблонов с целями больше, чем некоторый наперед заданный порог, второй шаблон удаляется. Если разница меньше порога, второй шаблон удаляется, но следует повторить распознавание. Если появляются ошибки, шаблон следует вернуть.

Построенные таким образом множества шаблонов можно применить для распознавания.

Принятие решения при распознавании:

- если результат соответствует индексу шум, перейти к следующей цели;
- в случае совпадения индексов первого и второго шаблонов, принимается этот индекс;
- если разница в оценке первого и второго минимального больше заданного порога, принимается индекс первого шаблона;
- в случае, когда не выполняются перечисленные выше условия, проверить цель на втором множестве шаблонов и принять индекс, полученный в результате сравнения.

УДК 621.824:51

**Анализ механических систем с неголономными связями**

Лапанович И. О.

Белорусский национальный технический университет

Механизмы представляют собой несвободные системы. Динамика таких систем определена не только характером изменения действующих сил, масс, их начальных состояний, но и свойством связей.

Среди множества задач динамики, при ее современном состоянии, менее изученную область представляют задачи динамики механизмов с неголономными связями.

Влияние связей на динамические процессы, форма их описания и средства реализации приковывали пристальное внимание ученых с момента зарождения механики как науки. Лагранж, используя понятие связи в виде преодолимого препятствия, описанного аналитически условным уравнением, смог учесть связи не только в конечной, но и в дифференциальной неинтегрируемой форме, природа которых была выявлена столетие спустя. На протяжении 19 века в результате интенсивного изучения в механике было выявлено такое множество различных связей, что возникла необходимость введения понятий как голономных связей, описываемых уравнениями в конечной форме, так и неголономных, уравнения которых, кроме координат содержат еще и производные по времени.

Исследования начала 20 столетия углубляют понятие связи, затрагивая природу, способ и средства их реализации. Внимание ученых привлекают системы, связи в которых осуществляются за счет сил различной природы, сил сжатого воздуха, сжимаемой жидкости, сил мышц живого организма, электромагнитных сил и так далее. В результате в аналитическую механику вводится понятие контактных связей, осуществляемых с помощью непреодолимого препятствия, и сервосвязей, реализация которых требует использования вспомогательных источников энергии, автоматически вступаемых в действие и реагирующих так, чтобы непрерывно поддерживалась необходимая конфигурация.

Во второй половине 20 столетия особое значение приобретают сложные системы, предназначенные для управления на расстоянии таких объектов, как управляемые снаряды, ракеты, космические корабли. Это потребовало дальнейшего развития понятия связей. Управляемый процесс сложных систем, участвующих в комплексе различных форм движения, рассматривается с позиций неголономной механики и кибернетики. Аналитически движение таких систем описывается программой, составленной с учетом электродинамики, магнитодинамики, термодинамики и так далее. Программа проявляется в виде связей, наложенных на параметры, определяющие положение системы в любой момент времени, и реализуется с помощью различных средств управления. Связь, аналитически выраженная уравнением, которое описывает целенаправленную программу определяется как управляемая связь. Распространяя, таким образом, методы классической механики на современные системы управления движением, предлагается изучение механических моделей систем управления движением, программных движений и отклонений от них объединять под общим названием «Механика управляемого тела». Таким образом, вид связей – существенный признак, который объединяет и разделяет большие группы машин, механизмов и систем для реализации управляемого движения. В технологической практике для достижения управляемого движения особый класс механизмов представляют механизмы с бесступенчато изменяемой первой кинематической передаточной функцией скоростей. Такие

механизмы нашли широкое применение для обеспечения заданных технологических параметров при изменяющихся условиях работы, поддержания заданной скорости при изменении рабочей нагрузки, реализации полной мощности двигателя при переменных параметрах рабочего процесса.

Алгоритм управляющего воздействия для таких механизмов может быть сформирован только на основании знания особенностей объектов управления, описанных аналитически. Главной особенностью рассматриваемых механизмов является неголономность связей, которая установлена и описана для управляемой системы «двигатель – вариатор – рабочая машина». В качестве вариатора такой системы применяют обобщенный неимпульсный идеальный вариатор. Кинематическая передаточная функция в уравнении связи для такого вариатора задается либо непосредственной функцией времени либо, для систем с обратной связью, функцией угла поворота звена приведения, то есть минуя регулировочную характеристику. Соответственно, уравнения движения приобрели общую структуру и стали справедливы для системы с любым типом вариатора, если он вносит одну степень свободы при одном условии неголономной связи. Следует отметить, что все существующие схемы вариаторов преобразуют вращательное движение на входе во вращательное движение на выходе, вносят одну степень свободы при одном условии неголономных связей.

К этому же классу неголономных механизмов следует отнести валико-кольцевые механизмы (ВКМ), которые преобразуют вращательное движение в возвратно-поступательное. Для своего описания ВКМ требует четыре обобщенных координаты, две из которых независимы, две других связаны уравнениями неголономных связей. Соответственно динамика движения таких механизмов может быть исследована на основе двух уравнений. Результирующие уравнения движения представляют собой дифференциальные уравнения с переменными коэффициентами. Анализ структуры уравнений позволяет сделать вывод, что динамику процесса движения механизмов с неголономными связями определяют не только массы, действующие силы, но и закон изменения первой кинематической функции, а также скорость ее изменения.

**Автоматизированный метод расчета динамических систем,  
удовлетворяющих заданным требованиям качества**

Осипян А. И., Несенчук А. А.

Объединенный институт проблем информатики  
НАН Беларуси

Задача анализа и синтеза систем автоматического управления (САУ) объектами, параметры которых могут варьироваться в широких пределах, является одной из основных и наиболее сложных задач теории управления. В настоящей работе с целью обеспечения качества подобных систем используется корневой подход [1–3], который по своей природе предполагает вариацию параметров и позволяет выявить реакцию корней на те или иные изменения параметров.

Рассмотрим динамическую систему, которая описывается семейством характеристических полиномов

$$p(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n, \quad (1)$$

где  $a_j(k)$  – коэффициенты, определенная часть которых или все линейно зависят от некоторого изменяющегося параметра системы  $k$ , который может быть как вещественным, так и комплексным,  $j = \overline{1, n}$ ,  $k \in (\overline{k}, \overline{k})$ ,  $s = \sigma + i\omega$ ,  $k = u + iv$ .

Назовем параметр  $k$  свободным параметром или параметром годографа (траектории).

Определим область  $Q$ , ограничивающую возможное расположение корней характеристического уравнения (1) (параметры качества) линиями  $L_{\eta}^+$ ,  $L_{\eta}^-$  равной степени устойчивости и  $L_{+\beta}$ ,  $L_{-\beta}$  постоянного демпфирования, в которой система будет обладать свойством  $Q$ -устойчивости (рис. 1). Задача синтеза сводится к расположению корней характеристического уравнения в заданной области  $Q$ , а именно, в определении такой области  $D$  значений неопределенного параметра  $k$ , при которых корни этого уравнения располагаются внутри области  $Q$ . Для решения задачи применяются поля корневых траекторий кругового образа (ПКТКО) [1], разрабатывается автоматизированный метод локализации корней (1) в области  $Q$ .

Запишем в общем виде уравнение линий уровня поля корневых траекторий кругового образа [1],

$$f^*(\sigma, \omega, a, b) = r^2, \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $r$  – координаты центра и радиус окружности-образа.

Поскольку функция (2) реализует конформное отображение [1], заданные окружности-образы будут отображаться на плоскость  $s$  в форме замкнутых кривых (ветвей корневого годографа кругового образа (КГКО) [1–2]), в количестве, не превышающем порядок  $n$  системы. Эти кривые ограничивают соответствующие им области локализации корней, которые можно определенным образом располагать в плоскости  $s$ , меняя положение центра  $C$  и радиус  $r$  окружности-образа. Поэтому, определив радиус  $r$  дисковой области  $D$ , отображение которой на плоскость  $s$  полностью располагается в заданной области  $Q$ , обеспечим тем самым решение задачи расположения корней системы в области  $Q$ . С этой целью необходимо

– расположить центры локализации поля КГКО [1] внутри заданной области  $Q$ ;

– определить максимально возможный радиус  $r_m$  дисковой области  $D$  значений свободного параметра системы, обеспечивающих расположение корней в заданной области  $Q$ .

Пусть центр окружности образа перемещается вдоль действительной оси плоскости  $u$  свободного параметра. Тогда отображение данного перемещения в плоскости корней представляет собой корневой годограф Теодорчика - Эванса (КГТЭ) [2]. Таким образом, вычислив КГТЭ и точки пересечения КГТЭ с границами области  $Q$ , определим интервал значений свободного параметра, при которых центры локализации поля будут находиться внутри области  $Q$  (см. точки  $p_1 - p_{11}$  на рис. 1).

Расположение корней системы в области качества выполняется путем вписывания линии уровня ПКТКО в эту область, т. е. отыскания такой линии уровня  $L$  (рис. 2), которая полностью принадлежала бы заданной области качества и которой соответствует окружность-образ максимально возможного радиуса, ограничивающая искомую область  $D$ . Для нахождения максимального радиуса найдем точки касания графика функции (2) с границей области  $Q$  посредством

совместного решения уравнения касательной к кривой (2) и уравнений границ  $L_{+\beta}$ ,  $L_{-\beta}$ , а также  $L_{\eta'}$  и  $L_{\eta''}$ . Искомая точка касания обозначена на рис. 2 как  $p_4$ .

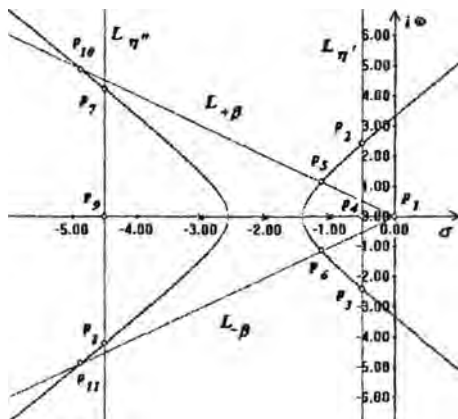


Рисунок 1. Пересечение КГТЭ с границами области  $Q$

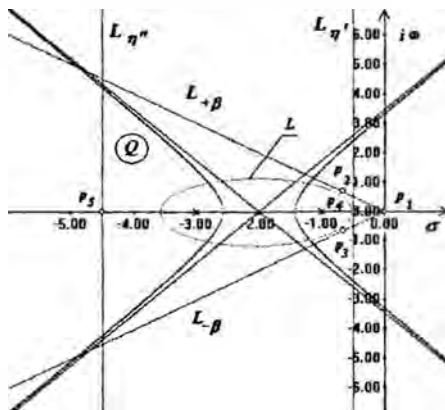


Рисунок 2. Точки касания линий уровня ПКТКО с границами области  $Q$

Для решения задачи в автоматизированном режиме разработана программа ПКТ, которая позволяет отображать корневые годографы и поля корневых траекторий различных

типов, а также выполнять параметрический синтез линейных систем на основе корневого метода с использованием полей КГКО. Программа написана в среде MS Visual Studio 2005.

Автоматизированная система синтеза САУ обладает следующими возможностями.

1. Построение полей корневых траекторий САУ.
2. Оценка параметров устойчивости и качества САУ.
3. Определение области допустимых значений переменных параметров системы, обеспечивающих заданное качество.

Для реализации машинного метода построения корневых годографов и полей корневых траекторий в системе заложены следующие функции:

1. Базовые функции работы с динамическими векторами и матрицами комплексных чисел (сложение, вычитание умножение и др.).

2. Функция нахождения всех корней полинома с вещественными и комплексными коэффициентами, реализующая метод Лагуэра. Метод обеспечивает быструю сходимость, позволяет находить как вещественные, так и комплексные корни полиномов. Метод прост в реализации.

3. Функции оценки устойчивости системы:

- а) функции нахождения точек пересечения корневых годографов с прямыми;

- б) функции нахождения точек касания графиков функция и заданных кривых.

Система легко расширяема, т. е. в нее можно закладывать новые алгоритмы по мере их разработки и может быть применена как настольное приложение инженера-разработчика САУ.

## Литература

1. Несенчук, А. А. Анализ и синтез робастных динамических систем на основе корневого подхода / А. А. Несенчук. – Мн., 2005.
2. Римский, Г. В. Автоматизация исследований динамических систем / Г. В. Римский, В. В. Таборовец. – Минск, 1978.
3. Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. – М., 2004.



УДК 378:618.3

**Разработка WEB-приложения анализа колебаний  
двухмассовой модели**

Лю Пэн, Гурская А. Н.

Белорусский национальный технический университет

### 1. Введение

Web-проекты – это приложения, удовлетворяющие интерактивным требованиям. По мере развития Internet происходит переход от статических страниц к динамическим. Существует большое количество технологий, позволяющих создавать динамические Web-сайты: ASP, Java, Perl, PHP, Python.

В настоящее время появилась новая технология для разработки интерактивных Web-приложений, т.н. AJAX-технология, которая приобретает все большую популярность в мире Internet технологий. Эта технология подразумевает совместное использование перечисленных выше технологий. В результате обеспечивается более эффективная работа Web-приложения.

В данной работе представлена сравнительная оценка реализации WEB-приложения, использующего классическую схему построения и схему, реализующую AJAX-технологии. В качестве примера рассматривается динамическая модель двухмассовой колебательной системы.

### 2. Описание модельной задачи

В качестве объекта исследования выбрана двухмассовая колебательная система, расчетная схема которой приведена на рисунке 1.

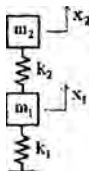


Рисунок 1. Расчетная схема модели

Предположим, что массы соединенные с основанием и друг с другом пружинами с коэффициентами жесткости соответственно  $k_1$  и  $k_2$  могут двигаться только в направлении оси  $x$  и, что в системе отсутствуют как трение, так и другие виды сопротивления. В качестве координат, определяющих движение системы, возьмем перемещения  $x_1$  и  $x_2$  масс от их положений статического равновесия, при которых отсутствуют деформации в пружинах. В общем случае к массам  $m_1$  и  $m_2$  могут быть также приложены возмущающие силы, описываемые функциями  $Q_1 = F_1(t)$  и  $Q_2 = F_2(t)$ .

Уравнения движения данной системы имеют вид:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= -k_1 x_1 + k_2 (x_2 - x_1) + Q_1, \\ m_2 \ddot{x}_2 &= -k_2 (x_2 - x_1) + Q_2. \end{aligned} \quad (1)$$

Для исследования свободных колебаний этой системы положим  $Q_1$  и  $Q_2$

Общее решение уравнения (1):

$$\begin{aligned} x_1 &= r_1 B_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + r_2 B_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2), \\ x_2 &= B_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + B_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2). \end{aligned} \quad (2)$$

Четыре произвольных постоянных интегрирования в (2)  $B_1, B_2, \varphi_1, \varphi_2$  можно найти, рассмотрев четыре начальных условия для перемещений и скоростей обеих масс в момент времени  $t = 0$ .

### 3. Реализация WEB-приложение моделирования колебаний двухмассовой системы

Для анализа колебаний двухмассовой системы (см. рисунок 1) было разработано WEB-приложение, вид которого приведен на рисунке 2.

Как видно, приложение позволяет в интерактивном режиме изменять параметры модели, производить расчеты положения колеблющихся масс во времени, сохранять результаты и

производить визуальное наблюдение за динамическим объектом.

Данное приложение программно было реализовано по двум схемам:

- 1) по схеме классического WEB-приложения,
- 2) по технологии AJAX.

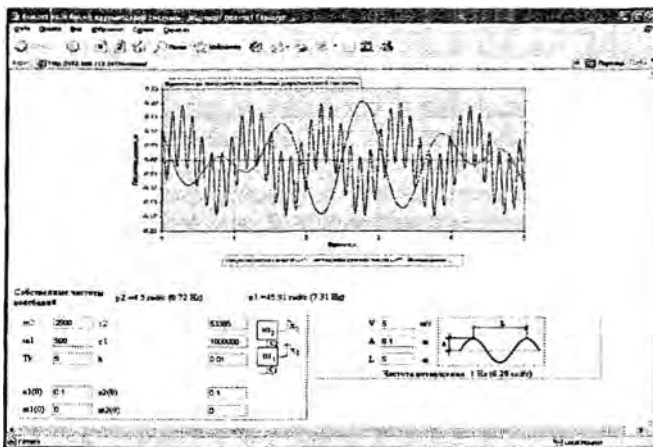


Рисунок 2. Вид WEB-приложения

#### 4. Заключение

Рассмотренная задача, являясь тестовым примером анализа колебательных процессов, была решена с помощью двух программных реализаций: по классической схеме построения WEB-приложения и с учетом AJAX-технологии. В результате проведенного вычислительного экспериментального сравнительного анализа по критерию быстродействия работы двух приложений установлено, что классическое приложение примерно в два раза уступает AJAX-приложению.

**Интеллектуальные САБ:  
состояние и перспективы**

Слабко Ю. И., Фурунжиев Р. И.

Белорусский национальный технический университет

***1. Введение***

Для повышения безопасности движения транспортных средств (ТС) при различных погодных условиях, на дорогах с различным типом микропрофиля, при различных коэффициентах сцепления, внезапных изменениях дорожной ситуации, а так же действий водителя служат системы активной безопасности (САБ) ТС.

САБ представляют собой системы, оснащенные устройствами управления с обратной связью, и работающие совместно с антиблокировочной системой (АБС) и/или противобуксовочной системой (ПБС).

Задачей САБ (такой как АБС и ПБС) является поддержание тормозящего или ведущего колес в режиме оптимального относительного скольжения, при котором продольный коэффициент сцепления шины с опорной поверхностью находится в наиболее благоприятном диапазоне. Данная задача состоит из двух этапов:

- идентификации момента наступления события, приводящего к проскальзыванию или блокированию опорного элемента;
- определения управляющих воздействий на исполнительные механизмы с целью обеспечения проскальзывания/блокирования колес в допустимом диапазоне не зависимо от состояния внешней среды или действия водителя.

Для решения данной задачи САБ включают:

- датчики (сил/моментов, угловых скоростей колес, замедления корпуса машины, поворота рулевого колеса, абсолютного вращения автомобиля и т.д.);
- блок управления, получающий информацию от датчиков, обрабатывающий ее и подающий команду на исполнительные механизмы;

- исполнительные механизмы (в АБС, ESP - модуляторы давления рабочего тела тормозной системы, в ПБС - устройства, воздействующие на подачу топлива, зажигание, тормозную систему и др.).

### **Основные процессы управления с обратной связью АБС**

При первоначальном торможении давление в приводе возрастает; величина скольжения колеса в пятне контакта с дорогой увеличивается и достигается граница устойчивого и неустойчивого диапазонов качения колес. Начиная с этого момента, любое дальнейшее увеличение давления в приводе или тормозного момента не вызывает какого-либо дальнейшего повышения величины тормозной силы ( $F_T$ ). В устойчивом диапазоне скольжение колеса является скорее деформационным скольжением, оно имеет возрастающую тенденцию в неустойчивом диапазоне.

Если в движении одного из колес появляются признаки блокировки, то резко возрастают замедление вращения колеса и его скольжение. Если они превышают критические значения, то блок управления посылает сигналы к соленоидному распределительному клапану для прекращения роста или уменьшения давления в тормозном механизме до прекращения опасности блокировки. Затем давление должно быть восстановлено для предотвращения недотормаживания колеса. Во время автоматического управления торможением необходимо постоянно определять диапазоны устойчивого и неустойчивого качения колес и модулировать тормозное давление, создавая максимальное тормозное усилие.

При разработке системы ABS принимают во внимание следующее: варианты сцепления между шиной и дорогой; неровности дорожного покрытия, вызывающие колебания колес и осей; тормозной гистерезис; изменения давления в главном тормозном цилиндре при воздействии водителя на педаль тормоза; изменения радиуса колеса, например, при установке запасного колеса.

Критерии качества управления: поддержание курсовой устойчивости во время управления автомобилем путем обеспечения достаточной величины поперечной силы сцепления на задних колесах; поддержание управляемости автомобиля

путем обеспечения достаточной поперечной силы сцепления на передних колесах; уменьшение остановочного пути по сравнению с торможением с заблокированными колесами; быстрое изменение тормозных моментов для различных коэффициентов сцепления, например, когда автомобиль движется через небольшие участки льда на дорожном покрытии; контроль низких амплитуд изменения тормозного момента в целях предупреждения вибраций в зубчатых передачах; высокий уровень комфорта движения. в результате незначительного влияния обратной связи на педаль тормоза и применения бесшумных исполнительных механизмов.

Однако в САБ, основанных на классическом кинематическом принципе, есть трудности с идентификацией кривой зависимости коэффициента сцепления – скольжения и определения точной линейной скорости. Этот фактор во многом определяет рабочий диапазон скоростей движения ТС. Хотя с другой стороны с каждым годом происходит совершенствование технической реализации, увеличение быстродействия исполнительных механизмов, повышение точности измерения угловой скорости вращения, оптимизации алгоритмов идентификации, что в целом приводит к улучшению качества работы. При этом используются сложные алгоритмы идентификации, при проектировании которых используется дорогостоящее оборудование. Сложность современных САБ обуславливает ее высокую стоимость. Она может составлять до 5...10 % стоимости самого автомобиля в зависимости от его класса, например 1000 евро за установку электронной программы стабилизации (ESP) даже европейцам дорого. Экономический аспект является одним из основных аспектов, определяющих темпы внедрения САБ. Поэтому актуальным является создание САБ на новых принципах функционирования.

Нами предложена САБ и новый подход по идентификации события, приводящего к блокированию/проскальзыванию шины относительно опорной поверхности, основанный на силовом принципе. Данный подход состоит в измерении датчиками сил первой производной фактического тормозного момента в контакте “колесо-опорная поверхность”.

На основании измеренных данных фактического тормозного момента  $M_f$  и производной фактического тормозного момента

$\dot{M}_f$  от датчиков, когда в произвольные моменты времени  $t_i$  тормозное давление в рабочем цилиндре  $p(t_i) > 0$  и  $\dot{p}(t_i) \geq 0$  (что соответствует нажатию, удерживанию водителем педали тормоза или усилением нажатия на педаль) наблюдаемая производная фактического тормозного момента  $\dot{M}_f$  падает до нуля, то в последующий момент времени  $t_{i+1}$ , когда  $\dot{M}_f < 0$ , наступает блокирование колеса. Данный момент служит сигналом к управлению исполнительными механизмами.

Предложенный подход позволяет проектировать САБ, базирующуюся на новом физическом принципе, обрабатывающую данные с датчиков сил/моментов и производных сил/моментов, позволяющую определять момент наступления проскальзывания / блокирования при движении мобильной машины в любых погодных условиях, при различном состоянии дорожного полотна и действии водителя, не прибегая к сложным алгоритмам идентификации и дорогостоящему оборудованию.

### Литература

1. Автомобильный справочник BOSCH. Первое русское издание. – М.: Издательство «За рулем», 2002.
2. Нефедьев, Я. Н. Конструкции и характеристики электронных антиблокировочных систем зарубежных фирм. Обзорная информация / Я. Н. Нефедьев. – М.: Научно-исследовательский институт информации автомобильной промышленности, 1978.
3. Pat. USA 5,135,290 Aug.4, 1992 and DE-OS 35 35 843. Cao Chi-Thuan, An Automatic Control System for Antilocking and Antiskid Applications.

**Особенности торможения троллейбуса с учетом идеальных  
и реальных условий эксплуатации**

Мазаник К. И.

Белорусский национальный технический университет

В данной работе исследуется влияние параметров подвески, шин и микронеровностей дороги на процесс торможения двухосного троллейбуса. Процесс торможения мобильных машин большинством авторов исследуется на гладкой дороге без учета характеристик подвески, шин и силы сопротивления воздуха. Вращающиеся детали трансмиссии учитываются коэффициентом вращающихся масс, который принимают равным  $1,03 \dots 1,05$  [1, 2]. В связи со сказанным, цель данной работы – выяснить, как влияют реальные условия эксплуатации троллейбуса.

Для проведения исследования разработана математическая модель, позволяющая проводить расчет как без учета (идеальные условия эксплуатации), так и с учетом параметров подвески, шин и характеристики дороги (реальные условия эксплуатации).

Следовательно, для идеальных условий приняты следующие допущения:

- идеально гладкая дорога без учета микронеровностей;
- характеристики подвесок (жесткости и демпфирование) троллейбуса не учитываются;
- характеристики шин (жесткости и демпфирование) троллейбуса не учитываются;
- характеристики трансмиссии (крутильные жесткости, демпфирование и моменты инерции вращающихся частей) троллейбуса не учитываются;
- сопротивлением воздуха пренебрегаем.

При движении троллейбуса в реальных условиях эксплуатации учитываются:

- дорога имеет реальные микронеровности;
- характеристики подвесок и шин (жесткости и демпфирование) троллейбуса;



- крутильные жесткости, демпфирование и моменты инерции вращающихся частей трансмиссии и тягового электродвигателя троллейбуса;
- сопротивление воздуха.

В качестве объекта исследования был выбран троллейбус модели АКСМ-321 (РУП «Белкоммунмаш», г. Минск), который имеет следующие технические характеристики:

- полная масса 18000 кг;
- распределение масс по мостам: передний 6000 кг, задний 12000 кг;
- поддрессоренная масса 16200 кг;
- неподдрессоренная масса переднего моста 650 кг, заднего моста 1150 кг;
- суммарная жесткость подвески передних колес 1177,2 кН/м, задних колес 2354,4 кН/м;
- суммарная жесткость шин передних колес 9947,3 кН/м, задних колес 21425,0 кН/м;
- приведенные к ведущим колесам моменты инерции полуосей, дифференциала, колесной передачи и колес 140 кг·м<sup>2</sup>, тягового электродвигателя, карданного вала и главной передачи 1300 кг·м<sup>2</sup>.

Анализ результатов исследования для идеальных условий (сухое асфальтобетонное покрытие) показал, что при экстренном торможении троллейбуса с начальной скорости 40 км/ч тормозной путь составил 15,1 м, а максимальное замедление при торможении 7,2 м/с<sup>2</sup>. При этом через 1,2 с тормозные силы на передних колесах достигли своих максимальных значений по сцеплению (удельная тормозная сила  $\gamma_1 = 0,8$ ), а на задних колесах не достигли, что обеспечивает устойчивость движения троллейбуса в данных условиях эксплуатации. В этих условиях троллейбус обеспечивает заложенные в нормативной документации показатели безопасности дорожного движения.

Аналогичные исследования были проведены для реальных условий эксплуатации троллейбуса. Анализ показал, что тормозной путь увеличился на 35% за счет учета моментов инерции вращающихся масс колес, трансмиссии и тягового электродвигателя, торможение двигателем отключено. Также в трансмиссии возникает колебательный процесс. Поэтому для

обеспечения нормативных требований необходимо использовать при торможении троллейбуса перевод двигателя в тормозной режим. Это показывает реальные отличия торможения троллейбуса от прочих мобильных машин с двигателем внутреннего сгорания, у которых при торможении двигатель может быть отсоединен от трансмиссии.

Таким образом, учет реальных условий эксплуатации значительно усложняет математическую модель движения троллейбуса при торможении, однако позволяет приблизить результаты аналитического расчета к экспериментальным данным. Так, при моделировании реальных условий эксплуатации тормозной путь увеличился с 15,1 до 21,0 м (на 39%) максимальное замедление снизилось на 37 %. При этом количество уравнений увеличивается на 45%.

Итак, можно сделать следующие выводы.

1. Необходимо учитывать реальные условия торможения троллейбуса, особенно моменты инерции колес и тягового электродвигателя.

2. Для обеспечения нормативных требований необходимо использовать при торможении троллейбуса перевод двигателя в тормозной режим.

3. Учет микронеровностей дороги, характеристик подвески и шин оказывает незначительное влияние на торможение.

## **Литература**

1. Гришкевич, А. И. Автомобили: Теория / А. И. Гришкевич. – Мн.: Вышэйшая школа, 1986.
2. Литвинов, А. С. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств / А. С. Литвинов, Я. Е.. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1989.

УДК 621.5

## Микропроцессорная система управления двигателем переменного тока

Новиков С. О.

Белорусский национальный технический университет

Вопрос о возможности управления двигателем переменного тока не просто актуален, он жизненно необходим любой промышленной системе. Ведь снижение энергозатрат на эксплуатацию таких машин значительно облегчит жизнь экономике многих стран, т.к. вес энергопотребления в секторе двигателей переменного тока составляет не менее 70% от всего энергопотребления современного общества.

Таким образом, чисто программно, мы могли бы реализовать частотное управление двигателем переменного тока. Микроконтроллер обрабатывая информацию с датчиков будет выдавать управляющие коды согласно необходимой программе движения.

$U_{\text{вых}} = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ , но  $\omega = 2\pi f$ , а  $f = 1/T$  следовательно

$$U_{\text{вых}} = U_m \sin(2\pi t / T + \varphi).$$

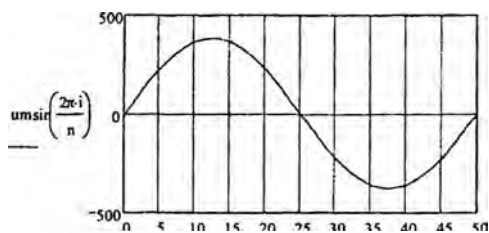


Рисунок 1. Период функции синуса

Рассмотрим приведенный выше рисунок. На нем изображен один период функции синуса. Разделим весь период  $T$  на  $n$  равных частей. Пусть некоторая переменная  $i$  принимает значения  $i = [0 \dots n]$ , тогда длительность каждого  $i$ -го промежутка равно  $i \cdot \Delta t$ , а длительность всего периода  $T = n \cdot \Delta t$ ,

где  $\Delta t$  – есть длительность единичного промежутка;  $U_m$  – максимальное значение напряжения. Пусть в некоторой точке  $K$  максимальное значение напряжения будет  $U_x$ , период для этого напряжения --  $T_x$ , тогда  $T_x = x \cdot \Delta t$ , где  $x$  – это новое, отличное от  $n$ , число частей на которое разбит период  $T_x$ . В связи с тем,

что  $x \leq n$ , нетрудно заметить, что отношение  $\frac{U_m}{U_x}$  равно  $\frac{T}{T_x}$ .

Рассмотрим  $U_x$  с точки зрения желаемого максимального напряжения в точке  $K$ , т.е его величина равна  $U_{вх}$  рис.1. Следовательно неизвестная величина  $T_x$  может быть найдена как:

$$T_x = T \cdot U_x / U_m.$$

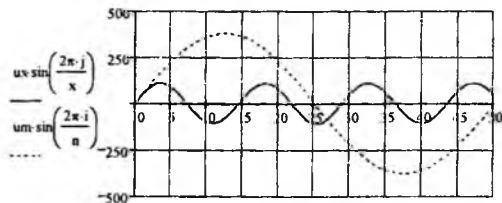
Но  $T_x$  – есть период новой функции в неизвестной точке  $K$ , следовательно его можно записать как:

$T_x = x \cdot \Delta t$ , тогда отсюда можно рассчитать количество шагов до этой неизвестной точки,  $x = T \cdot U_x / (U_m \cdot \Delta t)$ . Введем некоторую  $j$  равную  $j = 0 \dots x \cdot k$ , где  $k = U_m / U_x$ . Теперь выражение для  $U_{вых}$  можно записать так:

$U_{вых} = U_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot j \cdot \Delta t / (n \cdot \Delta t))$  – для периода  $T$  разделенного на  $n$  равных частей величиной  $\Delta t$ ;

И

$U_{вых} = U_x \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot j \cdot \Delta t / (x \cdot \Delta t))$  – для периода  $T_x$ , лежащего внутри периода  $T$ , в точке  $K$  разделенного на  $x$  равных частей величиной  $\Delta t$ .



i.i

Рисунок 2. Амплитудно-частотная модуляция сигнала

В предложенных выше размышлениях значение величины  $\phi$  принималось равным нулю исключительно для простоты. Таким

образом рассмотрена амплитудно-частотная модуляция при управлении двигателем переменного тока.

Предполагаемая структурная схема микропроцессорной системы смоделирована в программной среде CoDeSys.

Для моделирования рассмотрим простейшую структурную схему системы управления рисунок 3.

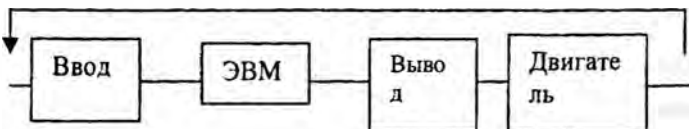


Рисунок 3. Структурная схема управляющей системы

Задачи по созданию программно-аппаратных комплексов были успешно реализованы автором в работах [1][2]. Базовым микропроцессором тогда был выбран КР580ИК80А, базовым микроконтроллером МС2702. Основным достоинством ранее созданной системы было то, что она максимально использовала в собственные возможности микроконтроллера и лишь для выдачи управляющего сигнала и считывания информации с датчиков использовалось дополнительное аппаратное обеспечение, управляемое программно от МК МС 2702 [2].

### Литература

1. Гайнутдинов, И. М. Микропроцессорная система управления на базе контроллера «Электроника МС2702» / И. М. Гайнутдинов [и др.] // Информационный листок о научно-техническом достижении. – Минск, 1989. – № 89.
2. Панасюк В.И., Лопатин Ю.В., Новиков С.О., Ясютин А.А. Разработка микропроцессорной системы управления на базе серийного контроллера «Электроника МС2702» / В. И. Панасюк [и др.]. – Материалы Республиканской научно-технической конференции БГУ им. Ленина – 1989.

**Экономико-математическая модель планирования  
распределения бюджетных средств между воинскими  
частями и подразделениями**

Житкевич А. П., Пашенко Е. А.

Белорусский национальный технический университет

Распределение финансовых средств между воинскими частями и подразделениями происходит следующим образом:

1. Каждая воинская часть ежегодно в октябре месяце формирует заявку на финансирование на следующий год и отправляет ее в вышестоящий орган.
2. Распорядители средств сводят заявки от подчиненных воинских частей и передают их далее.
3. Финансово-экономическое управление Министерства Обороны формирует общую заявку и предоставляет ее в Министерство Финансов.
4. В Министерстве Финансов, как правило, происходит перераспределение финансовых средств, то есть изменение сумм, направляемых определенным воинским частям по статьям расходования. При этом почти всегда происходит уменьшение бюджета по сравнению с запрашиваемыми значениями.

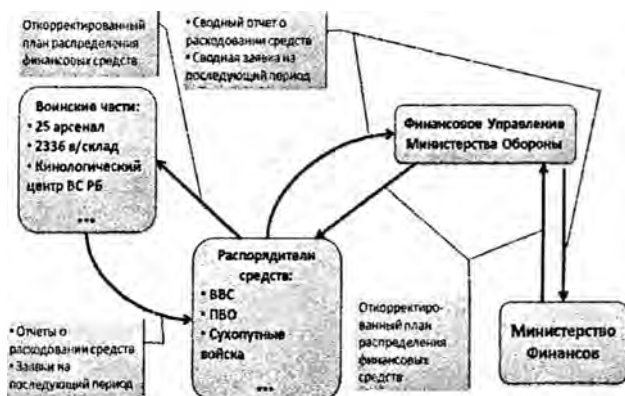


Рисунок 1. Схема распределения финансовых средств

5. При изменении финансирования в Финансово-экономическом управлении Министерства Обороны возникает задача поиска наиболее эффективного варианта перераспределения средств.
6. В воинские части представляется конечный вариант плана назначения финансовых средств на год.

На сегодняшний день в процессе перераспределения финансовых средств существует ряд сложностей. Их источником является ручная обработка данных, почти полное отсутствия автоматизации. При больших объемах информации практически невозможно провести необходимый анализ и определить приоритетные направления финансирования.

Для решения задачи распределения и перераспределения финансовых средств в Министерстве Обороны была создана следующая математическая модель:

$F_{ijk}$  – назначенные финансовые средства, где  $i$  – воинская часть,  $j$  – статья и  $k$  – раздел финансирования.

$Q_{ijk}$  – запрашиваемые средства, где  $i$  – воинская часть,  $j$  – статья и  $k$  – раздел финансирования.

Значение суммы недофинансирования:

$$D_{ijk} = Q_{ijk} - F_{ijk}.$$

Оценка ущерба от недофинансирования:

$$P_{ijk} = f_{ijk}(D_{ijk}),$$

где  $f_{ijk}$  – функция потерь (ущерба) от недофинансирования воинской части  $i$  по статье  $j$  и разделу финансирования  $k$ .

На систему накладываются ограничения. Существуют, так называемые, защищенные статьи, например, выплата денежного довольствия, заработная плата. Для таких статей функция потерь  $f_{ijk} = 0$ .

Используя эту модель, можем сформулировать следующую оптимизационную задачу:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^v P_{ijk} \rightarrow \min_{F_{ijk}},$$

то есть минимизация суммарного ущерба от недофинансирования, причем

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^v F_{ijk} = F_{\Sigma} - \text{общая сумма финансирования, выделяемая}$$

Министерству Обороны.

Функции потерь от недофинансирования  $f_{ijk}$  могут быть представлены, например, в виде полиномов вида

$$f_{ijk}(D_{ijk}) = a_{ijk}D_{ijk}^2 + b_{ijk}D_{ijk} + c_{ijk},$$

где коэффициенты  $a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk}$  определяются для каждой воинской части  $i$  по статье  $j$  по разделу  $k$  методом, например, экспертных оценок.

На сегодняшний день перераспределение осуществляется, как правило, волевым решением, что также частично может служить экспертной оценкой.

Также возможен вариант определения наилучшего распределения логическими методами, основанными на правилах и на прецедентах. В первом случае аналитик должен предусмотреть возможные варианты использования финансовых средств и составить для них правила вида:

*если <условие>, то <действие>*,

где под *условием* понимается, например, если в этом году воинской части  $i$  по статье  $j$  и разделу финансирования  $k$  была выделена определенная сумма. Тогда можно предпринять, например, следующее *действие*: выделить в следующем году сумму меньшую на 10% воинской части  $i$  по статье  $j$  и разделу финансирования  $k$ .

Второй вариант, использующий прецеденты, более гибок. Он позволяет в автоматическом режиме определять, например, такие ситуации: если в течение нескольких лет воинской части  $i$  по статье  $j$  и разделу финансирования  $k$  назначение финансовых средств  $F_{ijk}$  было меньше на 15%, чем сумма запрашиваемых средств  $Q_{ijk}$ , то и в следующем году с большой долей вероятности можно уменьшить финансирование на 15%.

Наиболее эффективным будет гибридный вариант с использованием обоих логических методов.



УДК 681

**Автоматизация процесса синтеза заданий к учебным занятиям студентов**

Михалевич А. П., Михалевич В. Г

Белорусский национальный технический университет

Важную роль в организации учебного процесса играет подготовка заданий к лабораторным, практическим и другим видам занятий. Данное обстоятельство особенно актуально при обучении большого количества студентов. Не секрет, что при выполнении и подготовке к сдаче лабораторных работ студенты часто пользуются результатами, полученными другими студентами, что затрудняет оценку их знаний преподавателями. По этому предпринимаются попытки подготовки индивидуальных заданий для каждой группы потока. Объем этой работы можно представить на примере выполнения 10 лабораторных работ. Для каждой работы надо составить 32 задания а по всему комплексу работ -320 заданий. О трудоемкости подобной работы можно получить представление, рассматривая процесс подготовки заданий по лабораторной работе "Геометрическое программирование". Примером такой задачи может служить задача определения минимальной стоимости перевозки ящика с гравием.

Пусть требуется переправить через речку  $400 \text{ м}^3$  гравия.

Допустим, что гравий грузится в открытый ящик длиной  $f_1$ , шириной  $f_2$  и высотой  $f_3$ . Боковые стороны и дно ящика изготовлены из материала,  $1 \text{ м}^2$  которого стоит 10 условных денежных единиц (условн. денеж. ед.), а передняя и задняя стенки из материала, который стоит 20 таких единиц за  $1 \text{ м}^2$ . Каждая перевозка ящика любых размеров с одного берега на другой и обратно стоит 0,1 условн. денеж. ед., причем после его использования ящик не будет иметь остаточной стоимости.

Требуется найти такие размеры ящика  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ , при которых суммарная стоимость перевозки  $400 \text{ м}^3$  гравия, включая стоимость самого ящика, будет минимальна.

При линейных размерах ящика  $t_1, t_2, t_3$  число перевозок, которые требуется выполнить, чтобы перевезти  $400 \text{ м}^3$  гравия,

составляет  $\frac{400}{t_1 t_2 t_3}$ , а стоимость всех перевозок  $0,1 \cdot \frac{400}{t_1 t_2 t_3} = \frac{40}{t_1 t_2 t_3}$ . Общая стоимость материала составляет  $40 t_1 t_2 + 20 t_1 t_3 + 10 t_1 t_2$ . Следовательно, суммарная стоимость перевозок с учетом стоимости материала равняется

$$g(t) = \frac{40}{t_1 t_2 t_3} + 40 t_1 t_2 + 20 t_1 t_3 + 10 t_1 t_2.$$

Функция  $g(t)$  состоит в рассматриваемом примере из слагаемых  $u_j(t)$  вида  $u_j(t) = c_j t_1^{a_j} t_2^{b_j} \dots t_m^{m_j}$ , где  $c_j > 0, t_j \geq 0, j = \overline{1, m}$  и носит название полинома. Она допускает применение в качестве показателя степеней неизвестных применение натуральных чисел. Рассмотрим пример решения такой задачи

$$\min f(x) = 60 x_1^{-3} \cdot x_2^{-2} + 50 x_1^3 x_2 + 20 x_1^{-3} x_2^3, \\ x_1, x_2 > 0$$

Двоиственная задача

$$\max d(W) = \left(\frac{60}{W_1}\right)^{a_1} \left(\frac{50}{W_2}\right)^{a_2} \left(\frac{20}{W_3}\right)^{a_3},$$

при ограничениях

$$\left. \begin{aligned} W_1 + W_2 + W_3 &= 1 \\ -3W_1 + 3W_2 - 3W_3 &= 0 \\ -2W_1 + W_2 - 3W_3 &= 0 \end{aligned} \right\} W_1, W_2, W_3 \geq 0;$$

$$W_1^* = 0,4; W_2^* = 0,5; W_3^* = 0,1;$$

$$d(W^*) = d(W_1^*, W_2^*, W_3^*) = d(0,4; 0,5; 0,1) = 125,8;$$

$$f(x^*) = d(W^*) = 125,8;$$

$$W_j^* = \frac{C_j p_j(x^*)}{f(x^*)} = C_j \prod_{i=1}^m \frac{(x_i^*)^{p_{ij}}}{f(x^*)}.$$

Пример:

$$Стр.(x^*) = Wt^* f(x^*) = Wt^* d(W^*);$$

$$\left. \begin{aligned} 60x_1^{-3}x_2^{-2} &= 0,4 \cdot 125,8 = 50,32 \\ 50x_1^3x_2 &= 0,5 \cdot 125,8 = 62,9 \\ 20x_1^{-3}x_2^3 &= 0,1 \cdot 125,8 = 12,58 \end{aligned} \right\} ;$$

$$x_1^* = 1,12 ;$$

$$x_2^* = 0,944.$$

Если задаться целью разработать 32 варианта подобного типа задач, то обнаруживаем, что наиболее сложной задачей является при подборе различных комбинаций значений показателей степеней при неизвестных переменных удовлетворение условию не отрицательности переменных двойственной задачи., так как решение системы уравнений двойственной задачи дает множество решений с отрицательными значениями переменных двойственной задачи. Выход видится в широком использовании вычислительной техники при автоматическом переборе множества значений показателей степеней с дальнейшим решением системы уравнений.

УДК 004.82

### **Нечеткое моделирование на прологе**

Ковальков А. Т., Ковалькова И. А.

Белорусский национальный технический университет

В настоящее время одним из наиболее активных и перспективных направлений прикладных исследований в области управления и принятия решений является нечеткое моделирование, основанное на формальном аппарате нечеткой (fuzzy) логики.

По тематике нечеткого управления опубликованы десятки тысяч работ. Диапазон применения нечеткой логики очень широк – от бытовых приборов до управления сложными техническими системами, например, автопилот [1].

Появились коммерческие программные средства, которые специально ориентированы на решение задач нечеткого моделирования. Наиболее интересными программными средствами, в которых реализована технология нечеткого моделирования, являются пакет Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB и программа fuzzyTECH [2]. При всех достоинствах и больших возможностях этих программных средств они не позволяют получить исполняемый код программы.

Задачи нечеткого управления относятся к области искусственного интеллекта (ИИ). Проблематика ИИ приобрела особую актуальность с середины прошлого века, при этом выяснилось, что обычные процедурные языки программирования типа Бейсик, Фортран, Паскаль не очень удобны для разработки систем ИИ. Поэтому стали появляться языки, предназначенные для решения задач ИИ. Среди них широкую популярность получил язык логического программирования Пролог. Он очень хорошо подходит для описания логических взаимоотношений между объектами, что особенно важно в нечетком моделировании. На Прологе очень компактно, по сравнению с процедурными языками, описываются многие алгоритмы. По статистике строка исходного текста программы на языке Пролог соответствует 14 строкам исходного текста на процедурном языке, решающем ту же задачу [3]. Пролог-программу, как правило, легко писать, понимать и отлаживать. Это приводит к тому, что время разработки приложения на Прологе во многих случаях на порядок быстрее, чем на процедурных языках. Программа на Прологе не является таковой в классическом понимании, поскольку не содержит явных управляющих конструкций типа условных операторов, операторов цикла и т.д. Она представляет собой модель фрагмента предметной области, о котором идет речь в задаче.

Исходя из вышеизложенного, было решено использовать Пролог (версию Турбо-Пролог) для решения задач нечеткого логического управления, тем более, что на Турбо-Прологе просто получить исполняемый код программы (достаточно после успешной компиляции нажать комбинацию клавиш Ctrl-F9), который в дальнейшем станет программной реализацией нечеткого управления.

На Турбо-Прологе были разработаны основные правила, необходимые для программирования нечеткого управления: формирование универсума нечеткого множества, формирование функций принадлежности различных типов (всего 12), выполнение операций над нечеткими множествами (более 10), определение нечетких чисел и интервалов и операций над ними, правила выполнения отдельных этапов нечеткого моделирования (фаззификация, агрегирование, активизация, аккумуляция, дефаззификация). С использованием программного обеспечения на Турбо-Прологе были разработаны четыре нечеткие модели, примеры которых даны в [3]: «чайевые в ресторане», управление смесителем воды при принятии душа, управление кондиционером воздуха в помещении, управление контейнерным краном. Например, листинг программы последней модели содержит 19 строк, а ехе-файл имеет размер 42 Кб. Сравнение результатов работы нечетких моделей, реализованных на Турбо-Прологе и в среде MATLAB, показали их идентичность.

Таким образом, Турбо-Пролог, дополненный предикатами (правилами) для нечеткого моделирования, имеет ряд достоинств: значительно сокращается время на разработку программы; объем листинга программы сокращается в несколько раз за счет того, что в нем нет правил, которые содержатся в подключаемом модуле; достаточно просто получается исполняемый код программы, который может использоваться как программная реализация нечеткого управления; система программирования легко расширяема новыми встроенными предикатами; программу способен написать пользователь, имеющий минимальные навыки в программировании на языке Turbo Prolog.

#### **Литература**

1. Макаров, И. М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров. – М.: Наука, 2006.
2. Леоненков, А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003.
3. Шрайнер, П. А. Основы программирования на языке Пролог / П. А. Шрайнер. – М.: Интернет-Ун-т информ. технологий, 2005.

### **1. Введение**

Эффективным средством для дальнейшего продвижения программного обеспечения (ПО) в настоящее время являются технологии, ориентированные на публикацию ПО в сети Internet. Сегодня имеется множество разработок, поддерживающих электронный маркетинг, торговые операции, передачу различного рода информации и др.

Наряду с такими приложениями, представляется возможным решение задач технического направления, например, анализа колебаний мобильных машин. На первый взгляд, данная проблема кажется слишком большой и требует значительных ресурсов. Вместе с тем, более детальное изучение последовательности процедур динамического анализа мобильных машин, позволяет разделить весь процесс на ряд почти независимых относительно простых действий, которые могут быть успешно реализованы с размещением их на Web-страницах сервера. Каждая отдельная задача анализа программно может быть представлена в виде ActiveX компонент. Набор элементов ActiveX, вызов которых организует Web-сайт, позволяет организовать необходимую функциональность приложения.

В настоящей работе рассматриваются основные составляющие (программные и математические) процесса динамического анализа колебаний мобильных машин.

### **2. Основные компоненты анализа колебаний мобильных машин**

Современное ПО, позволяющее повысить качество принимаемых проектных решений при создания новых и доводке существующих конструкций машин, способных конкурировать в условиях рыночной экономики, должно поддерживать:

- создание расчетных схем машин;
- формирование внешних воздействий;
- визуальный выбор наблюдаемых переменных;
- проведение вычислений;

- анализ результатов вычислительного эксперимента и др.

### 2.1. Компонента создания расчетной схемы

Программный ActiveX-компонент создания расчетной схемы мобильной машины позволяет автоматизировать процесс выбора и расположения структурных элементов поддрессирования основных узлов динамического объекта. Визуально компонент представляет собой внешний образ машины, на который в процессе диалога могут быть размещены требуемые упруго-диссипативные элементы, как это показано на рисунке 1.

В процессе настройки расчетной схемы имеется возможность выбора из базы данных различных внешних представлений проектируемых объектов, систем поддрессирования, задания характеристик отдельных упруго-диссипативных характеристик и их геометрического расположения.

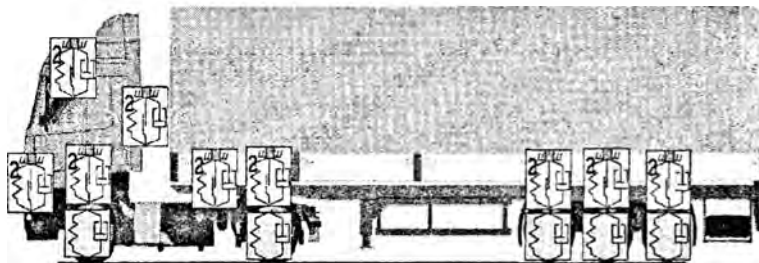


Рисунок 1. Вид ActiveX-компоненты создания расчетной схемы машины

### 2.2. Компонента формирование внешних воздействий

Компонента обеспечивает формирование широкого спектра внешних возмущений как детерминированного, так и стохастического характера. Детерминированные возмущения представлены классом типовых функций. Формирование реализации случайного временного процесса поддерживается методами соответствующего класса, по заданной математической модели корреляционной функции. Вид компонента показан на рисунке 2.

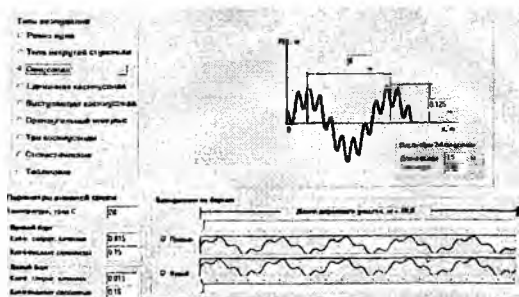


Рисунок 2. ActiveX-компонента формирование внешних воздействий

### 2.3. Компонента выбора наблюдаемых переменных

Технологическая цепочка моделирования колебаний мобильных машин включает этап выбора наблюдаемых величин в различных точках такого объекта. Представляется целесообразным разработка соответствующего ActiveX-компонента (см. рисунок 3), отвечающего за визуальный выбор необходимых переменных (линейных и угловых перемещений, скоростей, ускорений, а также деформаций, усилий и т.д.). В результате с помощью данного элемента формируется пакет требуемого количества различных величин.

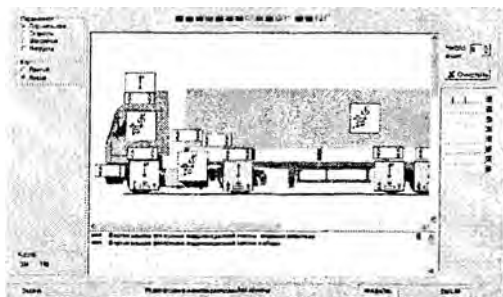


Рисунок 3. ActiveX-компонента выбора наблюдаемых переменных



## 2.4. Компонента – решатель

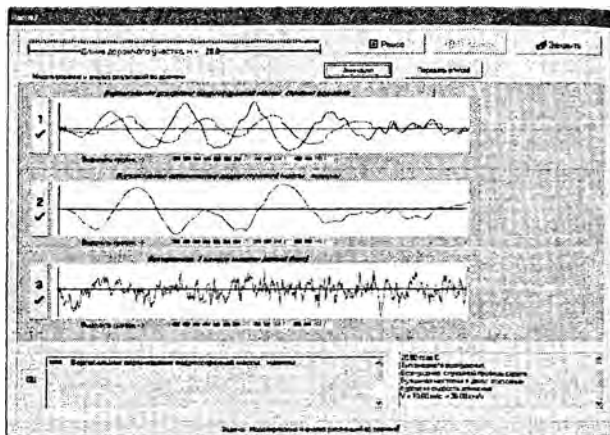


Рисунок 4. ActiveX-компонента реализации вычислительных процедур

Непосредственное проведение вычислительного эксперимента требует наличие вычислительных процедур для решения задач временного, амплитудно-частотного, скоростного анализа и т.д. Функции решателя реализует ActiveX-компонента, вид которой показан на рисунке 4.

## 2.5. Компонента анализа вычислений

Анализ колебательных процессов динамического объекта обеспечивается ActiveX-компонентой (см. рисунок 5), которая позволяет представить результаты в виде:

- временного ряда процесса,
- корреляционной кривой,
- спектральной плотности распределения,
- октавного анализа процесса,
- третьоктавного анализа колебаний водителя.

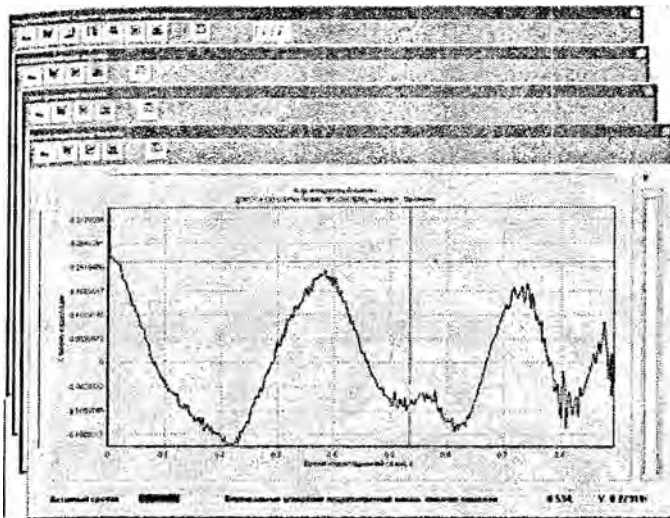


Рисунок 5. ActiveX-компонента анализа вычислений

### 3. Пример моделирования

Рассмотрим на примере объекта, расчетная схема которого приведена на рисунке 1, результаты анализа вертикальных колебаний водителя. Будем полагать, что магистральный тягач с полуприцепом движется со скоростью  $V = 80 \text{ км/ч}$  по дороге с асфальтным покрытием, длиной  $s = 1000 \text{ м}$ , микропрофиль которой аппроксимируется математической моделью корреляционной функции вида:

$$R_q(\tau) = A_1 \sigma_q^2 e^{-\alpha_1 |\tau|} A_2 \sigma_q^2 e^{-\alpha_2 |\tau|} \cos \beta \tau + .$$

Значения параметров приведены в таблице:

$\sigma_q^2, \text{ м}^2$	$A_1$	$A_2$	$\alpha_1, \text{ с}^{-1}$	$\alpha_2, \text{ с}^{-1}$	$\beta_1, \text{ рад/с}$
0.013	0.65	0.35	0.25	0.05	0.19

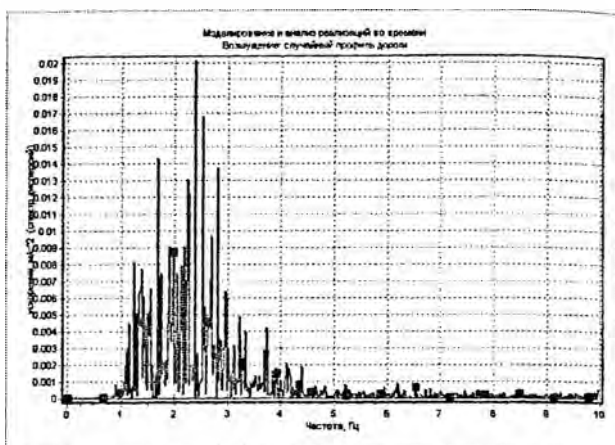


Рисунок 6. Спектральная плотность ускорений водителя

На рисунке 6 показан энергетический спектр ускорений водителя. Видно, что основная энергия колебаний находится в диапазоне частот от 1 до 4 Гц.

Для более полной информации на рисунке 7 представлен третьоктавный анализ распределений ускорений и дана их сравнительная характеристика с требованиями вибронгруженности по ИСО. Как видно из приведенных графиков, данный динамический объект удовлетворяет международным нормам.

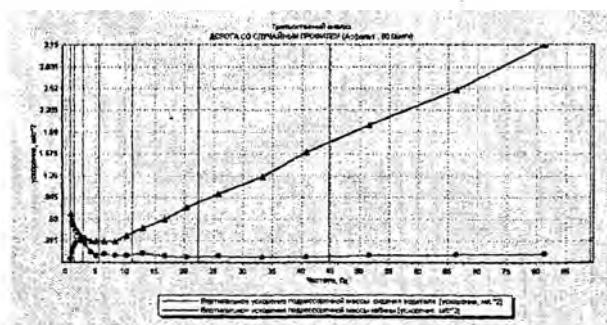


Рисунок 7. Третьоктавный анализ вибронгруженности водителя

#### 4. Заключение

Разработанное программное обеспечение для Internet обладает достаточной гибкостью, может быть представлено различным числом компонент, необходимых для решения и других задач, связанных с динамикой подвижных мобильных объектов.

#### Литература

1. Фурунжиев, Р. И. Программное обеспечение моделирования и оптимизации динамических систем ADMOS. / Р. И. Фурунжиев, Н. Н. Гурский. РосПАТЕНТ: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2000610671 от 21 июля 2000 г. (Copyright of the ADMOS).

УДК 001: [37+658+338] (063)

#### Системы отслеживания и документирования ошибок

Попова Ю. Б.

Белорусский национальный технический университет

Данная работа посвящена анализу систем для документирования и отслеживания ошибок в программном обеспечении (ПО).

Реализация каждого этапа жизненного цикла ПО является необходимым условием для появления качественного программного продукта (ПП), поэтому вопросы тестирования следует рассматривать в контексте всего жизненного цикла ПО, начиная от разработки требований к ПП и заканчивая его сопровождением [1]. Тестирование – это процесс обнаружения дефектов (ошибок) в ПП до его промышленного использования [2]. Каждая найденная в процессе тестирования ошибка подлежит документированию и передаче на исправления. Для автоматизации этого процесса существуют системы документирования и отслеживания ошибок (bug tracking systems, BTS). Однако предназначение этих систем не ограничивается только лишь этим свойством. В большинстве своем – это системы управления проектом, которые позволяют обмениваться и сохранять проектно-ориентированные сообщения, отслеживать процесс тестирования и исправления ошибки, создавать различные отчеты и др. Поэтому их назначение состоит еще и в следующем:

1. Повышать взаимодействие между сотрудниками. В таких системах каждый участник проекта (и только участник проекта) имеет доступ к любой информации и документации относительно текущего проекта: требования, спецификация, тестовый план, проектный план, тестовые сценарии, программные коды и т.д.

2. Ни одна ошибка не должна остаться неисправленной, потому что так решил разработчик. Поскольку каждая найденная ошибка заносится в базу данных со статусом «найденна»-submitted, то разработчику придется обратиться на нее внимание, хотя бы для того, чтобы изменить ее статус. Ведь ошибка со статусом «найденна»-submitted не может долго оставаться в базе данных.

3. Как можно меньше ошибок должно остаться из-за проблем взаимодействия сотрудников. Общение через BTS, сводит до минимума личное общение кодировщика и тестировщика, что, несомненно, снижает количество споров и ссор по поводу ошибок в программе. Таким образом, каждый выполняет четко поставленную перед ним задачу: найти ошибку (для тестировщика) и исправить ошибку (для кодировщика).

В настоящее время существует довольно большой перечень BTS. Некоторые из них можно найти в Internet в свободном распространении (например, Bugzilla), некоторые системы можно купить, например, Rational Clear Quest, Searpine Test Track Pro или Software PR-Tracker. Каждая из указанных выше систем обладает своими достоинствами и недостатками.

Bugzilla достаточно проста в освоении и поддержке, не особо требовательна к ресурсам. Одной из самых сильных сторон Bugzilla является поиск. Он может осуществляться абсолютно по всем полям, с применением различных фильтров. К недостаткам данного программного средства следует отнести администрирование. Это самая запутанная и сложная часть Bugzilla. Страница параметров содержит более 70 различных настроек, которые практически не сгруппированы, а представляют собой один большой список. К наиболее важным настройкам относятся: возможность модифицировать (конструировать) шаблон отчета о дефекте; возможность настроить значение поиска по умолчанию; возможность настроить значение полей нового дефекта; возможность добавления комментария при изменении статуса дефекта.

Searpine TestTrack Pro обладает следующими достоинствами: довольно высокое быстродействие системы; генерация отчетов на базе XSL с графиками, иллюстрирующими распределение дефектов, тенденции и периодические зависимости; добавление собственных полей; быстрое создание ссылок в списке окон web-интерфейса; административное управление настройками отображения данных. Единственным недостатком данного продукта является его высокая стоимость [2].

Rational Clear Quest – система, к достоинству которой относят тесную интеграцию стадий взаимодействия.

Software PR-Tracker – система, у которой отмечается такой недостаток, как отсутствие доступа к клиенту или серверу через web-интерфейс.

Несмотря на то, что существует довольно приличный перечень BTS с характерными для каждой системы статусами, цикл найденной ошибки остается одинаковым:

1. Ошибка документируется, т.е. вносится в систему.
2. Руководитель просматривает все отчеты об ошибках и назначает разработчика или разработчиков для исправления.
3. Ошибка исправляется и помечается, что исправлена.
4. Тестировщик проверяет, действительно ли она исправлена.
5. Если ошибка не повторяется, то она закрывается, если нет, то переход на шаг 1.
6. Возможны также случаи, когда ошибка не воспроизвелась у разработчика или будет исправляться позже, или не будет исправляться вообще.

Анализ рассмотренных выше систем отслеживания и документирования ошибок позволил сформулировать следующие критерии для выбора нужной BTS: доступность системы на различных платформах; наличие клиент-серверного приложения; поддержка работы с различными базами данных; интегрирование в различные информационные среды; стоимость и схема лицензирования; гибкость настройки системы, а также электронная поддержка формирования событий и отчетов.

#### **Литература**

1. Калбертсон, Р. Быстрое тестирование / Р. Калбертсон, К. Браун, Г. Кобб. – М: Вильямс, 2002.
2. Канер, С. Тестирование программного обеспечения / С. Канер, Дж. Фолк, Е. Кек Нгуен. – Киев: ДиаСофт, 2000.

УДК 621.313.333

## Диагностическая система электрооборудования троллейбуса

Симонович А. В.

Белорусский национальный технический университет

Система контроля, диагностики и управления электрооборудованием и тяговым приводом троллейбуса представляет собой сложную электронную систему, построенную на микропроцессорной основе. Вся информация о состоянии троллейбуса передается через последовательный порт на обычный персональный компьютер. Переданные данные обрабатываются специальным пакетом программ и представляются в удобном для пользователя виде. Система контроля, диагностики и управления электрооборудованием и приводом троллейбуса в виде пакета программ, выполняемых на обычном компьютере, - это ничто иное, как очередное претворение в жизнь новой инновационной концепции. Концепции, ориентированной на то, чтобы использовать самую современную технологию и при этом исчерпать все ее мыслимые преимущества.

Пакет программ системы контроля и диагностики реализует огромное количество полезных функций:

**Индикация** в состоянии представлять важнейшие переменные системы управления, при этом подразумеваются, например такие переменные, как входы и выходы или внутренние параметры состояния. До сих пор в традиционной технике она известна как тестовое устройство в самом широком смысле. Однако в этой связи известно и то, что конструктивно хорошие тестовые устройства могут быть дорогостоящими, а иногда и очень громоздкими. Кроме того, - как хорошо известно любому опытному практику, - никакую индикацию, состоящую например из светодиодов или стрелочных индикаторов, невозможно выполнить таким образом, чтобы она оптимально соответствовала всем требованиям. Данная индикация не конфигурируема. Функция "Индикация" в представляемом пакете программ конфигурируема.

Необычные состояния установки, которые могут возникнуть во время работы, фиксируются в **Регистраторе событий**. Здесь можно найти ответы на такие, например, вопросы, как: в какой момент, как часто и при каких условиях наступили те или иные события?

Другой комплекс функций под ключевым словом **Вспомогательные данные** дает информацию общего характера. Эта информация может быть использована в технических, экономических и статистических целях. Так, например, если необходимо знать, какое количество часов устройство уже проработало, какая энергия транспортным средством взята из сети или отдана в нее обратно, или же как часто включалась определенная защита, то именно здесь можно получить соответствующие данные. Эта опция дает данные, которые раньше могли быть получены лишь с очень большими дополнительными затратами.

В следующей программной части под ключевым словом **Триггер** диагностическая программа с помощью определенных пользователем триггерных условий дает возможность выслеживать трудно регистрируемые ошибки. Хотя техническое обнаружение и отличается в наше время надежной работой, определенные ошибки или неисправности полностью исключить пока не удастся. При поиске таких ошибок зачастую не помогут сложные механизмы управления и регулировки. Известны ситуации, когда система выдает сообщение об ошибке, а наладчик в мастерской ничего не может определить. Даже эксперт во многих случаях зачастую оказывается беспомощным, поскольку у него отсутствует необходимая информация. Пробные прогоны завершаются безуспешно, т.к. в этот промежуток времени ошибка не проявляется. Возможность оказания помощи в таком случае дает опция триггер.

Опция **Системный обзор** показывает интегрированные в систему ПЛИС (PLIS) устройства, подключены ли они и какую информацию о состоянии они дают. Из опции “Системный обзор” Вы можете запустить **Индикацию устройства**. - функцию индикации для отдельного устройства, но с более низким объемом информации. Тем самым из центрального положения пользователь получает обширный взгляд на всю систему связей.



Опция Установка времени процессора позволяет читать и устанавливать дату и время центрального процессора, относительно которых будут фиксироваться события.

Опция Управляющие константы дает обзор регулировочных параметров в устройстве управления, таких, например, как предельные значения для напряжений, токов, скоростей и моментов вращения, а так же параметры регуляторов системы управления. Помимо функции отображения констант, опция “Управляющие константы” позволяет специальному персоналу изменять управляющие константы. Это позволяет производить корректировку системы управления под конкретные условия эксплуатации на законченном транспортном средстве. Опция “Управляющие константы” защищена паролем.

Еще один комплекс функций под ключевым словом Ошибки дает информацию о всех недопустимых ситуациях, возникающих при работе транспортного средства. Эта информация может быть использована как техническими специалистами для ремонта, так и для сбора статистических данных. Например, для определения надежности и наработки на отказ отдельных узлов. Помимо подсчета количества недопустимых ситуаций, имеется возможность просмотра состояний основных переменных при возникновении ошибки. Такая возможность предусмотрена для последних пятидесяти ошибок.

Если обобщить все вышесказанное, то программное обеспечение “Диагностическая система” в самом широком смысле представляет собой инструмент, который создан для того, чтобы с небольшими затратами дать пользователю конкретную и подробную информацию о системе.

На рис.1 представлена функциональная схема диагностической системы. Персональный компьютер с установленной программой подключается к системе управления привода при помощи кабеля последовательного интерфейса. Файл идентификации является индивидуальным для различных объектов диагностирования. Данные, получаемые программой через последовательный порт, сохраняются в файл данных.



Рис.1 Функциональная схема диагностической системы

При этом если в режиме обмена в реальном времени дискрета времени между передаваемыми блоками ограничена скоростью обмена последовательного порта, то в режиме триггера дискрета задается программно и может варьироваться от 10мкс до 2,5с.

Что не подразумевается под понятием “Диагностическая система”? Не подразумевается дать пользователю инструмент, который бы обходился без дальнейшего участия человека. Недостаточно, например, подключить компьютер с программным обеспечением “Диагностическая система” к управляющему устройству в ожидании того, что возможная ошибка будет обнаружена и документально засвидетельствована полностью автоматически. Диагностическая система не работает самостоятельно, свою задачу она может выполнить лишь с поддержкой человека.

УДК 621.314.1

## Цифровая система управления бестрансформаторным повышающим преобразователем

Миронович А. В., Примшиц П. П.

Белорусский национальный технический университет

Широкое распространение сегодня имеет цифровое управление как отдельными устройствами, так и целыми технологическими комплексами. У цифрового управления имеются следующие достоинства: высокая помехозащищённость, так как используется только два уровня сигнала; возможность построения универсальных управляющих устройств для разных объектов; простота формирования нелинейных управляющих сигналов.

Рассмотрим возможность построения цифрового управляющего устройства для повышающего преобразователя постоянного напряжения, работающего в режиме граничного тока. Функциональная схема преобразователя при цифровом управлении представлена на рис. 1

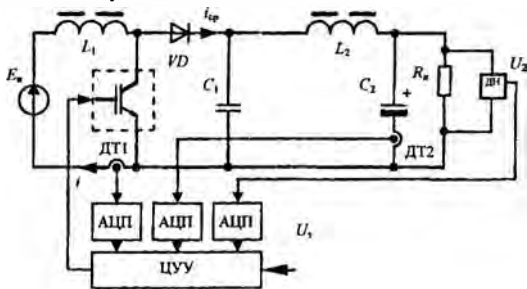


Рис. 1

Управляющее воздействие формируется цифровым управляющим устройством ЦУУ, которое получает информацию о состоянии координат объекта от аналого-цифровых преобразователей, подключённых к датчикам. Причём, обратная связь по току дросселя используется для поддержания режима граничного тока. Таким образом, работу ЦУУ можно разбить на две части: 1) вычисление заданного значения тока дросселя; 2) поддержание заданного значения тока дросселя.

Первая задача решается согласно методу модального управления с использованием астатического регулятора. Для её решения используем программируемый контроллер. Решение второй задачи сопряжено с выполнением простейших логических операций, причём частота вывода управляющего сигнала здесь гораздо выше, поэтому лучше здесь применить аппаратную реализацию управляющего устройства.

Рассмотрим подробнее синтез цифровой системы стабилизации выходного напряжения преобразователя, работающего в режиме гранично-непрерывного тока, считая, что этот режим идеально поддерживается по требуемому алгоритму работы.

В отличие от аналоговой системы, где управляющее воздействие на объект управления изменяется непрерывно в функции координат объекта, в цифровой системе сигнал управления остаётся неизменным на протяжении определённого интервала дискретности. Уравнение состояния объекта в векторно-матричной форме имеет вид:

$$\dot{X} = AX + BU_k,$$

$$\text{где } A = \begin{bmatrix} 0 & -\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{a_0}{a_3} & -\frac{a_1}{a_3} & -\frac{a_2}{a_3} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\beta R_n}{a_3} \end{bmatrix},$$

$U_k$  – управляющий сигнал на  $k$ -ом интервале дискретности,  $\beta$  – коэффициент усиления идеального источника тока.

$$a_0=1, a_1=T_2+T_3, a_2=T_1T_3, a_3=T_1T_2T_3, T_1=L_2/R_n, T_2=C_2R_n, T_3=C_1R_n$$

Оценить качество цифровой системы можно по решётчатой функции её выходной величины. Для этого воспользуемся непрерывной эталонной моделью, которая отвечает требуемым динамическим свойствам. Решётчатая функция модели:

$$X_{Mk+1} = \Phi_M X_{Mk}, \quad (1)$$

где  $\Phi_M = e^{A_M \tau}$  – импульсная переходная матрица, которая при  $\tau = \text{const}$  является матрицей постоянных коэффициентов.

$$A_M = \begin{bmatrix} 0 & -\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{M0} & a_{M1} & a_{M2} & a_{M3} \end{bmatrix} \quad \text{- матрица эталонной модели.}$$

Коэффициенты последней строки матрицы определяются исходя из заданного распределения корней эталонной модели:

$$p_{1,2} = -\sigma \pm j\sigma; \quad p_{3,4} = -\sigma \pm j\omega.$$

Получаем:

$$a_{M3} = -4\sigma;$$

$$a_{M2} = -7\sigma^2 - \omega^2;$$

$$a_{M1} = -6\sigma^3 - 2\sigma\omega^2;$$

$$a_{M0} = \frac{2\sigma^2(\sigma^2 + \omega^2)}{\gamma}.$$

Задача синтеза состоит в том, чтобы к концу  $(k+1)$ -го интервала значение координаты системы совпадало со значением соответствующей координаты эталонной модели, которое удовлетворяет выражению (1). Воспользуемся разностным уравнением:

$$X_{k+1} = \Phi X_k + \Psi BU_k,$$

$$\text{где } \Phi = e^{At}, \quad \Psi = -A^{-1}(E - \Phi).$$

Если координаты объекта раны координатам модели на соответствующих интервалах дискретности, то получаем:

$$\Psi BU_k = (\Phi_M - \Phi) X_k.$$

При условии, что импульсная переходная матрица объекта точно соответствует модели, получаем:

$$\Psi BU_k = (\Phi_M - \Phi) \Phi_M X_{k-1}. \quad (2)$$

Поскольку матрица  $B$  имеет лишь один ненулевой элемент,  $\Psi BU_k$  будет представлять собой вектор.

Преобразовав матричное выражение (2), получаем систему из четырёх уравнений. Сигнал управления может быть определён исходя из любого из этих уравнений. Поскольку в нашем случае управление воздействует только на старшую производную, то матрицы  $A$  и  $A_M$  будут отличаться только последней строкой. Следовательно,  $\text{rank}(\Phi_M - \Phi) = \text{rank}(A_M - A) = 1$ , из чего следует, что для определения управляющего сигнала

можно воспользоваться любым из четырёх уравнений. Наибольшая точность получается при использовании последнего из них.

Вектор коэффициентов обратных связей получаем из выражения:  $K = \frac{(\Phi_M - \Phi)\Phi_M}{\Psi_{44}B}$ .

где матрица  $(\Phi_M - \Phi)\Phi_M$  будет состоять лишь из одной строки, а  $B$  является скалярной величиной.

Проведём расчёт коэффициентов обратных связей для следующих значений параметров объекта:  $E_0=110$  В,  $R_n=10$  Ом,  $C_1=60$  мкФ,  $C_2=2$  мФ,  $L_2=500$  мкГн,  $\beta=10$  Ом<sup>-1</sup>,  $\gamma=0,017$ . Зададимся  $\omega=8000$  с<sup>-1</sup>, а  $\tau=0,001$  с. В результате получаем следующие значения коэффициентов обратных связей:  $k_0=7,8$  с<sup>-1</sup>,  $k_1=0,00028$ ,  $k_2=0,1$  Ом.

График переходного процесса в преобразователе при его включении в работу в 0,04 с представлен на рис. 2.

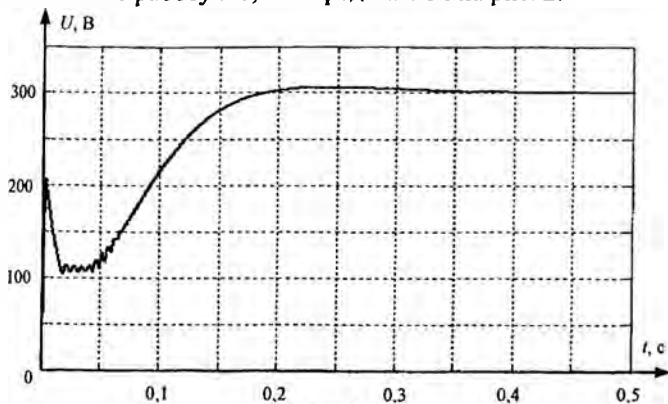


Рис. 2

В целом, форма кривой выходного напряжения соответствует кривой напряжения при непрерывном управлении для тех же параметров объекта управления. Нами был выбран достаточно большой интервал дискретности. При тактовых частотах современных процессоров порядка сотен мегагерц вычисление управляющего сигнала происходит гораздо быстрее, что позволяет сэкономить ресурсы программируемого управляющего устройства для параллельного решения других прикладных задач.

**Влияние преобразователей частоты  
на питающую электрическую сеть**

Фираго Б. И.\*, Павлячик Л. Б.\*\*, Медведев К. М.\*\*\*  
Белорусский национальный технический университет\*  
Вроцлавский технический университет (Польша)\*\*  
Гомельский государственный технический  
университет им. П.О. Сухого\*\*\*

В последнее десятилетие в Беларуси и других странах СНГ в промышленность и коммунальное хозяйство активно внедряются преобразователи частоты (ПЧ), позволяющие эффективно управлять режимами работы асинхронного электропривода и экономить значительную часть электроэнергии.

Одной из проблем, связанных с эксплуатацией систем "преобразователь частоты – асинхронный двигатель" (ПЧ-АД), является генерация ими в питающую электрическую сеть токов высших гармоник (ВГ), которые ухудшают качество электроэнергии в системе электроснабжения (СЭС) и снижают уровень электромагнитной совместимости ПЧ с сетью. Причиной этому является сильно искажённая кривая входного тока ПЧ-АД, особенно в прерывистом режиме работы (рис.1).

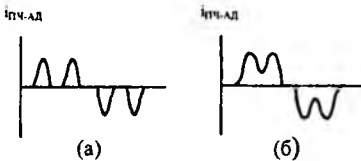


Рис. 1. Формы входных токов  
ПЧ-АД: (а) – прерывистая;  
(б) – непрерывная

Данное обстоятельство позволяет сделать вывод об актуальности проблемы

негативного влияния ПЧ-АД на питающую сеть и необходимости поисков её эффективного решения.

Авторами данной статьи были разработаны математическая и имитационная модели, позволяющие рассчитывать кривые входных токов системы ПЧ-АД с неуправляемым выпрямителем (НВ) и автономным инвертором напряжения (АИН) при любой несимметрии параметров питающей сети и получать их гармонический спектр.

В основе математической модели лежат аналитические выражения для кривых входного тока, выпрямленного напряжения, тока в ёмкости фильтра и тока эквивалентной нагрузки ПЧ-АД, полученных в результате решения дифференциальных уравнений, составленных для эквивалентной модели ПЧ-АД на интервалах проводимости НВ и отсутствия входного тока.

Имитационная модель составлена в программной среде MatLab/Simulink, и, в отличие от модели математической, позволяет получать не только прерывистые, но также и непрерывные входные токи системы ПЧ-АД.

Исследования, проведённые с помощью разработанных моделей, показали следующий характер влияния параметров симметричной питающей сети и режима работы самой ПЧ-АД на относительный уровень ВГ её входного тока:

- с увеличением эквивалентного сопротивления питающей сети уровень ВГ снижается;
- чем больше номинальная мощность электродвигателя и/или величина его загрузки, тем меньше ВГ во входном токе ПЧ-АД;
- чем меньше величина ёмкости фильтра ПЧ, тем сильнее искажена кривая входного тока системы ПЧ-АД.

Были также выявлены характер и степень влияния несимметрии напряжения питающей сети на гармонический состав входных токов ПЧ-АД. Установлено, что даже небольшая (допустимая по ГОСТ 13109-97) несимметрия питающего напряжения может приводить к значительной несимметрии входных токов. Отдельно следует отметить, что любая несимметрия параметров питающей сети приводит к появлению в кривых входного тока ПЧ-АД с трёхфазным НВ нечётных гармоник, кратных трём (3-й, 9-й, 15-й и т.д.), чего нельзя наблюдать при симметричной сети (рис.2).

Одним из основных средств снижения уровней ВГ входных токов ПЧ-АД являются сетевые дроссели и дроссели в контуре выпрямленного тока. Однако исследования, проведённые для маломощных ПЧ, показали, что с использованием только лишь дросселей невозможно добиться таких уровней ВГ, которые соответствовали бы СТБ МЭК 61000-3-2-2006, нормирующего



уровень эмиссии токов ВГ в питающую сеть устройствами с входным током не более 16 А в одной фазе.

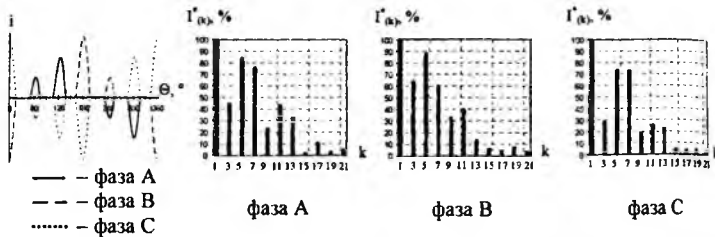


Рис.2. Несимметричные входные токи ПЧ-АД и их гармонический состав

Авторами данной публикации было предложено организационно-техническое мероприятие по снижению уровней ВГ в СЭС предприятий и коммунально-бытового сектора, суть которого заключается в комбинировании в определённой пропорции преобразователей с трёхфазными НВ (ПЧ средней и большой мощности) и однофазными НВ (маломощные ПЧ, компьютеры, телевизоры) таким образом, чтобы их питание осуществлялось от одного трансформатора.

Из рис.3 видно, что сумма типовых для преобразователей с трёхфазными и однофазными НВ кривых входных токов содержит в несколько раз меньше 5-й и 7-й гармоник, чем в каждой из кривых в отдельности.

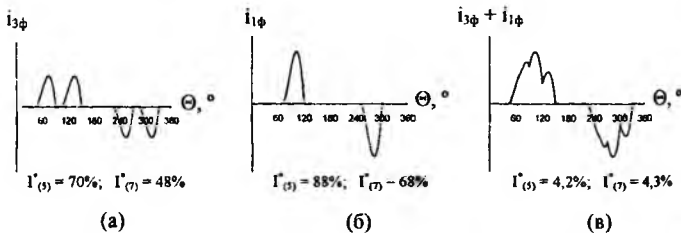


Рис.3. Кривые входных токов и относительные значения 5-й  $\Gamma_{(5)}$  и 7-й  $\Gamma_{(7)}$  гармоник преобразователей с трёхфазным (а) и однофазным (б) НВ, а также их суммарного тока (в)

Одним из самых перспективных и эффективных способов снижения уровней токов и напряжений ВГ в СЭС является использование силовых активных фильтров (АФ).

Авторами разработана имитационная модель АФ тока с гистерезисным регулятором, позволяющая исследовать эффективность использования данного устройства с целью фильтрации ВГ тока и компенсации реактивной мощности нелинейной нагрузки. Модель реализована в программной среде MatLab/Simulink. Полученные с помощью данной модели и представленные на рис.4. кривые подтверждают эффективность применения АФ тока.

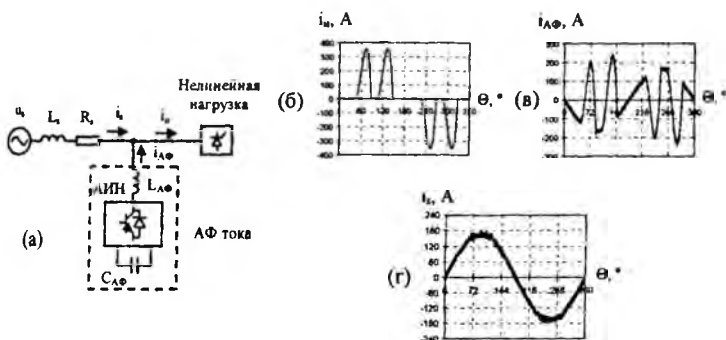


Рис.4. Схема подключения АФ тока (а), а также кривые токов, полученные в результате моделирования работы АФ:

(б) – входной ток ПЧ-АД  $i_n$ ; (в) – ток АФ  $i_{АФ}$ ; (г) – ток сети  $i_c$

УДК 519.63

### Подготовка k-модели процесса вытяжки для расчета на суперкомпьютере СКИФ К-1000

Напрасников В. В., Доманов Е. В., Сороколетов А. А.  
Белорусский национальный технический университет

В процессе вытяжки возможны ситуации, когда в материале заготовки возникнут недопустимо большие напряжения или произойдет ее разрыв. Поскольку натурные эксперименты являются дорогостоящими, то необходимо исследовать напряженно-деформированное состояние уже на этапе проектирования. Это можно осуществить, создав параметрическую модель на основе конечно элементного подхода.

В данной работе описывается последовательность шагов по созданию такой модели с целью дальнейшего ее расчета в среде LS-DYNA на суперкомпьютере СКИФ К-1000 в режиме удаленного доступа с площадки БНТУ. В качестве прообраза использовалась модель, представленная в документации по LS-DYNA для шарового пуансона и модель, представленная в [1].

Физическая модель и постановка задачи:

Определить напряжения, деформации, силу деформирования при вытяжке цилиндрического стаканчика из заготовки виде круглой пластины.

- внутренний диаметр стакана – 111 мм.
- толщина заготовки – 1 мм, диаметр 200 мм.
- материал заготовки сталь 08кп:
- плотность  $7.85 \cdot 10^{-6}$  кг/мм<sup>3</sup>;
- модуль упругости  $2 \cdot 10^5$  МПа,
- коэффициент Пуассона – 0.3,
- предел текучести – 220 МПа,
- модуль упрочнения – 800 МПа.
- коэффициент трения между материалом и инструментом – 0.1.
- Сила прижима  $\frac{1}{4}$  заготовки – 10000 Н.

Основные геометрические параметры изображены на рисунке 1 (размеры в миллиметрах).

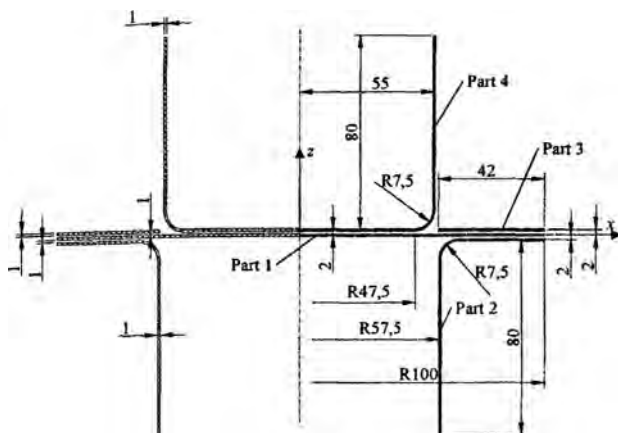


Рис.1. Расчетная схема

В отличие от последовательности предложенной в [1] после полной подготовки модели она была экспортирована в форматы среды LS-DYNA (в виде k-модели). Дальнейшие шаги выполнялись следующим образом:

Запустить программу `putty.exe`, зайти на управляющую машину кластера под своим аккаунтом. Затем скопировать k-файл на управляющую машину суперкомпьютерной системы, в рабочую директорию посредством команды:

```
pscp.exe -C test.k /home/user/lodyna/results/demo.
```

Запустить k-файл на счет в процессоре (решателе) пакета LS-DYNA на заданном количестве процессоров с помощью пакетного файла `$ qsub <script_name>` и скрипта, приведенного в [2]. Запуск скрипта должен осуществляться в отдельном рабочем каталоге для данного входного файла.

На рисунке 2 показан вид вытягиваемого стакана в момент времени, когда в заготовке возникают наибольшие напряжения (рис. 2,а) и картина распределения напряжения в заготовке для того же момента времени (рис. 2,б).

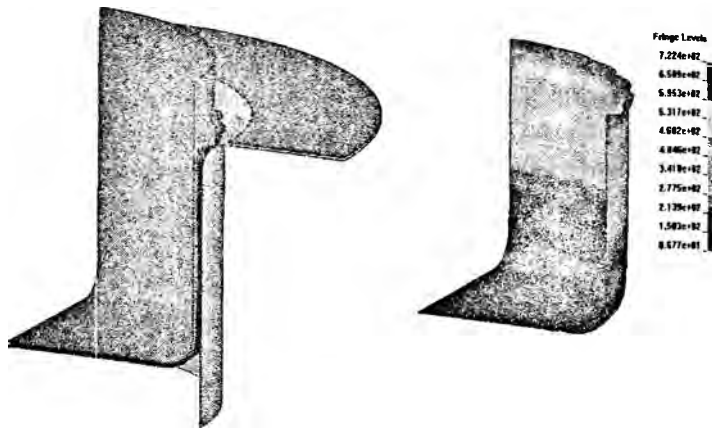


Рис.2. Результаты моделирования

#### Выводы:

1. Предложено поэтапное построение модели для среды LS DYNA в среде ANSYS.
2. На основе численного моделирования установлено, что максимальные напряжения возникают в месте, где матрица соприкасается с заготовкой (в месте изгиба) в момент времени 4,7 с. Максимальные напряжения соотносятся с допустимыми как 1 к 1,1.
3. Для снижения напряжений рекомендуется изменить скорость движения пуансона, взять толще заготовку, изменить силу, действующую на прижим.

#### Литература

1. Голубев, Ю. В. Лабораторный практикум / Ю. В. Голубев. – 2002. – 123 с.
2. Бородуля, А. В. Методические указания к проведению инженерных расчётов в режиме удалённого доступа к суперкомпьютеру “СКИФ” / А. В. Бородуля, В. А. Кочуров, В. В. Напрасников. – Минск, 2007. – 26 с.

**Структура внешней оболочки для создания  
оптимизационной модели при выполнении анализа на основе  
конечноэлементных пакетов**

Напрасников В. В., Пилипенко Д. В., Шахова И. А.  
Белорусский национальный технический университет

При поиске рационального или наилучшего варианта системы с распределенными параметрами исследователь часто использует в качестве инструмента моделирования какой-либо готовый пакет конечноэлементных расчетов.

Может оказаться, что пакет не оснащен средствами проведения оптимизационных вычислений. Одним из таких пакетов, например, является FlexPDE. Если же такие средства в пакете присутствуют (ANSYS, NASTRAN), то они могут не удовлетворять исследователя либо по степени документированности, либо по особенностям реализованных в них алгоритмов оптимизации, либо по присутствующим у этих средств ограничениям. Например, как отмечают авторы [1], в CosmosWorks накладывать ограничения на массу или объем нельзя.

Поэтому в ряде случаев необходимо создавать собственные реализации методов оптимизации. В таких случаях необходим промежуточный инструмент, для программной работы с конечноэлементными пакетами.

В данной работе предлагаются архитектура и реализация подобной оболочки для таких пакетов как ANSYS и FlexPDE.

Необходимыми условиями при реализации такой стратегии являются:

- возможность обработки конечноэлементной модели в пакетном режиме;
- возможность получения вычисленных значений целевой функции (их может быть несколько при многокритериальной оптимизации) и значений функциональных ограничений.

Схема построения вычислений в общем виде представлена на рис. 1. Изложим особенности её реализации для среды FlexPDE. Оболочка состоит из двух модулей: препроцессор и расчетный модуль.



Рис.1 Схема взаимодействия модулей

Препроцессор анализирует файл FlexPDE и возвращает все параметры, найденные в файле. Затем пользователь указывает, какие из найденных параметров будут входными, а какие выходными.

При наличии функциональных ограничений они вводятся пользователем. Подготовленные таким образом данные записываются в командный файл.

Расчетный модуль анализирует командный файл, созданный препроцессором, заменяет соответствующие параметры в файле модели и запускает FlexPDE для выполнения однократного анализа. По окончании анализа его результаты считываются из выходного файла, который подготавливает FlexPDE, оболочка накладывает функциональные ограничения и возвращает результат, который будет использован на очередном шаге оптимизации.

С точки зрения программной реализации модуль представляет собой dll-файл FlexModel.dll, который состоит из двух модулей-процедур:

procedure SetParamsDialog() – вызывает препроцессор.

function FuncResult(Vect: array of real): double - посылает модель на расчет (однократный анализ).

Командный файл представляет собой ini-файл, в котором хранится необходимая для расчетов информация.

С целью унификации аналогичное приложение для работы с конечноэлементным комплексом ANSYS архитектурно и программно построено на тех же принципах, что и с комплексом FlexPDE. Поэтому целесообразно рассмотреть лишь те элементы реализации, которые являются отличительными для ANSYS.

В отличие от командного файла FlexPDE, командный файл ANSYS не имеет строгой структуры и представляет собой произвольный набор команд. Единственным ограничением

является применение для переменных следующего формата объявления: Имя\_переменной = число.

Все выходные параметры модели (критерии) располагаются в командном файле в блоках /output и входят как переменные в функции \*vwrite, причем количество функций и переменных в них неограниченно. Приложение также использует функции стандартного вывода presol и pretab. В качестве значения параметра стандартного вывода берется максимальное по модулю число из сгенерированного функцией массива.

Первичное редактирование командного файла выполняется один раз вначале операции оптимизации и заключается в замене всех присутствующих в файле блоков вывода на один направленный блок (с указанием понятного для приложения имени и расположения файла результатов), сформированный приложением в соответствии с пользовательским набором целевых функций. Вторичное редактирование выполняется при очередном запуске расчетного модуля.

Комплекс ANSYS запускается в пакетном режиме с указанием командного файла модели.

Выводы

1. Предложена общая вычислительная схема для построения связи с внешней оптимизационной программой.
2. Реализован вариант этой схемы в виде диалоговой оболочки для среды ANSYS и FlexPDE безотносительно к характеру решаемой задачи.

### Литература

1. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский [и др.]. – СПб.: БХВ – Петербург, 2006. – 800 с.
2. Напрасников, В. В. Разработка оптимизационной модели решения задач геомеханики / В. В. Напрасников, Ю. В. Кураленко, М. А. Журавков, В. Т. Придухо // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 2-ой междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2004. – С. 196–200.



УДК 622.1001.5; 681.4

**Подготовка геометрической части конечноэлементной модели месторождения полезных ископаемых по данным геологических обследований**

Напрасникова Ю. В., Филатов М. В.

Белорусский национальный технический университет

При проведении горных работ в окрестности выработки развивается такое напряженно-деформированное состояние (НДС) породы, при котором могут возникнуть трещины или произойти обрушение кровли выработки. Поскольку при возникновении трещиноватости в область выработки могут проникать грунтовые воды, а обрушение кровли увеличивает опасность эксплуатации выработки, то необходимо адекватно рассчитывать НДС в окрестности выработки.

Большой интерес представляет задача об исследовании НДС в массиве горных пород с учетом возможности распространения трещин до водоносных горизонтов.

Поскольку натурные эксперименты невозможны, использование известных решений классической теории упругости весьма ограничено, то единственным подходом для обоснованного проектирования расположения выработок является численное моделирование процесса деформирования и напряженного состояния подрабатываемого массива.

При этом возникает вопрос о построении моделей геологического месторождения на основе трехмерных расчетных схем, в том числе с использованием уточненных данных по результатам геодезических исследований.

Обобщенные физико-механические параметры пород Старобинского месторождения калийных солей представлены в таблице 1. Данные результатов геологических обследований представлены [2].

На практике координаты точек любой поверхности, определяемые путем обмера и используемые затем для получения ее математического описания, известны с некоторой погрешностью, величина которой зависит от погрешности средств измерения. Если погрешность достаточно велика, то это крайне неблагоприятно сказывается на поведении интерполяционной функции.

Таблица 1 – Обобщенные физико-механические параметры пород Старобинского месторождения калийных солей

Порода	Плотность, (кг/м <sup>3</sup> )	Модуль Юнга, (ГПа)	Коеф. Пуассона	Модуль сдвига, (ГПа)	Предел на сжатие, (МПа)	Предел на растяжение, (МПа)	Угол внутр. Трения (град)	Коеф. сцепления, (МПа)
Отложения	2300	0.20	0.49	0.07	10.0	1.75	34.2	2.65
Глина	2150	0.16	0.4	0.20	6.30	1.00	34	1.20
Мергель глинистый	2500	0.80	0.30	0.23	10.0	0.50	20	4.40
Каменная соль	2300	1.75	0.28	0.68	25.2	1.80	44	6.80
Сильвинит	2300	1.64	0.29	0.64	28.9	2.00	44	6.30
Подстилающая соль	2300	2.00	0.35	0.74	35.2	2.40	44	6.80

Поэтому для математического описания экспериментальных данных, определенных с погрешностью, более целесообразно применение сглаживающих функций. Под сглаживающей обычно понимают функцию, проходящую вблизи заданных узлов при этом более "гладкую", чем интерполяционная.

Будем искать аппроксиматор в виде

$$Z(x, y) = \sum_{k,j=1}^m C_{k,j} \cdot \Psi_{k,j}(x, y), \quad (1)$$

где  $\Psi_{k,j}(x, y)$  - задаваемые базисные функции;

$C_{k,j}$  - константы, которые нужно подобрать исходя из требования близости аппроксиматора к табличным данным, которое в аналитическом виде может быть записано следующим образом:

$$\sum_{\alpha=1}^n (Z(x_{\alpha}, y_{\alpha}) - z_{\alpha})^2 \xrightarrow{c} \min, \quad \alpha = 1, \dots, n, \quad (2)$$

где  $(x_{\alpha}, y_{\alpha}, z_{\alpha})$  - таблица экспериментальных значений.

Применение этого подхода, например, для описания нижней границы глинисто-мергелистой толщи при наборе базисных функций

$$\left( \begin{array}{cccc} 1 & y & \frac{y^2}{30000} & \frac{y^3}{30000^2} \\ x & xy & x \frac{y^2}{30000} & x \frac{y^3}{30000^2} \\ \frac{x^2}{20000} & \frac{x^2}{20000} \cdot y & \frac{x^2}{20000} \cdot \frac{y^2}{30000} & \frac{x^2}{20000} \cdot \frac{y^3}{30000^2} \\ \frac{x^3}{20000^2} & \frac{x^3}{20000^2} \cdot y & \frac{x^3}{20000^2} \cdot \frac{y^2}{30000} & \frac{x^3}{20000^2} \cdot \frac{y^3}{30000^2} \end{array} \right),$$

приводит к набору констант:

$$\left( \begin{array}{cccccc} 1.51 \times 10^{-13} & 1.935 \times 10^{-9} & 1.077 \times 10^{-9} & 1.282 \times 10^{-9} & 0 \\ 1.314 \times 10^{-9} & 5.915 \times 10^{-6} & -3.244 \times 10^{-6} & 2.275 \times 10^{-6} & 0 \\ 6.263 \times 10^{-10} & -2.269 \times 10^{-6} & -6.618 \times 10^{-6} & -9.745 \times 10^{-7} & 0 \\ 4.952 \times 10^{-10} & 1.579 \times 10^{-6} & -2.988 \times 10^{-7} & 4.584 \times 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right).$$

Выполнив определение всех необходимых наборов констант для всех слоев, построим 3D модель в среде FlexPDE (Рисунок1).

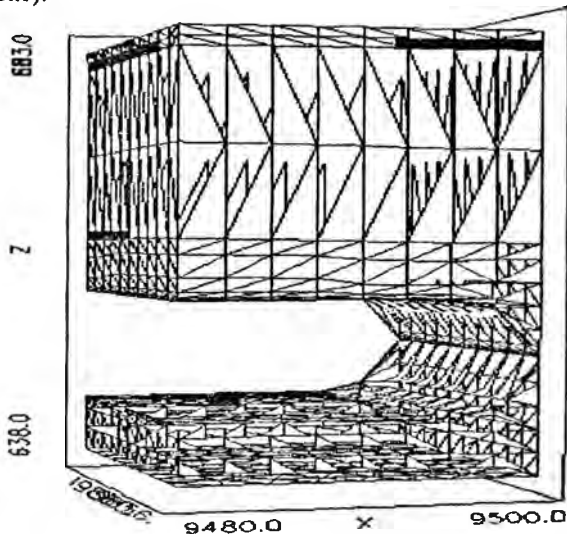


Рис.1. 3D-модель в среде FlexPDE. Район выработки

#### Литература

1. Журавков, М. А. Численное исследование напряженного состояния массива горных пород с выработкой / М. А. Журавков, Ю. В. Напрасникова // Наука – образованию, производству, экономике: материалы международной научно-технической конференции в 2 т. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – Том 1. – С. 199–203.
2. Разработать комплексные геологические критерии по отнесению ГМТ к ВЗТ, концепцию механизма и концептуальную модель поступления рассолов в горные выработки: отчет о НИР / ОАО Белгорхимпром. – Минск, 2002. – 34 с.

УДК 519.63

## Оптимизация проектных решений на основе параллельного программирования

Придухо В. Т., Пилипенко Д. В., Багдеев П. А.  
Белорусский национальный технический университет

### *Введение*

Современные методы оптимизации далеко не всегда справляются с решением реальных задач без помощи человека. Нет, пока такой теории, которая учла бы любые особенности функций, описывающих постановку задачи. Следует отдавать предпочтение таким методам, которыми проще управлять в процессе решения задачи.

При решении конкретной задачи оптимизации исследователь прежде всего должен выбрать математический метод, который приводил бы к конечным результатам с наименьшими затратами на вычисления или же давал возможность получить наибольший объем информации об искомом решении.

Как правило, нельзя рекомендовать какой-либо один метод, который можно использовать для решения всех без исключения задач, возникающих на практике. Одни методы в этом отношении являются более общими, другие - менее общими. Наконец, целую группу методов нелинейного программирования на определенных этапах решения оптимальной задачи можно применять в сочетании с другими методами, например динамическим программированием или принципом максимума.

Пожалуй, наилучшим путем при выборе метода оптимизации, наиболее пригодного для решения соответствующей задачи, следует признать исследование возможностей и опыта применения различных методов оптимизации.

### *Постановка задачи*

В связи с вышесказанным было решено создать систему, которая бы проводила оптимизацию, используя одновременно несколько методов. Данная система должна отвечать следующим требованиям:

1. Реализация неструктурной оптимизации однокритериальных оптимизационных моделей

2. Использование при этом параллельного программирования, т.е. одновременное использование различных методов оптимизации в параллельном режиме
3. Расширяемость базы моделей
4. Расширяемость базы методов

### *Структура алгоритма*

Учитывая, что алгоритмы оптимизации существенно отличаются друг от друга по ряду показателей: области и скорости сходимости, трудоемкости поиска и т. д. Некоторые методы оптимизации (МО) хорошо сходятся вблизи оптимальной точки и плохо вдали, а некоторые, наоборот, быстро сходятся вдали от окрестности оптимальной точки и медленно в самой окрестности. Все сказанное приводит к выводу о необходимости комплексного применения МО при решении задач оптимального проектирования и выбора стратегии поиска.

*Первая стратегия решения задач* в подсистеме оптимального проектирования предусматривает на начальных этапах поиска применение глобальных процедур оптимизации для получения оценки глобального экстремума, а уточнение решения — быстросходящимися в окрестности оптимума локальными алгоритмами. Такая стратегия позволяет, во-первых, с достаточной надежностью и точностью определить значение глобального экстремума, а, во-вторых, снизить затраты на поиск. Снижение затрат обусловлено тем, что этапы глобального поиска могут выполняться с невысокой точностью и требовать поэтому минимального числа вычислений функции качества, а этапы локального уточнения производятся из области притяжения глобального экстремума.

*Второй стратегией решения задач* оптимизации является параллельное решение сформулированной задачи одновременно двумя и более алгоритмами оптимизации. В этом случае управляющая программа подсистемы осуществляет одновременный запуск программ, реализующих выбранные МО, и контролирующего блока. МО решают поставленную пользователем задачу оптимизации, в функции же контролирующего блока входит наблюдение за ходом отдельных процессов и корректировка их траекторий на основе оценки складывающейся в процессе поиска ситуации.

Разработано соответствующее программное обеспечение для реализации описанных выше стратегий по следующим принципам (рис. 1).



Рис.1 Схема оптимизационного алгоритма

При старте решатель получает стартовые параметры, после чего передает стартовые параметры в методы и запускает цикл поиска. Методы работают

параллельно до тех пор, пока не будет выполнено условие перезапуска алгоритмов.

При выполнении данного условия решатель

- 1 получает от методов найденные ими лучшие решения
- 2 выбирает из них лучшее
- 3 устанавливает его во все методы как стартовую точку
- 4 предлагает выбрать методы для следующего круга цикла
- 5 стартует следующий круг цикла

#### Описание программы

С точки зрения программной реализации данный программный продукт реализован в среде C#, методы реализованы в сборке Methods.dll, модели реализованы в сборке Model.dll. Трехмерная графика реализована с применением DirectX. Среде C# выбрана в связи с тем, что она представляет достаточно гибкий и удобный инструмент для разработчика, а также, в связи с тем, что в Dot.NET реализована достаточно стабильная работа многопоточных приложений.

Интерфейс пользователя состоит из одного окна, в котором производятся все действия связанные с процессом оптимизации и ряда вспомогательных диалоговых окон (рис. 2).

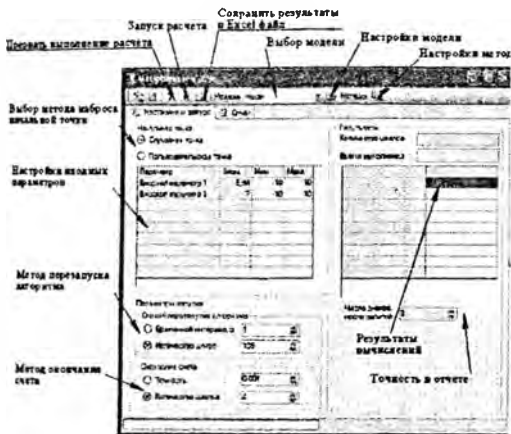


Рис.2 Интерфейс пользователя

По результатам вычислений отображается окно, в котором отображается двухмерное сечение по заданным осям оптимизируемой функции и траектория поиска алгоритма оптимизации.

Было проведено тестирование программного

продукта на ряде тестовых функций, таких как функция Розенброка, «Асимметричная долина», функция Пауэлла, функция Зангвилла. По результатам тестов оказалось, что алгоритмы оптимизации обладают хорошей сходимостью, что позволяет предложить данный оптимизационный модуль для решения широкого круга задач.

### Выводы

Применение данного программного продукта целесообразно по нескольким причинам.

- Независимость программы от других программ. Следовательно, увеличена скорость работы методов
- Запуск расчета возможен и неподготовленным в области методов оптимизации пользователем.
- Визуализация работы методов реализована на графике (построение поверхности, траектории методов) и в списке результатов.
- Возможность расширения библиотеки методов и моделей.



# **Разработка месторождений полезных ископаемых**

УДК 622.363

## **Математическая модель принятия решений при организации работ очистных и проходческих комплексов**

Шпургалов Ю. А.

Белорусский национальный технический университет

Чаще всего эффективность производства повышается за счет внедрения технологий основанных на новейших научных достижениях. Однако технологическое переоснащение производства требует значительных капитальных вложений и временных затрат. Все это может привести к снижению реального экономического эффекта по сравнению с ожидаемым. Вместе с тем, существует и другой источник повышения эффективности производства – внедрение результатов современных научных достижений в процессе организации производства. Применительно к условиям калийных рудников важнейшей задачей является организация работ очистных и проходческих комплексов, что существенно влияет на коэффициент использования дорогостоящего, как правило, импортного оборудования.

Очевидно, что повышение коэффициента использования горнодобывающего оборудования приведет к значительному снижению затрат на амортизационные отчисления.

С другой стороны существует объективная необходимость в существовании на руднике некоторого количества резервного оборудования, гарантирующего стабильную работу рудника и обогатительной фабрики.

Из выше изложенного следует, что представленная в статье концепция построения модели принятия решений при разработке мероприятий направленных на максимально эффективное сочетание в пространстве и времени очистных и проходческих комплексов является актуально научной задачей. Проведенные автором исследования процессов проектирования рудников, проектирования развития горных работ, управления производственной деятельностью рудников, организации их

работ ([1] – [2]) позволяют заключить, что принимать ответственные решения по организации работ очистных и проходческих комплексов приходится в тот момент, когда один из горнопроходческих или горно-добычных комплексов выполнил весь объем работ на своем производственном участке. Это предполагает необходимость решения ряда задач.

Требуется принять решение, на какой очередной производственный участок должен быть отправлен освободившийся комплекс, при том, что этот комплекс может быть направлен в резерв, в ремонт или списан. Необходимость решения этой задачи предопределяет введение в математическую модель целочисленной неизвестной величины  $X_{k,m}$  равной 1, если комплекс с номером  $k$  направляется на производственный участок с номером  $m$  ( $m < m_{\max}$ ), в резерв ( $m = m_{\max}+1$ ), ремонт ( $m = m_{\max}+2$ ), на списание ( $m = m_{\max}+3$ ) и равной 0 во всех остальных случаях. Также в качестве неизвестных необходимо ввести величины  $t_{k,m}^H$  и  $t_{k,m}^0$ , являющиеся целочисленными и определяющие время (номер месяца отрезка времени  $T$ , для которого решается задача организации работ) начала и окончания работ комплекса с номером  $k$  на участке с номером  $m$ , нахождение его в резерве или ремонте. Третьим подмножеством неизвестных являются величины  $U_{k,m,t}$  представляющие собой среднемесячную производительность комплекса с номером  $k$  за месяц с номером  $t$ . Исходя из положений теории принятия решений, принятое решение считается обоснованным, если оно обеспечивает достижение поставленной цели оптимальным способом исходя из выбранных критериев и удовлетворяет всем существенным для разрешаемой проблемы ограничениям и условиям.

Из этого вытекает, что оптимизационная математическая модель положенная в основу моделирования на ЭВМ принятия решений при организации работ очистных и проходческих комплексов может представлять собой экономико-математическую модель (1), содержащую целевую функцию и ограничения.

$$\left\{ \begin{array}{l} F(\bar{X}_n, \bar{A}_1) \rightarrow \text{extr} \\ \Phi_r(\bar{X}_n, \bar{A}_1) \leq 0 \quad r \in [1, R] \\ Q_s(\bar{X}_n, \bar{A}_1) = 0 \quad s = [1, S], \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $F$  — обозначает целевую функцию модели;  
 $\Phi_r(\bar{X}_n, \bar{A}_1)$  — математическое выражение  $r$ -го ограничения, где  $R$  их количество;

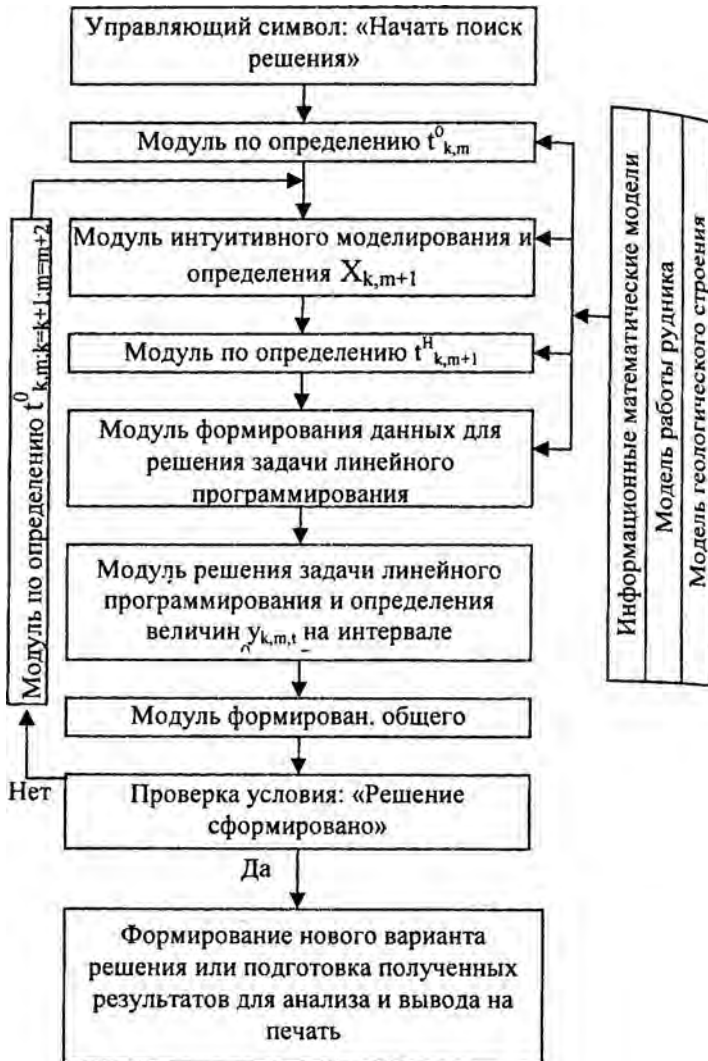


Рис.1 Алгоритм численной реализации на ЭВМ интеграционной модели организации работ добычного оборудования

$Q_s(\bar{X}_n, \bar{A}_1)$  - математическое выражение  $s$ -го условия, которому должно удовлетворять решение задачи, а  $S$  - их количество;  $\bar{X}_n$  - подмножество неизвестных величин;  $\bar{A}_1 \in \{a_1, a_2, \dots, a_1\}$  - подмножество параметров, значения которых считаются известными.

В качестве целевой функции выбрана величина  $K_n$  характеризующая коэффициент использования оборудования.

$$K_n = \frac{\sum_{k=1}^k (t_{k,m}^0 - t_{k,m}^H) \cdot d_k}{K \cdot T \sum_{k=1}^k d_k} \quad (2)$$

где  $d_k$  - весовые коэффициенты равные отношению производительности комплекса ( $P_k$ ) к его балансовой стоимости ( $B_c$ ).

Описание выше названных ограничений, их формализация, а также метод численного решения задачи (1), названный методом интеграционного моделирования, представлен в работах [1]-[2]. Алгоритм поиска численного решения задачи (1) представлен блок-схемой на рис. 1.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Эффективность современного горного производства может быть повышена за счет увеличения коэффициента использования горнодобычного оборудования за счет улучшения организации его работы.

2. Близкое к оптимальному решению задачи организации работ очистных и проходческих комплексов может быть получена путем построения интеграционной математической модели, которая численно может быть реализована на ЭВМ типа РС/АТ.

### Литература

1. Богатов, Б. А. Математическое моделирование и обоснование решений в горном производстве / Б. А. Богатов, Ю. А. Шпургалов. - Минск: Белорусская горная академия, 2002 г. - 367 с.
2. Шпургалов, Ю. А. Математическое моделирование для обоснования принятия решений в процессах добычи калийных руд: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ю. А. Шпургалов; МГГУ. - М., 2004 г. - С. 36.

## Способ поддержания выработок с помощью анкеров комбинированного типа

Погребенко Д. В.

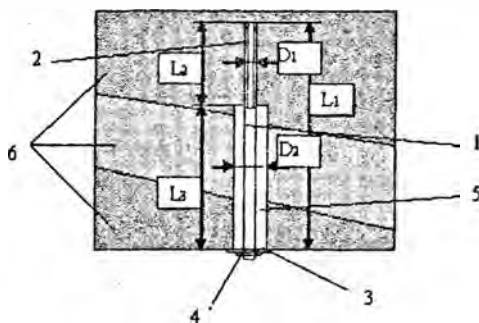
Белорусский национальный технический университет

В условиях Солигорских калийных рудников для охраны горных выработок практическое применение получили анкера: клино-распорные и винтовые.

Достоинство винтовых анкеров состоит в хорошем контакте замка с породным массивом, что сдерживает расслоение пород. К их недостаткам относится ограниченная податливость (до 25 – 30 мм), разрушаются винтовые штанги в виде среза. Разрыв происходит в месте наибольших смещений породных прослоев.

У анкеров «Эстонсланец» - слабым местом является их замок, вместе с тем наличие податливости беззамковой части позволяет использовать их в наиболее сложных условиях: при креплении склонных к скалыванию сводчатой части контура и бортов штреков.

Предлагается новый способ анкерного крепления (Рис.1).



1 – металлический цилиндрический стержень; 2 – замковая часть анкера, закрепляется устойчивом слое; 3 – стальная плита; 4 – нагайка; 5 – расширенная часть шпура; 6 – породные слои;  $D_1$  – диаметр для головной винтовой части анкера, длиной  $L_2$  (м);  $D_2$  – диаметр расширенной части шпура, длиной  $L_3$  (м);  $L_1$  – длина анкера (м);  $L_2$  – длина винтовой части шпура (м);  $L_3$  – длина расширенной части шпура (м);

Рисунок 1 – Способ анкерного крепления

Очевидно, что увеличить несущую способность анкерной крепи можно, применяя комбинацию наиболее соответствующих внешним условиям элементов разных типов анкеров: у винтовых штанг наиболее прочным местом является отсутствие горизонтальной податливости в нижней, ближней к контуру выработки части, у анкеров типа «Эстонсланец» - слабым местом является их замок.

С целью создания податливости в горизонтальной плоскости при тангенциальных напряжениях, шпур для установки анкера выполняется двухступенчатым, с расширением не менее чем в два раза от устья до замковой части анкера. Способ осуществляется следующим образом: вначале бурят шпур диаметром  $D_1$  - необходимым для закрепления головной винтовой части анкера, длиной  $L_1$  - равной всей длине анкера; затем расширяют шпур от устья на длину  $L_3$  до диаметра  $D_2$  до будущей головной части анкера, длиной  $L_1$ , завинчивая его в шпур на участке  $L_2$  и устанавливая опорную плитку - 3 и натяжную гайку - 4.

Для реализации описанного выше способа крепления, со шпуром переменного диаметра, возможно использование стандартных винтовых металлических анкеров, а также анкеров комбинированного типа, замковая часть которых представляет собой отрезок винтовой штанги, а беззамковая - аналогична крепи Эстонсланец (Рисунок 2).



**Рисунок 2 – анкер комбинированного типа**

Испытания нового способа анкерного крепления с применением как обычных винтовых штанг, так и анкеров комбинированного типа проводились на 4-й восточной панели, на участке транспортного штрека лавы № 69.

Испытаниям на вытягивание подвергались по одному анкеру каждого типоразмера из числа установленных. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – Результаты испытаний комбинированных анкеров на вытягивание**

Длина анкера,	Длина замковой части, м	Длина незамковой части (м) и ее характеристики	Относительное удлинение анкера в процессе испытаний, %	Максимальное усилие вытягивания анкера, кН
1,65	0,35	1,3, цельная	3,5	75
1,75	0,45	1,3, цельная	4,0	85
2,0	0,6	1,4, цельная	5,1	115

В следствии снижения реакции отпора нижней части замка усилие вытягивания перераспределяется на вышележащую часть. Таким образом, из-за снижения прочностных свойств нижней пачки пород в районе контакта с винтовым замком, последний деформируется не весь сразу, как единая конструкция, а лишь на отдельных участках. На этих участках замок анкера удлиняется, уходит из-под нагрузки, перенося ее на соседние участки.

В целом анализ проведенных испытаний позволил сделать следующие выводы:

- работоспособность применяемых на Солигорских рудниках типов анкеров определяющим образом зависит как от их конструктивных особенностей, так и вида, строения пород, в которые они устанавливаются.

- комбинация обладающего пластическими свойствами винтового замка с более упругой беззамковой частью придает анкеру новые свойства: существенно (до двух раз) увеличенную упругую податливость с сохранением высокой несущей способности при растяжении всего анкера, увеличенную податливость при изгибе и работе на срез в следствии смещения ближней к кровле части пород.

- длину комбинированного анкера следует выбирать исходя из схемы подшивки нижележащих, отслаивающихся пород кровли к лежащим выше, за пределами свода возможного отслоения. В этих породах должен располагаться весь замок анкера, длину которого необходимо выбирать в зависимости от агрегатной прочности и однородности состава пород. Для однородных прочных пород длины замка в 0,45 м достаточно, для неоднородных пород, содержащих до 50% глинистых

прослойков длина замка должна быть не менее 0,6 м, а с большим содержанием глины ее необходимо увеличить до 0,8 - 0,9 м.

Таким образом, предполагаемая конструкция анкерного крепления позволяет повысить устойчивость заанкерованных пород кровли, надежность закрепления выработки и безопасность работ в условиях интенсивных горизонтальных смещений породных слоев и раскрытия слоевых трещин на границе контакта пород.

УДК 622.271

### **Определение сейсмобезопасных параметров взрывных работ при реконструкции промышленных объектов**

Оника С. Г., Кондратьев С. В.

Белорусский национальный технический университет

При реконструкции промышленных объектов широко применяется взрывной способ разрушения оснований зданий и сооружений в действующих цехах или непосредственной близости от охраняемых промышленных и бытовых объектов, так как он позволяет в кратчайшие сроки подготовить площади для строительства новых технологических линий, зданий и промышленных сооружений. Эти работы, как правило, проводятся в стесненных условиях и к ним предъявляются повышенные требования с точки зрения сейсмической безопасности охраняемых объектов.

Выполнение взрывных работ, связанных с ликвидацией промышленного оборудования в стесненных условиях, требует надежных гарантий безопасности расположенных вблизи объектов от воздействия сейсмических колебаний при проведении взрывных работ.

При взрывном разрушении сооружений (фундаментов), шахтных установок источником сейсмической энергии является кинетическая энергия фрагментов фундамента и некоторая часть потенциальной энергии ВВ.



Сейсмический очаг представляет собой изменяющийся во времени некоторый объем необратимого уплотнения грунта при ударном взаимодействии в течение некоторого конечного времени  $\Delta t$ .

Характер распространения сигнала в области ударной волны является сверхзвуковым, поэтому и область ударного взаимодействия разрушаемой конструкции и грунта представляет собой конус объема (рис. 1).

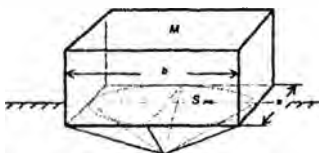


Рис. 1. Взаимодействие разрушаемого объекта и грунта

В пространстве сейсмический очаг ограничен и по вертикали, в данном случае вертикаль ограничения является длиной пробега ударной волны  $R(t)$ , поскольку именно в этом направлении происходит максимальное уплотнение грунта в результате удара разуплотненной массы фундамента о поверхность грунта. Сам же сейсмический очаг, учитывая сверхзвуковую скорость ударной волны, имеет коническую форму, основанием которой является площадь вертикальной проекции разрушаемого объема фундамента на поверхность грунта, а вершиной – фронт ударной волны, ось конуса проходит через центр тяжести площади ударного контакта с грунтом (площади вертикальной проекции разрушаемого объема фундамента на поверхность грунта).

Окончательно выделив сейсмический очаг в области взрыва, можно определить массу грунта в сейсмическом очаге в любой момент времени.

Процесс вырождения ударной волны  $R(t)$  в волну сейсмическую (звуковую) очень кратковременен, поэтому приближенно взаимодействие ударных масс (разуплотненного фундамента и уплотненного грунта) можно описать законом сохранения количества движения при неупругом ударе.

По истечении весьма малого промежутка времени  $\Delta t$  ударная волна вырождается в сейсмическую, в грунте образуется уже обратимая деформация, движение фронта, а, следовательно, и тыла волны  $h(t)$  прекращается. Момент вырождения ударной

волны в сейсмическую (звуковую) является моментом перехода скорости ударной волны  $\dot{R}(t)$  в скорость звука  $C$ , то есть  $\dot{R}(\Delta t) = C$ .

Максимальное углубление в грунте определяется в виде

$$h_{\max} = \frac{3v_0 M}{\rho C S}, \quad (1)$$

то есть, скорость звука в грунте  $C$ , плотность грунта  $\rho$  и горизонтальные размеры сейсмического очага  $S$  однозначно определяют максимальное углубление.

Необходимо учитывать равномерное распределении ВВ в объеме разрушаемого фундамента, пространственное распределение – 1/6 общей энергии ВВ в каждом пространственном направлении.

Поскольку сейсмическая энергия начального движения грунта равна кинетической энергии ударной массы  $M$ , то начальную скорость можно определить по формуле

$$v_0 = 0,1D \sqrt{\frac{Q}{M}}. \quad (2)$$

Измерение вертикальной проекции разрушаемого объема фундамента на поверхность грунта позволяет учесть размеры сейсмического очага и в горизонтальном направлении, поскольку поверхность грунта с достаточной для практики точностью можно считать плоской.

На практике важно иметь оценку сейсмического эффекта, то есть величину, не превышающую некоторого верхнего предела. Следовательно, формула примет вид

$$v(r) \leq \frac{v_0 h_{\max}}{r}. \quad (3)$$

Подставляя в полученную формулу выражения (1) и (2), получим зависимость интенсивности колебаний от массы ВВ, рассредоточенной в разрушаемом объеме.

$$v = \frac{3QD^2}{\rho C S r}. \quad (4)$$

где  $Q$  – сейсмобезопасная масса ВВ, кг;  
 $v$  – допустимая скорость колебаний грунта, м/с;  
 $\rho$  – плотность грунта, кг/м<sup>3</sup>;  
 $C$  – скорость звука в грунте, м/с;  
 $S$  – площадь вертикальной проекции разрушаемого объема фундамента на поверхность грунта, м<sup>2</sup>;  
 $r$  – расстояние между охраняемым объектом и разрушаемым фундаментом, м;  
 $D$  – скорость детонации ВВ.

Эта формула позволяет оценить интенсивность сейсмических колебаний на расстоянии  $r$  от объекта в форме скоростей смещения, выраженных в м/с.

УДК 622.22

### **Технология отработки калийных пластов в сложных горно-геологических условиях Старобинского месторождения**

Зольников Н. А., Цыганков С. Н., Шваб Р. Г.

Белорусский национальный технический университет

Перспективными планами развития горных работ на РУП «ПО «Беларуськалий» Третьему калийному пласту отводится главная роль в деле поддержания и наращивания мощностей по выпуску калийных удобрений. В настоящее время в связи с истощением запасов Второго калийного пласта осуществляется перевод горных работ на Третий горизонт на рудниках 1 и 2 РУ, ведется проходка стволов на Краснослободском участке, планируется вскрытие Березовского участка Старобинского месторождения, начаты горные работы на I калийном горизонте рудника 1 РУ, запасы которого были отнесены ранее к забалансовым.

Преобладающая доля Третьего пласта в добыче руды планируется и на руднике 4 РУ. Однако широкое развитие горных работ на Третьем горизонте здесь сдерживается отсутствием эффективной технологии и средств механизации очистных работ с выемкой всех промышленных силвинитовых слоев (2, 3 и 4) в сложных горно-геологических условиях, под

которыми, в первую очередь, понимается большая (свыше 850 м) глубина разработки и связанная с этим, а также с геологическим строением и составом непосредственной кровли, чрезвычайно низкая ее устойчивость. Мелкостроенная и слабая непосредственная кровля Третьего пласта является причиной преждевременного разрушения подготовительных выработок, пройденных по верхнему 4-му сильвинитовому слою. В таких условиях выемка 4-го слоя не производится и он безвозвратно теряется в недрах. Учитывая, что в 4-ом сильвинитовом слое сосредоточено около 1/3 всех запасов пласта, а также то обстоятельство, что с ростом глубины разработки существенно увеличиваются размеры межпанельных целиков, общие потери полезного ископаемого на Третьем горизонте Четвертого шахтного поля составляют в настоящее время 46,0 %. Необходимо также отметить, что оставление широких межпанельных целиков является одной из основных причин динамических проявлений горного давления в очистных забоях, так как способствует образованию за крепью лавы со стороны широких целиков породных консолей увеличенных размеров.

В связи с выше изложенным назрела необходимость разработки в ближайшее время новых технических решений по технологии и оборудованию для выемки Третьего пласта в сложных горно-геологических условиях рудника 4 РУ с повышенным извлечением запасов из недр за счет вовлечения в отработку 4-го сильвинитового слоя и существенного уменьшения размеров оставляемых охранных целиков.

Результаты выполненных на Старобинском месторождении исследований и накопленный опыт отработки Третьего калийного пласта длинными очистными забоями, в том числе и в сложных горно-геологических условиях, а также зарубежный опыт отработки лавами пологих угольных и калийных пластов позволяют сформулировать основные принципиальные положения, которые необходимо учитывать при разработке технологических схем в сложных горно-геологических условиях залегания Третьего калийного пласта:

- выемку Третьего калийного пласта с вовлечением в отработку 4-го сильвинитового слоя на участках шахтного поля рудника 4 РУ с глубиной более 850 м необходимо осуществлять с применением технологических схем, предусматривающих

слоевую выемку или выемку сразу на полную мощность пласта одной лавой;

- количество панельных и других подготовительных выработок, необходимых для работы очистного комплекса, должно быть минимально необходимым, при этом минимальным должны быть и пролеты этих выработок, самым существенным образом влияющие на их устойчивость;

- разработку технологических схем для столбовой системы необходимо вести с учетом расположения подготовительных выработок в нижней части пласта по слоям 2, 2-3 и 3, которые должны иметь привязку под наиболее устойчивый прослой, охраняться с использованием компенсационных щелей и крепиться анкерами, а при необходимости и специальной крепью; подготовка панелей для отработки пласта сразу на всю мощность одной лавой может осуществляться с использованием полевых выработок;

- при сплошной системе разработки 4-го сильвинитового слоя выемочные штреки, оформляемые по этому слою очистным комбайном, нишенарезной машиной, стреловидным проходческим комбайном или другим видом оборудования, должны поддерживаться позади забоя лавы специальными видами крепей, бутовой полосой и т.д. в течение короткого промежутка времени, обеспечивающего устойчивое состояние выработок.

Для сложных горно-геологических условий Третьего калийного пласта, исходя из результатов выполненных на Старобинском месторождении исследований и накопленного опыта отработки Третьего калийного пласта длинными очистными забоями, а также зарубежного опыта отработки лавами пологих угольных и калийных пластов, разработаны технологические схемы со средствами механизации, которые условно можно разделить на 6 групп.

**Первая группа** – технологические схемы слоевой выемки с опережающей отработкой 4-го сильвинитового слоя сплошной системой на подготовительные выработки, проводимые в нижней части пласта вслед за продвижением лавы в разгруженной от горного давления зоне, и последующей отработкой слоев 2, 2-3 и 3 столбовой системой в противоположном направлении с

использованием ранее пройденных подготовительных выработок.

**Вторая группа** – технологические схемы слоевой выемки с опережающей обработкой 4-го сильвинитового слоя столбовой системой на подготовительные выработки, пройденные в нижней части пласта впереди очистного забоя, и последующей обработкой слоев 2, 2-3 и 3 также столбовой системой с проведением новых подготовительных выработок.

**Третья группа** – технологические схемы слоевой выемки пласта лавой переменной вынимаемой мощности с расположением одной полулавы по слоям 2, 2-3 и 3 под выработанным пространством верхнего слоя смежного столба, а другой полулавы по 4-му сильвинитовому слою – в нетронутым массиве, наличием в средней части наклонного участка длиной не менее 30 м для соединения полулав.

**Четвертая группа** – технологические схемы слоевой селективной выемки пласта сближенными лавами на общие выемочные штреки с вовлечением или без вовлечения в обработку 1-го сильвинитового слоя .

**Пятая группа** – технологические схемы последовательной селективной выемки пласта двумя трехслойными лавами с вовлечением в обработку 1-го сильвинитового слоя .

**Шестая группа** – технологические схемы селективной выемки пласта на полную мощность одной лавой с частичной или полной закладкой выработанного пространства разрушенным галитом.

Все разработанные технологические схемы характеризуются повышенным извлечением запасов из недр за счет отсутствия широких межпанельных целиков и небольшим удельным объемом горно-подготовительных работ. В технологических схемах с селективной выемкой пласта, кроме того, достигается высокое содержание полезного компонента (КС $\ell$ ) в добываемой руде и снижается вероятность динамических обрушений кровли в очистных забоях. Представленные технологические схемы приняты для выполнения технико-экономического анализа с целью окончательного выбора варианта технологии на опытно-промышленном участке рудника 4 РУ.

# Металлургические технологии

УДК 536.2+669.1

## Влияние геометрических и теплофизических параметров шихтовых материалов на скорость их нагрева

Тимошпольский В. И., Корнеев С. В.

Белорусский национальный технический университет

Основными параметрами, влияющими на значения коэффициентов переноса являются пористость, температура и распределение размеров структурных элементов. Если при определении объемной теплоемкости пористого материала, как правило, трудностей не возникает, так как она однозначно связана с насыпной плотностью материала, то при определении эффективного коэффициента теплопроводности возникает ряд особенностей. В данной работе исследовано влияние геометрических и теплофизических параметров шихты на скорость их нагрева на примере металлического лома, который является основным шихтовым материалом на многих металлургических производствах.

### Коэффициент эффективной теплопроводности материала

Анализ методик расчета теплофизических характеристик показал, что существует два подхода при расчете эффективного коэффициента теплопроводности: без учета и с учетом переноса излучения внутри пористого объема. Первый подход справедлив в области низких температур (до 300 °С). Второй подход применен в работах [1, 2], при моделировании плавления металлошихты в дуговой сталеплавильной печи.

Рассмотрим определение коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры, пористости и различных толщин кусков материала без учета продувки слоя горячими газами.

При перпендикулярном расположении слоев сплошного металла к направлению распространения теплоты эффективный коэффициент теплопроводности можно определить по формуле (1):

$$\lambda_{эфф} = \frac{\lambda_m \cdot \lambda_n}{\lambda_m \cdot P + \lambda_n \cdot (1 - P)} \quad (1)$$

где  $\lambda_m(T)$  – коэффициент теплопроводности твердого металла в зависимости от температуры, Вт/(м·К);  $\lambda_l(T)$  – эффективный коэффициент теплопроводности воздушных прослоек, Вт/(м·К);  $P$  – пористость объема металлошихты.

При параллельном расположении слоев к направлению распространения теплоты эффективный коэффициент теплопроводности можно определить по формуле (2):

$$\lambda_{\text{эфф}}(T, P) = \lambda_m(T) \cdot (1 - P) + \lambda_l(T) \cdot P, \quad (2)$$

Пористость можно определить, зная насыпную плотность металлошихты по формуле (3):

$$P = \frac{\rho_m - \rho_n}{\rho_m}, \quad (3)$$

где  $\rho_m$  – плотность металла, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_n$  – насыпная плотность металлошихты, кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент теплопроводности внутри воздушных прослоек (4) складывается из коэффициента теплопроводности воздуха внутри пор и эффективного коэффициента лучистой теплопроводности, рассмотренного например, в работе [3]:

$$\lambda_a(T) = \lambda_a(T) + \frac{32}{9} \sigma T^3 h = \lambda_a(T) + \frac{32}{9} \sigma T^3 \frac{P}{1 - P} d, \quad (4)$$

где  $\lambda_a(T)$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T$  – температура, К;  $h$  – размер пор, м;  $d$  – размер куска металла.

При вычислении размера пор в зависимости от пористости и размера куска необходимо учитывать ограничения, чтобы не получить физически неверных результатов.

#### Моделирование распространения тепла в металлошихте.

Для проверки адекватности приведенных выше зависимостей эффективного коэффициента теплопроводности от размера кусков, насыпной плотности и температуры было проведено моделирование различных случаев нагрева пористого материала. Для сопоставления результатов моделирования с результатами экспериментов был проведен нагрев стального лома в нагревательной печи камерного типа со сводовым отоплением, установленной в ИТМО НАНБ. Для обеспечения приближения одномерной задачи лом укладывали в колодец, сооруженный из шамотного кирпича и установленный на поду печи. Средняя

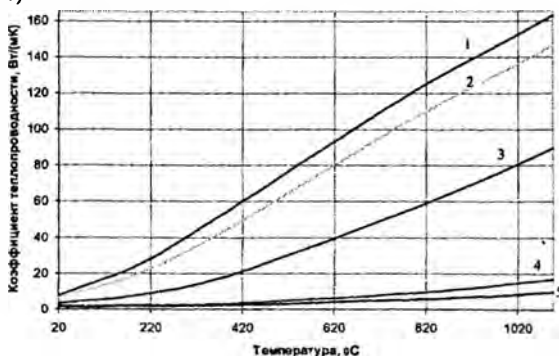


толщина кусков лома составила около 10 мм. Масса лома составила 37,7 кг, а насыпная плотность 2234 кг/м<sup>3</sup>.

Моделирование нагрева кускового материала в объеме колодца осуществляли при помощи разработанной программы, основанной на методе конечных элементов, причем теплофизические свойства, как лома, так и шамота определялись в зависимости от температуры в каждой точке расчетной области. Температура печи принималась изменяющейся во времени по показаниям контрольной термопары из эксперимента.

Сопоставление экспериментальных данных с результатами моделирования (решение уравнения теплопроводности с использованием формул (1) и (2) для коэффициента теплопроводности лома) показало, что для получения адекватных экспериментам результатов необходимо вводить предположение о количестве ориентированных к рассматриваемому направлению кусков материала, а эффективный коэффициент теплопроводности рассматривать как сумму коэффициентов полученных по формулам (1) и (2), в соответствующих пропорциях.

На рисунке 1 представлена зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от температуры для случая преимущественно горизонтального расположения кускового материала (90 %).



1 –  $d=0,4$  м; 2 –  $d=0,3$  м; 3 –  $d=0,1$  м; 4 –  $d=0,01$  м; 5 –  $d=0,005$  м.

Рисунок 1 – Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от температуры

Таким образом, при экспериментальном и компьютерном моделировании для насыпной плотности  $2234 \text{ кг/м}^3$  (пористость 0,71) и средней толщине куска лома равной 10 мм, значение эффективного коэффициента теплопроводности изменялось в зависимости от температуры в пределах  $1,7 \dots 17 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , что меньше коэффициента теплопроводности сплошного металла изменяющегося в пределах  $50 \dots 29 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

### **Выводы**

В результате проделанной работы была определена качественная картина распространения тепла в шихтовых материалах в различных условиях их нагрева. Кроме того, была определена зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от пористости, размера пор и температуры. Для применяемых на производстве видов металлолома с насыпной плотностью изменяющейся в пределах  $700 \dots 2800 \text{ кг/м}^3$  и толщинами кусков лома изменяющимися в пределах  $50 \dots 400 \text{ мм}$ , значения эффективного коэффициента теплопроводности будут изменяться в зависимости от температуры в пределах  $0,8 \dots 500 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , что существенно меняет картину распространения тепла в сравнении со сплошным материалом.

### **Литература**

1. Теплотехнология металлургических мини-заводов / В. И. Тимошпольский [и др.]. – Мн.: Наука и техника, 1992. – 158 с.
2. Математическое моделирование теплофизических процессов при расплавлении шихты в дуговой сталеплавильной печи и внепечной доводке стали на агрегате ковш-печь / Болотов В.Ю. [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002/ – № 7. – С. 177–185.
3. Павлюкевич, Н. В. Введение в теорию тепло- и массопереноса в пористых средах / Н. В. Павлюкевич. – Мн.: Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАНБ. – 2002. – 140 с.

## Методика расчета продолжительности расплавления кускового лома в расплаве жидкой стали

Тимошпольский В. И.\*, Ратников П. Э.

НАНБ\*, Белорусский национальный технический университет

**Цель работы:** С целью совершенствования теплотехнических режимов работы дуговых сталеплавильных печей разработать математическую модель плавления металлического лома, учитывающую зависимость теплофизических свойств материала от температуры, влияние условий теплообмена с течением времени, влияние оплавленного слоя на процесс плавления кускового лома и другие факторы, оказывающие значительное влияние на процесс плавления.

**Математическая модель процесса плавления металла.** В основу математической модели симметричного плавления термомассивного кускового лома с переменными теплофизическими характеристиками положена широко известная схема термического слоя [1], разбивающая процесс плавления на три этапа: 1) инерционный, когда температурные возмущения достигнут центра; 2) регулярный когда происходит нагрев тела по всему сечению; 3) период расплавления. Схема теплового пограничного слоя приведена на рисунке 1.

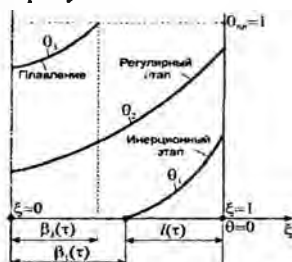


Рисунок 1. Схема теплового пограничного слоя при расплавлении металла

Предполагаем также, что расплав непрерывно удаляется с поверхности тела, растворяясь в общей массе жидкого металла. Такое предположение вводилось во многих работах ([2, 3] и др.).

Математическая модель процесса состоит из уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left[ (1 + \varepsilon_x \theta_j) \frac{\partial \theta_j}{\partial \xi} \right] = (1 + \varepsilon_x \theta_j) \frac{\partial \theta_j}{\partial \tau} \quad (1)$$

и краевых условий:

на стадии предварительного нагрева ( $0 \leq \tau \leq \tau_\phi^0$ ), расчлененного (согласно модели термического слоя [1] рисунок 1) на инерционный этап ( $j = 1, 0 \leq \tau \leq \tau_0; \beta_1(\tau) \leq \xi \leq 1$ ;  
 $\theta_1(\xi, 0) \equiv \theta_0 = 0$ )

$$\left. \begin{aligned} (1 + \varepsilon_x \theta_{1n}) \frac{\partial \theta_1}{\partial \xi} \Big|_{\xi=1} &= Bi[\theta_c - \theta_{1n}(\tau)]; \\ \theta_1(\xi, \tau) \Big|_{\xi=\beta_1(\tau)} &= 0; \quad \frac{\partial \theta_1}{\partial \xi} \Big|_{\xi=\beta_1(\tau)} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

и упорядоченный этап ( $j = 2, \tau_0 \leq \tau \leq \tau_\phi^0; 0 \leq \xi \leq 1$ ;  $\theta_{1n}^0 = \theta_{1n}(\tau_0) \leq \theta_{2n}(\tau) \leq 1$ )

$$\left. \begin{aligned} (1 + \varepsilon_x \theta_{2n}) \frac{\partial \theta_2}{\partial \xi} \Big|_{\xi=1} &= Bi[\theta_c - \theta_{2n}(\tau)]; \quad \frac{\partial \theta_2}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} = 0; \\ \theta_2(\xi, \tau_0) \Big|_{\xi=0} &= \theta_{2n}^0 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

на стадии плавления ( $j = 3, \tau_\phi^0 \leq \tau \leq \tau_\phi; 0 \leq \xi \leq \beta_3(\tau); \theta_{3n} \equiv 1$ )

$$(1 + \varepsilon_x) \frac{\partial \theta_3}{\partial \xi} \Big|_{\xi=\beta_3(\tau)} = Bi K_T + Ko \beta_3(\tau); \quad \frac{\partial \theta_3}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} = 0. \quad (4)$$

Для учета термической чувствительности стали принимаем линейную зависимость теплофизических свойств от температуры

$$\lambda(T) = \lambda_0 + \delta_\lambda (T - T_0) = \lambda_0 (1 + \varepsilon_\lambda \theta); \quad \varepsilon_\lambda = \frac{\delta_\lambda}{\lambda_0} (T_\phi - T_0); \quad (5)$$

$$c(T) = c_0 + \delta_c (T - T_0) = c_0 (1 + \varepsilon_c \theta); \quad \varepsilon_c = \frac{\delta_c}{c_0} (T_\phi - T_0).$$

Здесь введены безразмерные величины

$$\left. \begin{aligned} \theta(\xi, \tau) &= \frac{T(\xi, \tau) - T_0}{T_\phi - T_0}; \quad \xi = \frac{x}{h}; \quad \beta_j(\tau) = \frac{B_j(\tau)}{h}; \quad \tau = \frac{a_0 t}{h^2}; \\ Bi &= \frac{\alpha_x h}{\lambda_0}; \quad Ko = \frac{q_\phi}{c_p^0 (T_\phi - T_0)}; \quad K_T = \frac{T_c - T_\phi}{T_\phi - T_0} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $T_0$ ,  $T_\phi = T_{\text{ликв}}$ ,  $T_c$  – температуры: начальная, плавления и перегрева расплава, К;  $q_\phi$  – скрытая теплота плавления, кДж/кг;  $\alpha_c$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $a_0 = \lambda_0/(c_p \gamma)$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/ч;  $\gamma$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  – удельная теплоемкость, кДж/(кг·К);  $x$  – координата, м;  $H = 2h$  – толщина пластины, м;  $t$  – время, ч;  $B_j(\tau)$  – непрогретая ( $j = 1$ ) или неоплавившаяся ( $j = 3$ ) зона, м.

Подобная задача, но с граничными условиями не 3-го, а 2-го рода, была поставлена и решена [4] методом эквивалентных источников (МЭИ) Постольника. Позже это решение подробно изложено в работах [5...7].

**Продолжительность процесса нагрев-плавление.** Как известно (например, [8]), одним из основных критериев оценки работы плавильных печей является продолжительность процесса плавления. Опуская полное решение поставленной задачи (1)...(6), приведем лишь ту его часть, которой определяется время прогрева ( $\tau_0$ ), нагрева ( $\tau_\phi^0$ ) и плавления ( $\tau_\phi$ ) кусковых материалов

$$\tau_0 = [1 - 0,15(\varepsilon_\lambda - \varepsilon_c) \text{Bi}K_T] / 6; \quad (7)$$

$$\Delta\tau_\phi^0 = \tau_\phi^0 - \tau_0 = \frac{1 - \theta_n^0}{\text{Bi}K_T} \sum_{i=1}^3 \delta_{\phi i}, \quad (8)$$

где

$$\delta_{\phi 1} = 1 + \varepsilon_c \frac{1 + \theta_n^0}{2}; \quad (9)$$

$$\delta_{\phi 2} = \frac{\varepsilon_\lambda - \varepsilon_c}{3(1 + \varepsilon_\lambda)} \cdot \frac{\text{Bi}K_T}{(1 + \varepsilon_\lambda \theta_n^0)}; \quad (10)$$

$$\delta_{\phi 3} = \frac{\varepsilon_\lambda \varepsilon_c}{5(\varepsilon_\lambda - \varepsilon_c)} [2 + \varepsilon_\lambda (1 + \theta_n^0)] \delta_{\phi 2}^2; \quad (11)$$

$$\theta_n^0 = \frac{1}{\varepsilon_\lambda} (\sqrt{1 + \varepsilon_\lambda \text{Bi}K_T} - 1); \quad (12)$$

$$\Delta\tau_\phi = \frac{1}{3} \cdot \frac{1 + \varepsilon_c}{1 + \varepsilon_\lambda} \cdot \frac{\text{Ko}}{\text{Bi}K_T}. \quad (13)$$

Заметим, что при выводе формул (7)...(13) предполагалось, что  $\tau_0 \leq \tau_\phi^0$ , т.е. что инерционный этап закончится до

начала плавления. Учитывая (12), приходим при  $\theta_n^0 \leq 1$  к неравенству

$$\text{Bi}K_T \leq 2 + \varepsilon_\lambda. \quad (14)$$

Это условие практически всегда выполняется. Например, для стального среднеуглеродистого лома предельная толщина пластины, при которой будет соблюдаться условие (14), равна  $H = 2h = 1,56$  м, что явно превышает размеры кусков шихты.

**Анализ влияния переменности теплофизических свойств.** С использованием полученного решения (7)...(13) выполнен анализ влияния теплофизических характеристик на продолжительность процесса плавления лома.

Формула (7) показывает, что время  $\tau_0$  прогрева с ростом теплоемкости ( $\varepsilon_c > 0$ ) увеличивается, т.е. скорость распространения тепла уменьшается. Если же возрастает теплопроводность ( $\varepsilon_\lambda > 0$ ), скорость продвижения теплового возмущения вглубь тела возрастает, и время прогрева уменьшается. Таким образом, в этом случае совместное влияние обоих параметров нелинейности ( $\varepsilon_c$  и  $\varepsilon_\lambda$ ) может оказаться мало существенным (например, при  $\varepsilon_c \approx \varepsilon_\lambda$  оно вообще будет пренебрежимо мало), что позволяет пренебречь переменностью теплофизических свойств.

Третье слагаемое  $\delta_{\phi_3}$  (11) в общем виде проанализировать довольно сложно. Можно утверждать лишь то, что во всех случаях переменной теплофизики (5) (за исключением маловероятного варианта  $\varepsilon_c > \varepsilon_\lambda > 0$ ) учет члена  $\delta_{\phi_3}$  (11) приведет к увеличению расчетного времени  $\tau_\phi^0$ .

Формула (13) определяет продолжительность непосредственно плавления тела (от начала  $\tau_\phi^0$  до конца  $\tau_\phi$ ). Это уже касается времени продвижения изотермы  $T = T_\phi$  ( $\theta_\phi = 1$ ) от начала ( $\beta_3 = 1$ ) до конца ( $\beta_3 = 0$ ). Простота выражения (13) четко указывает, что увеличение теплоемкости ( $\varepsilon_c > 0$ ) тормозит процесс плавления, а изменение теплопроводности будет этому или способствовать ( $\varepsilon_\lambda < 0$ ), или препятствовать ( $\varepsilon_\lambda > 0$ ).

Таким образом, приведенные формулы (7)...(13) четко отражают общую закономерность влияния переменности теплофизических характеристик:

– увеличение теплоемкости замедляет процессы прогрев-нагрев-плавление;

– увеличение теплопроводности ( $\epsilon_\lambda > 0$ ) ускоряет процессы прогрева (продвижение теплового потока) и плавления (продвижение изотермы  $T = T_\phi$ ) и замедляет процесс нагрева до  $T_n = T_\phi$ ;

– уменьшение теплопроводности ( $\epsilon_\lambda < 0$ ) тормозит протекание процессов прогрева и плавления и сокращает стадию нагрева поверхности до точки плавления.

С помощью представленной методики был осуществлен расчет времени плавления брикетов стали ШХ15 различного типоразмера. Зависимость времени плавления от условий теплообмена приведена на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2 увеличение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  более 5000 Вт/(м<sup>2</sup>К) - нецелесообразно, так как это не приводит к существенному сокращению продолжительности плавления.

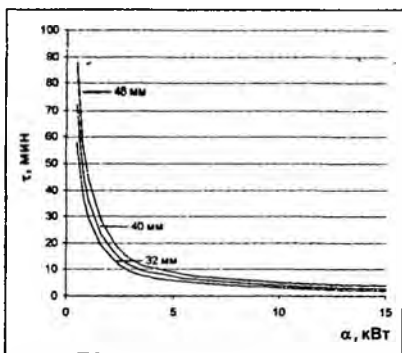


Рисунок 2. Зависимость времени плавления от условий теплообмена

Расчет удельной продолжительности каждого этапа процесса плавления показал, что при малой интенсивности теплообмена в общем времени  $t_\phi$  преобладает доля предварительного нагрева, а при больших коэффициентах теплоотдачи  $\alpha_k$  – преобладает доля непосредственного плавления.

**Выводы:** Предложена нелинейная математическая модель расчета времени плавления и температурных полей в процессе расплавления металла с учетом нелинейности теплофизических

свойств материала и переменности условий теплообмена, размеров и плотности лома и т.д. Разработан алгоритм решения представленной математической модели с помощью «метода эквивалентных источников».

Разработанная методика может быть использована для оценки времени плавления кускового лома, горячепрессованных брикетов в электродуговых печах, для разработки теплотехнологических режимов работы действующих печных агрегатов в зависимости от используемого материала, его размеров и плотности, для определения скорости подачи в печь металлургических окатышей и т.д.

### Литература

1. Лыков, А. В. Методы решения нелинейных уравнений нестационарной теплопроводности / А. В. Лыков // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1971. – № 5. – С. 109–150.
2. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. школа, 1967. – 599 с.
3. Невский, А. С. Дифференциальные уравнения процесса плавления шихты со стеканием и намерзанием расплава / А. С. Невский // Сб. научн. тр. ВНИИМТ. – М.: Metallurgizdat, 1963. – № 3. – С. 150–157.
4. Постольник, Ю. С. Расчет динамики плавления тел различной формы / Ю. С. Постольник // Сб. научн. тр. МИСиС: Тепло- и массообмен в ваннах сталеплавильных агрегатов. – М.: Metallургия, 1979. – № 120. – С. 59–62.
5. Постольник, Ю. С. Металургійна термомеханіка / Ю. С. Постольник, А. П. Огурцов. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2002. – 633 с.
6. Тимошпольский, В. И. Теоретические основы теплофизики и термомеханики в металлургии / В. И. Тимошпольский, Ю. С. Постольник, Д. Н. Андрианов. – Мн.: Бел. навука, 2005. – 560 с.
7. Тимошпольский, В. И. Усовершенствование методик расчета процессов плавления материалов на основе метода мгновенного регулярного режима / В. И. Тимошпольский, В. М. Ольшанский, Н. П. Свинолобов // Известия вузов и энергетических объединений СНГ. – № 3 – С.49–56.
8. Глинков, М. А. Общая теория печей / М. А. Глинков, Г. М. Глинков. – М.: Metallургия, 1978. – 266 с.



# Литейное производство черных и цветных металлов

УДК 669.714.2

**Анализ плавильного оборудования и технологий для переработки алюминиевой стружки и шлаков**

Немененок Б. М., Трибушевский Л. В.

Белорусский национальный технический университет

В Республике Беларусь получило широкое развитие производство отливок из алюминиевых сплавов в постоянные формы. Отсутствие собственной сырьевой базы для получения алюминия и его сплавов выдвигает на первый план проблему наиболее рационального использования промышленных отходов алюминиевых сплавов. Алюминиевая стружка, поступающая на переплав, занимает ~ 40% всех промышленных отходов и составляет ~ 2500 тонн в год. К настоящему времени собственное производство по переработке стружки имеется только в цехе алюминиевого литья Минского моторного завода, а остальные предприятия поставляют стружку на склад Белцветмета, откуда она и попадает на дальнейшую переработку.

Для плавки алюминиевой стружки применяются пламенные отражательные, вращающиеся короткобарабанные и электрические индукционные печи. При выборе печи большое значение имеет ёмкость печи, которая должна соответствовать объёмам производства, гарантирующего бесперебойную работу агрегата, а так же способы обогрева. Особое внимание уделяется стоимости источников энергии в районе строительства цеха (завода).

Наибольшее распространение во вторичной металлургии алюминия имеют отражательные печи, отапливаемые жидким или газообразным топливом, а так же их смесью. Они характеризуются достаточно высокой производительностью, простотой конструкции печи и её технологической универсальностью и сравнительно небольшими эксплуатационными затратами. Наиболее совершенными из них

являются двухкамерные печи противоточного типа. Стружку загружают на предварительно наплавленную из более крупной шихты жидкую ванну металла и вмешивают её в металл мульдозавалочной машиной. Единовременная загрузка стружки в количестве до 30 % от массы жидкой ванны. Недостаток – сравнительно низкий тепловой КПД (~25%), относительно высокие безвозвратные потери металла, низкая технологичность загрузки, загрязненность отходящих газов пылевидной фракцией (хлориды, оксиды). В последнее время для плавки сыпучих материалов (стружки) начали применять отражательные печи с выносной открытой камерой. В таких печах отапливается только закрытая камера. Разность температур в камерах обеспечивает самопроизвольную циркуляцию расплава (циркуляция может быть принудительной). Загружаемое в открытую камеру сырьё плавится за счёт теплоты, аккумулируемой расплавом в плавильной камере, что исключает его контакт с топочными газами и резко снижает угар металла.

Короткобарабанные вращающиеся печи. Используют в основном для плавки стружки и других мелких материалов. Ёмкость – от 0,5 до 20 тонн, скорость вращения 1...8 об/мин, отапливают газом или мазутом. Загрузку производят через отверстие в одном из торцов печи. Преимущества – невысокий угар металла, (металлургический выход ~ 75 %), возможность вести нагрев плавильной камеры в форсированном режиме, возможность рафинирования металла за счёт эффективного перемешивания расплава. Недостатки – быстрый износ футеровки, низкая технологичность процесса загрузки, не полное исключение контакта стружки с топочными газами.

Электрические печи. На территории СНГ заводы по переработке вторичного алюминиевого сырья применяют тигельные индукционные электрические печи промышленной частоты. За рубежом используют так же и каналные индукционные печи. Преимущества – невысокие потери металла на угар (~2-3%), возможность плавки без флюса, высокий тепловой КПД (~70%) и производительность, активное перемешивание металла. Недостатки – необходимость наличия в тигле остатка металла от предыдущей плавки, зарастание каналов вследствие осаждения оксидов алюминия на их

внутренних стенках (для канальной), расход энергии 750-800 кВт·ч/т.

По данным РПУП "Белцветмет" в 2006 году в Республике Беларусь образовалось 2600 тонн алюминиевой стружки. Существующие в Республике технологии позволяют обеспечить металлургический выход металла порядка 70 %. Так же имеются экспериментальные данные, что при введении операции прессования стружки и последующего передела брикета металлургический выход можно повысить до 80 %. Однако из-за введения дополнительной операции экономический эффект от повышения металлургического выхода не велик. Так же в Республике Беларусь отсутствует должная подготовка стружки к плавке, что приводит к получению не марочных, а низкосортных сплавов типа АВ-87, от чего экономический эффект лучше не становится. В целях изучения иностранного опыта по переработке лома и стружки цветных металлов был произведен анализ производства на Мценском заводе вторичных алюминиевых сплавов – крупнейшем в бывшем СССР, а так же на Российской промышленной компания "Втормет" – одной из крупнейших переработчиков вторичного алюминиевого сырья в России. Следует отметить, что там большое внимание уделяется подготовке стружки к плавке, а именно: предварительная сушка в барабанном сушиле (для сушки используется тепло отходящих от печи газов) и несколько этапов магнитной сепарации для удаления включения чёрных сплавов. Плавка ведётся в 20 тонной двухкамерной газовой печи, причём используется специальный метод загрузки стружки в печь, в процессе которого алюминиевая стружка специальным устройством "топится" под зеркало металла. Комплекс этих мероприятий позволяет получать качественные марочные сплавы типа АК9, АК5М2 с металлургическим выходом не менее 80 %.

Однако наиболее прогрессивная технология принадлежит английской фирме "EMP Technologies Ltd". В разработках этой фирмы при схожей с российской технологии подготовки сырья для подачи стружки под зеркало металла используются новые магнитогидродинамические технологии, позволяющие обеспечить металлургический выход не менее 90% . Эта технология была разработана с целью предоставить

возможность перерабатывать стружку без надобности использования солевых флюсов, как это делается при роторной технологии плавки. Эта система обладает двумя основными функциями. Во-первых, она циркулирует жидкий металл в печи при помощи электромагнитного насоса, и, во-вторых, она позволяет загружать стружку в специальный колодец, предотвращающий прямой контакт с пламенем. Это способствует высокой степени восстановления алюминия, благодаря подповерхностному течению жидкого металла и отсутствию, практически, колебаний температур в главной камере печи. Благодаря отсутствию движущихся механизмов ЕМР система очень надёжна. Положительные качества ЕМР системы:

1. Значительное увеличение металлургического выхода металла из мелкого лома, такого как стружка и фольга благодаря быстрому замешиванию лома в расплавленный алюминий.

2. Улучшенная химическая однородность – благодаря высокому уровню циркуляции химическая однородность сплава достигается очень быстро.

3. Однородность температуры в металлической ванне – ЕМР циркулирует расплавленный металл с высокой скоростью (до 10 тонн в минуту).

4. Увеличение производительности – сокращённый по времени цикл плавки увеличивает производительность более чем на 25% (в зависимости от установки) по сравнению со статическим вариантом.

Возможность введения легирующих добавок, например, Si, Cu, Mg, Mn, Fe и Ti через загрузочный колодец, обеспечивающий быстрое перемешивание и, следовательно, более быстрое достижение однородности сплава, чем при использовании обычных технологий.

**Тенденции развития производства поршней  
из алюминиевых сплавов**

Немененок Б. М.

Белорусский национальный технический университет

Развитие народного хозяйства стран СНГ требует повышения надежности и увеличения ресурса работы двигателей большегрузных грузовых автомобилей типа МАЗ, КраЗ, УралАЗ, БелАЗ, КамАЗ; тракторов «Кировец», «Беларус»; комбайнов «Нива», «Полесье» и др. С 1920 по 2000 годы удельная мощность двигателей возросла в 7 раз, а для двигателей с турбонаддувом в 10 раз и достигла более 80кВт/л и это наращивание мощности продолжается.

Создание новых конструкций двигателей и форсирование режимов существующих осуществляется на базе широкого применения турбонаддува и использования алюминиевых поршней с выполненными в них камерами сгорания, что существенно повышает тепловые и динамические нагрузки на большинство деталей и, в первую очередь, на поршни, которые лимитируют долговечность двигателя в целом. Одной из причин выхода из строя поршней является образование трещин термической усталости на кромках камеры сгорания, которая подвергается большим динамическим и термическим воздействиям.

Поршень представляет собой достаточно сложную в отношении конструкции, технологии и материалов деталь двигателя, фактически определяющую его технический уровень. Основные функции, выполняемые поршнем – уплотнение внутрицилиндрового пространства с помощью днища и канавок с поршневыми кольцами и передача сил давления в цилиндре на кривошипно-шатунный механизм. На поршни в различных двигателях действуют знакопеременные нагрузки при постоянном их контакте с агрессивными жидкими и газовыми средами. В некоторых случаях нагрузки достигают 100—180 МН, а температура пламени повышается до 800 °С. Например, средняя температура на днище поршня у тракторных двигателей возрастает с 200—220 °С до 300—350 °С, а воспринимаемая поршнем нагрузка увеличивается с 50—55 МПа до 70—75 МПа.

Кроме жаропрочности поршневые сплавы должны удовлетворять еще целому ряду требований, что иногда приводит к принятию компромиссных решений в отношении химического состава. Поэтому в большинстве случаев используются сплавы сложного химического состава на основе системы алюминий—кремний.

В настоящее время поршни из алюминиевых сплавов изготавливают литьем в кокиль с использованием литейных поршневых сплавов, горячей штамповкой деформируемых сплавов, жидкой штамповкой, литьем под низким давлением, изотермическим прессованием и литьем с кристаллизацией под давлением.

Литье в кокиль – наиболее простой технологический процесс, использующий поршневые сплавы с низким коэффициентом линейного расширения и позволяющий получить отливки сложной конфигурации (с поднутрениями). Однако кокильные поршневые заготовки имеют два существенных недостатка – невысокое качество заготовок (пористость в массивных частях) и низкий коэффициент использования металла.

Заготовки, полученные горячей штамповкой деформируемых сплавов, как правило, из АК4-1, отличаются высоким качеством, но по сравнению с литейными имеют на 15...20 % более высокие значения коэффициента линейного расширения, а коэффициент использования металла при горячей штамповке еще меньше, чем при литье в кокиль.

Жидкая штамповка поршней сочетает достоинства обоих этих способов - обеспечивает высокое качество заготовок аналогично горячештампованным и позволяет использовать литейные поршневые сплавы, а также жаропрочные сплавы с низкой жидкотекучестью при относительной простоте способа изготовления. Коэффициент использования металла жидкоштампованных поршней и их эксплуатационные свойства значительно выше, чем у кокильных заготовок.

Переход от литья в кокиль к кристаллизации под давлением 100...200 МПа повышает  $\sigma_b$  поршневых алюминиевых сплавов на 10...20 %, твердость на 5...15 % и относительное удлинение в 1,5...3 раза. Наложение давления на затвердевающий металл приводит также к росту кратковременной жаропрочности и

часовой горячей твердости. Улучшение жаропрочных свойств сплавов, закристаллизованных под давлением, объясняется устранением макродефектов отливки, увеличением легированности твердого раствора Si и Cu (растворимость которых при затвердевании под давлением возрастает), а также изменениями структуры сплава. При этом наблюдается также повышение усталостной прочности при комнатной температуре и в интервале температур эксплуатации поршней, что связано с устранением или существенным уменьшением микропористости, которая является очагом зарождения усталостных трещин.

Несмотря на то, что технология литья поршней в кокиль достаточно хорошо отработана, брак при их производстве остается высоким и составляет 6...8 %. Далеко не всегда удовлетворяет потребителя и стойкость поршней при их эксплуатации. Литьем в кокиль поршни для дизельных двигателей получают по двум принципиально отличающимся технологиям, характеризующимся расположением отливки в форме: «днищем вниз» и «днищем вверх». Каждая из них имеет свои достоинства и недостатки.

При изготовлении отливок по первой технологии днище поршня, испытывающее при эксплуатации высокие механические и термические нагрузки, имеет мелкозернистую структуру и повышенные механические свойства, а литниково-прибыльную систему отливки можно обрубать на прессе. Однако в связи с расположением наиболее массивных частей отливки внизу питание их затруднено, поэтому требуется тщательная доводка всей литниково-питающей системы и теплового режима кокиля. В этом случае используется извилистая система типа «гусиная шейка» или карандашная с одной или двумя боковыми прибылями. Для получения плотной структуры массивных зон отливки, оформляющие части кокиля (поддон; полуформы; стержни; формирующие отверстия под пальцы; центральный моноклиновый стержень) охлаждаются проточной водой, проходящей по специальным каналам или полостям, а части многоклинового стержня охлаждаются перед простановкой в форму в водографитовой суспензии. В связи с большой протяженностью литниковой системы требуется повышенная температура расплава при заливке.

При изготовлении поршней «днищем вверх» металл обычно подводят в полость формы через короткий наклонный литник, что способствует снижению температуры заливки, но требуется более тщательное рафинирование расплава и при этом большое внимание должно уделяться геометрии и размерам стояка и питателя. В этом случае используются верхняя центральная или кольцевая прибыль. Такая технология широко используется на территории СНГ и дальнего зарубежья при изготовлении поршней с упрочняющей вставкой в зоне верхнего поршневого кольца.

Для плавного заполнения формы заливка ее производится в наклонном на  $30\text{--}40^\circ$  состоянии, а возврат в вертикальное положение осуществляется после заполнения кокиля на  $2/3\text{--}3/4$  по объему, когда расплав начинает закрывать упрочняющее кольцо. Кокиль выполняется массивным, однако нижние части полуформ могут иметь сверления для охлаждающей воды. Металлические стержни, как и при литье «днищем вниз» охлаждаются проточной водой.

Для производства литых поршней дизельных двигателей разработаны одно- и многопозиционные кокильные машины, у которых все операции по сборке и разборке кокиля, протяжке и простановке стержней, съему отливок механизированы. При изготовлении поршней с терморегулирующими вставками разработаны устройства для автоматической простановки их в кокиль. На других кокильных машинах для производства поршней механизация заливки еще не решена, как и простановка в кокиль нирезистовых упрочняющих вставок после алитирования.

Производительность кокильных машин зависит от числа позиций и количества кокилей на каждой позиции, от технологии и массы поршня, и составляет для однопозиционных машин при изготовлении поршней диаметром  $100\text{--}140$  мм без упрочняющих вставок  $10\text{--}20$  отливок в час. Один рабочий в состоянии обслуживать одну многопозиционную машину или две-четыре однопозиционные, если поршни не имеют упрочняющих вставок. При литье поршней с нирезистовыми вставками на такое же количество оборудования требуется двое рабочих.



УДК 621.74

**Алюминиевые сплавы с повышенным содержанием железа  
и возможные области их использования**

Немененок Б. М., Калининченко В. А.

Белорусский национальный технический университет

Силумины наиболее распространены среди алюминиевых сплавов в литейном производстве. Применительно к алюминиевым сплавам, выплавляемым из лома и отходов, наиболее остро стоит проблема нейтрализации вредного влияния железа, содержание которого в чушках составляет 1,1-1,3%. В процессе плавки алюминиевых сплавов в широко применяемых чугунных тиглях содержание железа может увеличиваться до 2,5% и даже выше [1]. Накоплению железа способствует и использование алюминиевого лома, особенно содержащего стальные вкладыши и не удаленные перед плавкой элементы крепления. Легирование алюминия и его сплавов железом, а так же переработка железосодержащих отходов (лома), в значительной мере ограничивается неспособностью алюминия образовывать в широком интервале твёрдые растворы, что приводит к появлению в структуре интерметаллических соединений в виде грубых включений.

По статистическим данным VDS (Германия) в 1998 году немецкой промышленностью потреблялось 612 381 тонн первичного и 453 328 тонн вторичного алюминия, по сравнению с 730 700 тоннами первичного и 405 100 тоннами вторичного алюминия на 1980 год [2]. При таком количестве вторичных металлов и сплавов необходимо разрабатывать и применять новые технологии и возможности использования вторичных сплавов обогащённых примесями, в том числе и железом. Однако кроме отрицательного воздействия на алюминиевые сплавы, нельзя не отметить и положительную роль железа особенно для специального применения и (или) специальных процессов обработки. В качестве полезного влияние железа в алюминиевых сплавах можно указать производство жаропрочных, износостойкие и др. сплавов со специальными свойствами, применения для раскисления сталей, изготовления литых модификаторов (при высокой скорости затвердевания) для изменения размера зерна, уменьшения внутренней

диффузии ряда легирующих элементов таких как Si, Mg, Cu и т.д., компактирования частиц для нужд и процессов порошковой металлургии.

Исходя из этого роль железа в алюминиевых сплавах можно представить как [3]:

1. как вредное влияние по ГОСТ 1583 –89 «Сплавы алюминиевые литейные» из 38 перечисленных сплавов содержание железа колеблется от 0,05% (для АМгблч) до 1,4% (для Ак8М3) Как меры борьбы с нежелательными примесями используются: а). Разбавление (при наличии чистого алюминия), б) Фильтрация, в) центрифугирование, г) модифицирование

2. Полезное влияние железа в алюминиевых сплавах: а) жаропрочные, износостойкие и др. сплавы, б) раскисление сталей и сплавов, в) изготовление литых модификаторов при высокой скорости затвердевания (для изменения размера зерна, уменьшения внутренней диффузии ряда легирующих элементов таких как Si, Mg, Cu и т.д.), г) производство сплавов особого назначения, д) компактирование частиц для нужд и процессов порошковой металлургии

В силуминах железо образует соединения различного состава ( $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{Al}_3\text{SiFe}$ ,  $\text{Al}_4\text{Si}_2\text{Fe}$  и др.), которые при затвердевании имеют грубокристаллическое строение и поэтому значительно снижают механические свойства отливок, особенно пластичности. При содержании железа свыше 0,8 % формируются первичные кристаллы  $\text{Al}_3\text{SiFe}$  и  $\text{FeAl}_3$  [4].

Нейтрализовать в определенной мере негативное влияние железа на механические свойства силуминов возможно за счет введения элементов-компенсаторов, подавляющих образование включений иглообразной фазы ( $\text{Al}_9\text{SiFe}$ ). К таким элементам относится марганец, образующий в силуминах с железом фазу  $\beta\text{Al}_{15}\text{Si}_2(\text{FeMn})_3$ , которая ослабляет эффект охрупчивания. Однако при суммарном превышении марганца и железа 0,8% могут появиться первичные кристаллы фазы  $\text{Al}_{15}\text{Si}_2(\text{FeMn})_3$ , которые заметно ухудшают обрабатываемость отливок резанием. В качестве компенсаторов могут применяться хром, ванадий, никель и другие подобные элементы [1].

Установлено, что измельчение железосодержащих фаз наблюдается после легирования расплава марганцем, хромом,

молибденом и дополнительной обработкой расплава элементами VI группы – серой, селеном и теллуром [5]. Такой эффект был обнаружен на силумине (9,7%Si, 1,8%Fe), выплавленном из алюминия марки А 999, полупроводникового кремния и карбонильного железа. Характерные микроструктуры приведены на рисунке 2.

Модифицирование железосодержащей фазы серой или теллуром при соотношении %Fe : %Mn = 2 : 1 способствует увеличению количества фазы с гексагональной решеткой и сопровождается некоторым изменением ее параметра, а включения приближаются к правильным многогранникам. При этом добавки серы и теллура концентрируются в компактных включениях  $\beta_n$ -фазы.

Эффективным способом изменения морфологии кристаллизующихся фаз является затверждение их в резко неравновесных условиях [6]. При этом создаются условия для измельчения зерна, значительного расширения растворимости в твердом состоянии, подавления роста грубых включений первичных интерметаллидов. Поэтому представляет интерес использовать процесс затверждения при неравновесных условиях для устранения формирования грубых первичных железосодержащих фаз. Причем, если обеспечить мелкодисперсное формирование железосодержащих фаз, то они смогут выступать в качестве упрочняющей фазы.

Благодаря высокой скорости охлаждения из жидкого состояния перед кристаллизацией капля расплава путем закалки в воду, либо на быстровращающемся охлаждаемом валке железо остаётся в пересыщенном твёрдом растворе и не образует интерметаллических соединений. Полученные гранулы или металлические ленты можно использовать для получения изделий методами экструзии, лигатур для получения специальных сплавов (жаропрочные, износостойкие и др.) или в качестве дробы для очистки алюминиевых отливок от остатков формовочной и стержневой смеси. Замена чугунной или стальной дробы на алюминиевые гранулы способствует повышению коррозионной стойкости алюминиевых изделий, особенно в условиях морского климата.

Несомненный интерес представляют и вопросы использования алюминиевых вторичных сплавов и отходов для

получения металлических пен. Вспененные материалы, полученные из отходов цветных сплавов или металлов, могут использоваться в изделиях неответственного назначения или не несущих значительных конструкционных нагрузок (например, бампера, наполнители и т.п.)

Главной особенностью вспененных материалов является их высокая пористость при хорошей демпфирующей способности, которая превосходит такие природные материалы как древесина и кость. Металлические пены, несмотря на низкую плотность ( $0,1-0,8 \text{ г/см}^3$ ), характеризуются достаточно высокими прочностными свойствами и жесткостью [6]. Однако, до настоящего времени их широкое использование ограничено как вследствие консервативности применяемых технологий, так и отсутствием изделий, специально разработанных с применением вспененных металлических материалов.

#### Литература

1. Немененок, Б. М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов / Б. М. Немененок. – Мн.: Технопринт, 1999. – 272 с.
2. Dr.-Ing. K. Krone. Aluminium – recycling (Vom Vorstoff bis zum fertigen Legierung). VDS, e.V. Dusseldorf, 2000. – 707 с.
3. Калиниченко, В. А. Возможные варианты применения в литейном производстве алюминиевых сплавов с повышенным содержанием железа / В. А. Калиниченко, Б. М. Неменёнок, Г. В. Довнар // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., 22–23 апреля 2004. – Т. 1. – С. 168
4. Калиниченко, А. С. Снижение негативного влияния повышенного содержания железа в алюминиевых сплавах / А. С. Калиниченко, Б. М. Неменёнок, В. А. Калиниченко // Литейное производство. – 2004. – № 3. – С. 21–22
5. Bergmann H. W., Nemenjonok B. M., Kalinichenko A. S. et al. Complex grain refining of Al-Si alloys with a high Fe content // Aluminium. – 1996. – V. 72, № 5. – P. 354–356.
6. Калиниченко, В. А., Способы получения вспененного алюминия, области его применения и ряд особенностей механической обработки / В. А. Калиниченко А. С. Калиниченко // Литьё и металлургия. – 2005. – Ч. 1. – № 2. – С. 164–169.

# **Порошковая металлургия, сварка и обработка материалов давлением**

УДК 621.762

**Гранулирование минеральных удобрений прокаткой**

Ложечников Е. Б., Гавриленя А. К., Щерба В. Я., Китун А. А.

Белорусский национальный технический университет,  
ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с  
опытным производством»

Минеральные удобрения используются в гранулированном виде. Полученный после флотационной очистки и выпаривания-кристаллизации порошок с размером частиц от 1 до 0,1 мм и менее не пригоден для длительного хранения, транспортировки и использования. Из-за высокой поверхностной активности оно быстро слеживается и теряет сыпучесть, что затрудняет внесение его в почву. Наличие в порошковом удобрении высокодисперсной фракции не допустимо и по условиям пыления с выносом за пределы обрабатываемых площадей, быстрого растворения и уноса в грунтовые воды и водоемы.

Наиболее распространена технология гранулирования минеральных удобрений, основанная на их уплотнении в полосы прокаткой с последующим дроблением полос в гранулы и отделением их от крупной и мелкой фракций. Крупную фракцию домальвают, а мелкую – возвращают в смеси с исходным порошком на повторное уплотнение прокаткой [1,2].

Представляются актуальными постоянно проводимые исследования, направленные на повышение качества гранулированных удобрений, определяемого прочностью, а следовательно и стабильности гранул при увеличении выхода их требуемого (3-4 мм) размера.

Для оценки влияния режима обработки давлением на плотность и прочность брикетов и прокатанных полос проведены эксперименты по прессованию исходного порошка хлорида калия и его пылевых отходов в брикеты, которые затем подвергали разрушению нагружением в направлении оси брикетов.

Исследуемые порошки прокатывали в валках диаметром 600 мм (на стане СПП-2) в полосы, плотность которых соответствовала прессованным брикетам с наилучшими показателями прочности [3].

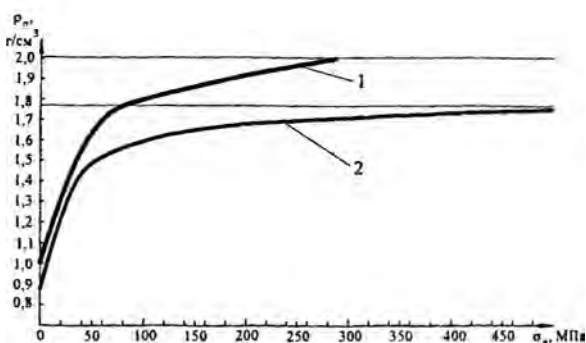
Хлорид калия (KCl) относится к третьей малопластичной группе минеральных удобрений. Его пикнометрическая плотность  $2,0...2,05 \text{ т/м}^3$  ( $2,0...2,05 \text{ г/см}^3$ ), температура плавления 1041 К. Давление его уплотнения при прокатке в производстве гранул составляет 400-450 МПа. Прокатку производят в валках диаметром 900-1000 мм с длиной бочки до 1250 мм. Скорость прокатки  $0,8...1,2 \text{ м/с}$ . Для улучшения технологических свойств в порошок перед прокаткой вводят пластифицирующие присадки (карбонид, сульфаты и др.).

Для установления технологических возможностей гранулирования хлорида калия проведены опыты их прессования в прессформах диаметром 10 мм при температуре 380-390 К. Скорость прессующего пуансона по мере уплотнения уменьшалась с 30 до  $3...5 \text{ м/с}$ . Прессованию подвергали порошок без пластифицирующих присадок. Диаграмма прессования (Рис. 1) показывает, что при давлении 283 МПа достигнута пикнометрическая плотность хлорида калия ( $2,05 \text{ г/см}^3$ ). У лучших для гранулирования образцах проката (по данным РУП «Производственное объединение «Беларуськалий») плотность составляет  $1,77...1,82 \text{ г/см}^3$ , что соответствует давлению прессования 110...120 МПа. Давление разрушение при осадке прессованных брикетов после двух суток выдержки составило  $0,4...0,5$  давления прессования.

Увлажнение порошка до 1,5 % не оказывает существенного влияния на его прессуемость и зависимость прочности от давления прессования и их плотности. Повышение давления прессования до 191 МПа хотя и привело к повышению плотности брикетов до  $1,97 \text{ г/см}^3$ , но привело к снижению их прочности.

Прессуемость увлажненного до 3 % порошка незначительно отличается от прессуемости сухого и с 1,5 % влажностью. Следует отметить, что начиная с давления 101,9 МПа и выше у выпрессованных из прессформы брикетов с 3,0 % влажностью на торцах выходит влага, в дальнейшем впитываемая брикетом. Следует отметить, что повышенное влагосодержание обеспечивает более высокую прочность брикетов, спрессованных под

давлением до 76,4 МПа, и уменьшение прочности более плотных брикетов.



1– KCl; 2–  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

Рисунок 1 – Диаграмма прессования порошков KCl и  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

Для проведения экспериментов по прокатке порошка KCl в исходном состоянии и пыли, образующейся при дроблении полос (менее 0,5мм), использовали прокатный стан СПП-2 [3] с диаметром бочки 600 мм. Нагретый до 430 К порошок загружали в установленный на вращающиеся с частотой 5 об/мин валки бункер (скорость прокатки 0,157 м/с). В результате прокатки получены полосы толщиной 5,6...6,2 мм, плотностью 1,83...1,86 г/см<sup>3</sup> не зависимо от того, прокатывали порошок или отсев пыли (менее 0,5мм). Большая плотность достигалась при уменьшении раствора валков (толщины проката). Плотность полученного проката соответствует давлению прессования брикетов 110...120 МПа, что согласуется с приведенными в [1] данными. Более высокая плотность прокатанных полос по сравнению с получаемыми РУП «Производственное объединение «Беларуськалий» достигнута за счет меньшей скорости прокатки, а следовательно уменьшения отрицательного влияния выдавливаемого из очага уплотнения и деформации воздуха, встречный поток которого задерживает поступление в валки порошка.

Сульфат аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  относится к первой группе порошков минеральных удобрений (высокопластичные). Его пикнометрическая плотность 1,77 кг/см<sup>3</sup>, температура разложения

623 К. В исследуемом порошке массовая доля фракции менее 0,25 мм составляла 19 %. Значительную часть дисперсной порошковой массы представляли полупрозрачные монолитные зерна с размерами до 2 мм.

Цель проведенных экспериментов – установить зависимость плотности и прочности брикетов (цилиндрических образцов) от давления прессования порошков сульфата аммония разной влажности и температуры. Исходные, в состоянии поставки порошки влажностью 0,16-0,3 % выдерживали в течение четырех часов в сушильном шкафу при температуре 340 К и увлажняли до 2 % содержания воды.

Результаты экспериментов по прессованию и разрушению образцов разной влажности показывают, что влажность порошков не оказывает существенного влияния на плотность и прочность спрессованных образцов. Следует отметить, что прочность спрессованных образцов до близкой к пикнометрической плотности сравнительно низкая, что не позволяет ожидать требуемую прочность и стабильность по слеживанию гранулята. Об этом свидетельствуют результаты испытания гранул, полученных дроблением прокатанных полос толщиной 6...7 мм, плотностью 1,68...1,74 г/см<sup>3</sup>. Статическая прочность при раздавливании гранул не превысила 2,6 кг при минимально допустимой 3 кг. Так же следует отметить, что в спрессованных образцах сульфата аммония сохранились крупные зерна исходного порошка, в то время как в прокатанной полосе эти зерна были разрушены, что объясняется разными условиями процесса их обработки [4].

Для установления влияния теплового режима прессования и прокатки на плотность и прочность образцов проведены эксперименты прессования порошков, охлажденных до температуры 260К (-10 °С) и нагретых до 340-350 К. Образцы диаметром 10 мм прессовали давлением 318 МПа, диаметром 30 мм – 200 МПа. Прокатку проводили при неизменных растворе валков и скорости, аналогичной предыдущим экспериментам. Спрессованные образцы диаметром 10 мм имели плотность 1,71-1,75 г/см<sup>3</sup>, диаметром 30 мм охлажденные – 1,69 г/см<sup>3</sup>, нагретые – 1,72 г/см<sup>3</sup>. Гранулы размером 3-4 мм, полученные в результате дробления прокатанных из нагретых порошков полос, разруша-



лись при раздавливании под нагрузкой 3,0...3,1 кг. Прочность гранул из охлажденных порошков составляла 2,8...3,0 кг.

На основании изложенного приняты технологические параметры гранулирования порошков сульфата аммония: влажность до 0,3...0,5 %, нагрев до 340...360 °С, прокатка полос плотностью 1,60...1,64 г/см<sup>3</sup>, дробление и отсев гранул.

### **Литература**

1. Мурадов, Г. С. Получение гранулированных удобрений прессованием / Г. С. Мурадов, П. И. Шомин. – М.: Химия, 1985. – 209 с.
2. Классен, П. В. Гранулирование / П. В. Классен, И. Г. Гришаев, И. П. Шомин. – М.: Химия, 1991. – 240 с.
3. Ложечников, Е. Б. Прокатка в порошковой металлургии / Е. Б. Ложечников. – М.: Металлургия, 1987. – 185 с.
4. Ложечников, Е. Б. Механика измельчения прокатываемых в толстом слое материалов / Е. Б. Ложечников, А. К. Гавриленя // Вестник БНТУ. – 2006. – № 6. – С. 16–21.

УДК 621.771

### **Прокатка в четырехвалковом калибре по схеме «круг-круг»**

Ложечников Е. Б., Кудин М. В.

Белорусский национальный технический университет

Изготовленные непрерывным литьем прутки латуни обладают характерной для такого способа производства макроструктурой с явно выраженными радиально ориентированными столбчатыми зернами [1]. При этом вследствие неравномерной по сечению кристаллизации, что может быть объяснено горизонтальным направлением движения образующегося в охлаждаемой полости кристаллизатора прутка, центр схождения столбчатых кристаллов смещен относительно геометрической оси прутков. Поверхность прутков загрязнена продуктами износа графитового кристаллизатора, а также встречаются открытые поверхностные макродефекты.

Для повышения прочности и твердости прутков, в значительной части используемых для изготовления газовой аппаратуры, а так же завальцовывания поверхностных дефектов и вы-

равнивания оси проведены эксперименты прокатки прутков в калибре с четырехсторонним обжатием [2, 3].

Четырехстороннее обжатие достигалось четырьмя валками с номинальным диаметром  $2R_n = 400$  мм, образующими соответствующий прокатываемому профилю калибр круглого сечения

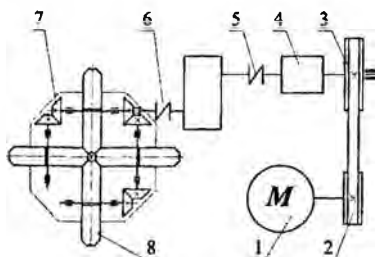


Рис. 1. Схема прокатного стана с четырехсторонним обжатием:

1 – электродвигатель; 2 – клиноременная передача; 3 – коробка перемены передач ЗИЛ - 157; 4 – муфта; 5 – редуктор двухступенчатый; 6 – муфта; 7 – коническая зубчатая передача; 8 – валок-диск

(рис. 1).

Кинематическая схема стана приведена на рис. 1. Валки представляют собой диски посаженные через ступицы на шлицевые валы. Прокатку проводили по схеме «круг – круг» за один проход. При этом использовали два варианта калибровки валков.

В первом варианте калибр представлял круг, образованный по числу валков четырьмя дугами, соответствующими радиусу прокатанного прутка (на рис. 2,а – левая часть). Для образования между валками круглой полости – калибра между валками устанавливали эталонный настроечный пруток и их сводили до полного контакта с этим прутком. При этом за счет возможности осевого перемещения на шлицевых валах валки самоустанавливались и смыкались по фаскам

Поскольку прокатку проводили по схеме «круг – круг» контакт валков с заготовкой диаметром  $d_3$  начинался по острым кромкам  $k_1$ , образованным пересечением рабочей поверхности с фасками. При обжатии заготовки с диаметра  $d_3 = 24$  мм до  $d_n = 22$  мм наибольший катающий радиус составил  $R_k = 192$  мм, а соответствующий ему угол захвата  $\alpha_k = 6,82^\circ$ . До полного контакта рабочей части калибра с заготовкой (номинальный катающий радиус в точке  $m$   $R_m = 189$  мм, и соответствующий ему угол захвата  $\alpha_m = 5,9^\circ$ ) продольная деформация (вытяжка) практически не происходила.

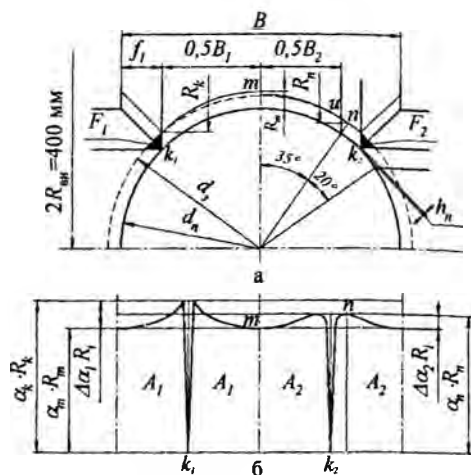


Рисунок 2 – Схема калибров «круг-круг» (а) и поверхности контакта валков с заготовкой (б) в четырехвалковом калибре

Металл при угле поворота валков  $\Delta\alpha_1 = \alpha_k - \alpha_m = 0,92^\circ$  выдавливался в радиальном направлении и отсекался острыми кромками в сужающиеся зазоры между фасками валков. Образующиеся в дальнейшем заусенцы препятствовали смыканию валков и получению прутков требуемого диаметра. При этом поверхность контакта валков с заготовкой имела вид, приведенный в левой части рис. 2,б. Для получения гладких прутков требовалась операция скальпирования или прокатки за два прохода: первый на несколько больший требуемого диаметра с образованием 4-х продольных выступов, и второй на требуемый диаметр с завальцовкой выступов.

Для исключения образования заусенцев и получения прутков за один проход изготовлены и используются валки с калибром, приведенном на рис. 2,а (правая часть). Рабочая часть калибра этих валков состоит из двух элементов: дуги, соответствующей углу  $70^\circ$  и ширине  $B_2$ , и сопрягаемых с ней двух прямых  $uk_2$ , образующих с фасками острые кромки  $k_2$ . При такой калибровке первоначальный контакт с заготовкой происходит по прямолинейным участкам профиля калибра в точке  $n$ , соответствующий катающему радиусу  $R_n = 191,4$  мм и углу захвата  $\alpha_n = 6,5^\circ$ . При

этом угол поворота валков до их полного контакта с заготовкой  $\Delta\alpha_2 = \alpha_n - \alpha_m = 0,6^\circ$ . Выдавливаемый в радиальном направлении металл за угол поворота валков на  $\Delta\alpha_2$  в дальнейшем образует выступ высотой 0,16...0,17 мм. Поверхность контакта валков с заготовкой при этом имела вид, приведенный на рис. 2,б (правая часть). Опыты прокатки проводили в холодную и с нагревом заготовок до температуры 1030 К. В результате прокатки получены гладкие, без макродефектов поверхности и без кризисы прутки со слабо выраженными продольными выступами.

В исходном состоянии, после холодной и горячей прокатки твердость по Бринеллю составляла соответственно 95; 150 и 110, временное сопротивление на разрыв (образцы стандартные,  $d = 6$  мм) 370; 500 и 400 МПа, относительное удлинение 11,6; 9,8 и 17,7 %, сужение слабо выраженной шейки 16; 19 и 28 %.

#### Литература

1. Колачев, Б. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б. А. Колачев, В. А. Ливанов, В. И. Елагин. – М.: Металлургия, 1981. – 416 с.
2. Прокатка малопластичных металлов с многосторонним обжатием / Л. А. Барков [и др.]. – Челябинск: Металлургия, 1988. – 304 с.
3. Ложечников, Е. Б. Прокатка непрерывно литых прутков латуни в четырехвалковом калибре / Ложечников Е. Б., Кудин М. В. // Прогрессивные технологии обработки материалов давлением: материалы международной научно – технической конференции. – Мн.: Технопринт, 2004. – С. 70–81.

УДК 621.77.001

#### Силовые и кинематические параметры формообразования фланцев в трубных заготовках

Исаевич Л. А., Сидоренко М. И.,  
Гуринович В. А., Шиманский А. В.

Белорусский национальный технический университет

Пластическое формообразование относительно широких фланцев в трубных заготовках проводится в большинстве случаев посредством их отбортовки, являющейся завершающей стадией процесса раздачи концов этих заготовок жестким инст-

рументом [1-4]. В результате такой операции конец трубной заготовки подвергается раздаче под прямым или близким к нему углом [4, 5]. При реализации процесса раздачи по данной схеме

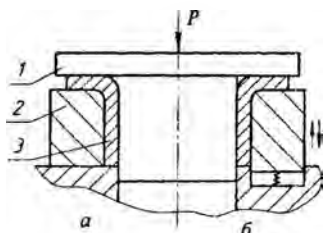


Рисунок 1 – Схема раздачи (а) и

осадки (б) трубной заготовки:

1- пуансон; 2 - матрица;

3 - заготовка

деформирующий пуансон должен содержать плавный переход от цилиндрической части к плоскости в виде торообразной поверхности, которая неизбежно копируется в раздаваемом участке заготовки (рис. 1, а). Однако в ряде случаев это не допускается чертежом готовой детали, например, при изготовлении корпуса водила бортовой передачи заднего

моста автомобилей МАЗ.

Учитывая это, предложено после отбортовки по описанной выше схеме производить пластическое формоизменение торообразного участка заготовки за счет осадки ее цилиндрической части (рис. 1, б). При этом полученную трубную заготовку с плоским фланцем, имеющим торообразный переход к цилиндрической полости, устанавливают в подпружиненную матрицу, а внутрь заготовки вводят ступенчатый пуансон без торообразного перехода от торца ступени к цилиндру.

При определении усилия, необходимого для формоизменения торообразного участка заготовки, процесс деформирования будем рассматривать как открытую прошивку фланца наружным диаметром  $D$  трубчатым прошивком, имеющим наружный диаметр  $d_1$ , а внутренний –  $d_0$ .

Тогда согласно [6]

$$\sigma_r = \sigma_0 \left( 1,1 \ln \frac{D}{d_1} + \frac{0,5d_1 - r}{h} \right), \quad (1)$$

$$\sigma_z = \sigma_0 \left( 1 + 1,1 \ln \frac{D}{d_1} + \frac{0,5d_1 - r}{h} \right). \quad (2)$$

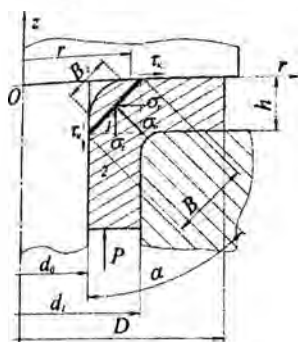


Рисунок 2 – Схема очага деформации при формоизменении торообразного участка

Радиальные (1) и осевые (2) напряжения могут вызвать пластическое формоизменение торообразного участка фланцевой части трубы. Такое формоизменение в свою очередь обусловлено действием нормального напряжения в площадке, равнонаклоненной к осям координат  $roz$  (рис. 2), которое согласно [6]

$$\sigma_n = \sigma_r a_r + \sigma_z a_z.$$

Но поскольку в нашем случае  $a_r = a_z = \cos 45^\circ = \sqrt{2}/2$ , то в соответствии с предыдущим равенством  $\sigma_n = \frac{\sqrt{2}}{2} (\sigma_r + \sigma_z)$ . Подставив сюда значения  $\sigma_r$

и  $\sigma_z$  соответственно из выражений (1) и (2), получим:

$$\sigma_n = \frac{\sqrt{2}}{2} \sigma_0 \left( 1 + 2,2 \ln \frac{D}{d_1} + \frac{d_1 - 2r}{h} \right). \quad (3)$$

Анализируя последнее выражение, нетрудно заметить, что значение  $\sigma_n$  зависит от переменной  $r$ , которая изменяется в пределах  $\frac{d_0}{2} \leq r \leq \frac{d_1}{2}$ . При  $r = \frac{d_1}{2}$  величина  $\sigma_n$  будет минимальной, а при  $r = d_0/2$  она станет максимальной. Учитывая это, очевидно, справедливо будет воспользоваться некоторым средним значением  $\sigma_n$ , т.е. отвечающим значению переменной  $2r = \frac{1}{2}(d_1 + d_0)$ . Тогда уравнение (3) примет вид:

$$\sigma_{n_{\delta}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sigma_0 \left( 1 + 2,2 \ln \frac{D}{d_1} + \frac{d_1 - d_0}{2h} \right). \quad (4)$$

Для определения величины пластического формоизменения торообразного участка заготовки воспользуемся известным [7] решением о заполнении металлом углубления в деформирующем инструменте, приведенным для случая плоской деформации. В наших обозначениях (рис. 2) его можно записать в виде:

$$\sigma_{n_{\delta}} = \beta \sigma_0 \left( 1 + \frac{1}{\delta} \right) \left[ \left( \frac{B}{B_c} \right)^{\delta} - 1 \right]. \quad (5)$$

Здесь  $\delta = \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{f}{\operatorname{tg} 45^\circ} = f$ , где  $f$  - коэффициент контактного трения. Параметр Лоде в нашем случае можно принять  $\beta \approx 1$ , а в соответствии с рис. 2 величина  $B = h / \sin 45^\circ = \sqrt{2} h$ .

Тогда последнее уравнение примет вид:

$$\sigma_{n_{\delta}} = \sigma_0 \left( 1 + \frac{1}{f} \right) \left[ \left( \frac{B}{B_c} \right)^f - 1 \right]. \quad (6)$$

Теперь будем полагать, что  $\sigma_{n_y} = \sigma_{n_{cp}}$ , т.е. примем равенство между (4) (6). Искомой величиной в нашем случае является  $B_c$  - ширина площадки свободной поверхности.

$$B_c = B \sqrt[1 + \frac{f \left( 1 + 2,2 \ln \frac{D}{d_1} + \frac{d_1 - d_0}{2h} \right)}{\sqrt{2(f+1)}}]{1}. \quad (7)$$

По полученной формуле произведен расчет параметра  $B_c$  для разных коэффициентов контактного трения при формообразовании фланца внешним диаметром  $D = 375$  мм из трубы,

имеющей наружный диаметр  $d_1 = 294$  мм и внутренний

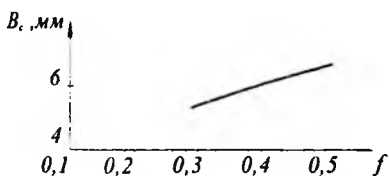


Рисунок 3 – Зависимость величины  $V_c$  от коэффициента контактного трения  $f$

$d_0 = 270$  мм. Результаты расчета отражены на графике (рис. 3).

Как видно из графика, с уменьшением коэффициента контактного трения протяженность свободной поверхности  $V_c$  в

зоне перехода от полости трубы к фланцу уменьшается. Однако этого не достаточно, чтобы удовлетворить условию чертёжа, согласно которому величина  $V_c$  не должна превышать

$2\sqrt{2}$  мм, что соответствует фаске в зоне перехода от цилиндрического отверстия к фланцу равной  $2 \times 45^\circ$ . Поэтому требуется совершенствование данного процесса отбортовки.

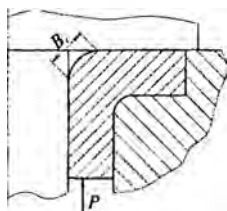


Рисунок 4 – Конструкция матрицы с ограничением радиального течения фланца

С этой целью предложено ввести упорный буртик в матрице для ограничения радиального течения фланца от центра к периферии (рис. 4).

Это позволит направить течение металла в заполненные полости, образованной заготовкой, цилиндрической частью пуансона и его торцем.

Найдем чему будет равно напряжение  $\sigma_{ny}$  при заданном

$V_c = 2\sqrt{2}$  мм для предельного коэффициента трения  $f = 0,5$ .

Согласно уравнению (6)  $\sigma_{ny} = 3\sigma_0(\sqrt{h/2} - 1)$ .



Поскольку  $\sigma_{н_у} = \sigma_{н_ср} = \sqrt{2}(\sigma_r + \sigma_z)/2$ , то в соответствии с уравнением пластичности  $\sigma_z - \sigma_r = \sigma_0$  можно записать  $\sigma_z = \sqrt{2}\sigma_{н_ср}/2 + \sigma_0/2$ , а с учетом значения  $\sigma_{н_ср}$  получим  $\sigma_z = \sigma_0 [3\sqrt{2}(\sqrt{h/2} - 1) + 1]/2$ .

Для случая, когда толщина стенки трубы  $h = 12$  мм, а величина  $V_c = 2\sqrt{2}$  мм, значение  $\sigma_z = 3,56\sigma_0$ . При  $V_c = 5\sqrt{2}$  мм и отсутствии упорного буртика  $\sigma_z = 1,66\sigma_0$ . Таким образом, для достижения требуемой величины  $V_c$  необходимо увеличивать осевое напряжение более чем в два раза.

### Литература

1. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1971. – 782 с.
2. Зубцов, М. Е. Листовая штамповка / М. Е. Зубцов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с.
3. Попов, Е. А. Основы теории листовой штамповки. / Е. А. Попов. – М.: Машиностроение, 1968. – 284 с.
4. Ершов, В. И. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки / В. И. Ершов, В. И. Глазков, М. Ф. Каширин. – М.: Машиностроение, 1990. – 312 с.
5. Особенности формообразования пластическим деформированием фланца в трубной заготовке / Л. А. Исаевич [и др.] // *Металлургия*. – Минск: Наука и техника, 2005, Вып.29. – С. 157–164.
6. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. И. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
7. Способ повышения усталостной прочности и долговечности малолитовых рессор / Л. А. Исаевич, Д. М. Иваницкий // *Металлургия*. – Минск: Наука и техника, 2005, Вып.29. – С. 148–157.
8. Третьяков, А. В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А. В. Третьяков, В. И. Зюзин. – М.: *Металлургия*, 1973. – 224 с.
9. Грудев, А. П. Внешнее трение при прокатке / А. П. Грудев. – М.: *Металлургия*, 1973. – 298 с.

УДК 620. 4539. 37

**Математическое моделирование энергосилового режима  
процесса скоростного выдавливания стержневых изделий  
с плакированием торцовой части**

Качанов И. В., Шарий В. Н.

Белорусский национальный технический университет

Метод скоростного выдавливания с плакированием торцовой части применяется для получения изделий стержневого типа с утолщением на одном конце из разных сталей и сплавов и является разновидностью процесса прессования [1,2]. Основы теории и практики процесса выдавливания (прессования) заложены в работах отечественных и зарубежных исследователей [1-4].

Пластическое течение металлов и сплавов в процессе скоростного выдавливания с плакированием сопровождается сложным комплексом специфических, взаимосвязанных явлений, детальный теоретический анализ которых сопряжен со значительными трудностями. Вследствие этого к настоящему времени для определения энергосиловых параметров процесса создан ряд теорий, с различных позиций описывающих поведение материалов в условиях скоростного нагружения.

Однако практическое применение расчетных зависимостей, полученных на основе этих теорий, затруднено, так как они ориентированы на использование эмпирических и полуэмпирических данных, для получения которых необходимо проведение дополнительных экспериментов. Известные более точные решения, основанные на использовании модели жесткопластического материала, являются либо слишком трудоемкими (решение по методу характеристик), либо не учитывают в полном объеме условия деформирования (метод верхней оценки).

На основании вышеизложенного в данной работе предлагается методика расчета усилия, действующего на пуансон при скоростном выдавливании с плакированием торцовой части заготовки.

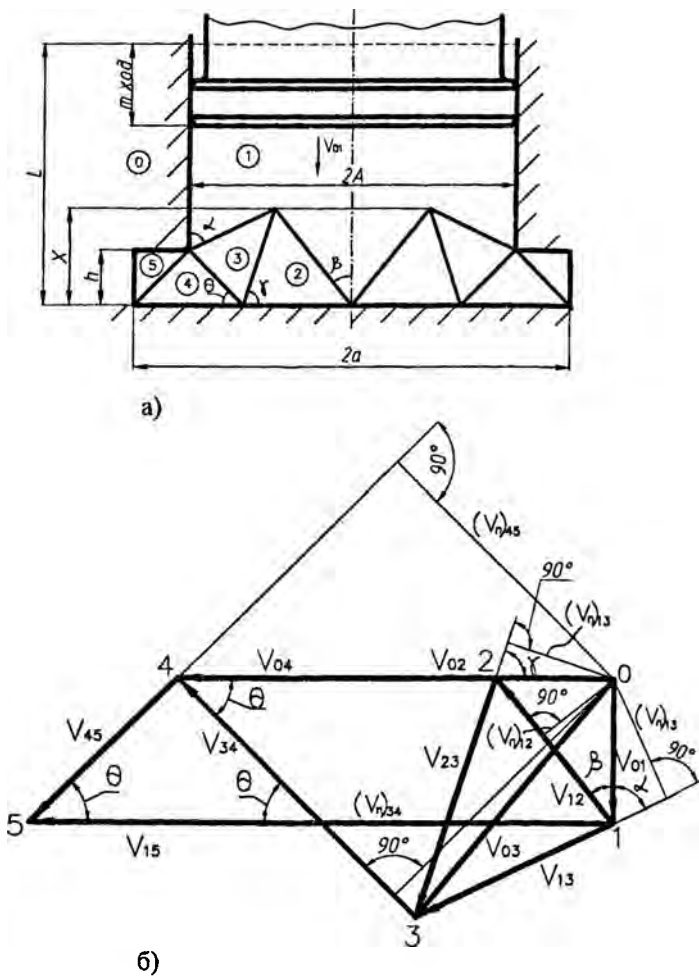


Рисунок 1 - Кинематически возможное поле линий скольжения (а) и соответствующий ему годограф скоростей (б)

Для решения задачи используем приближенный энергетический метод (метод верхней оценки). Для расчета интегральных энергосиловых параметров с помощью этого метода используем

кинематически возможное поле линий скольжения (рис. 1а) и соответствующий им годограф скоростей (рис. 1б). Выбор метода обусловлен тем, что он позволяет учесть ряд динамических явлений, возникающих при взаимодействии пуансона с заготовками, кинематику процесса, провести анализ нестационарного нагружения с учетом стадий процесса и получить решение в замкнутой аналитической форме. Кинематически возможное поле с тремя варьируемыми  $\alpha, \beta, \chi$  параметрами выбрано на основе известного поля линий скольжения для третьего периода штамповки при  $\alpha/h > 3$  [1], образованного дугами равного радиуса, в котором участки дуг заменены отрезками прямых линий.

При этом принимаем следующие допущения: материал заготовки однородный, несжимаемый, изотропный, жесткопластический, удовлетворяющий критерию текучести Губера-Мизеса; инструмент абсолютно жесткий; формирование очага пластической деформации происходит в начальной стадии соударения пуансона с заготовкой; вид поля линий скольжения в каждый момент времени не зависит от абсолютной скорости и ее изменения (квазистатическая задача); силы инерции не оказывают влияния на кинематику формоизменения (псевдостационарное течение).

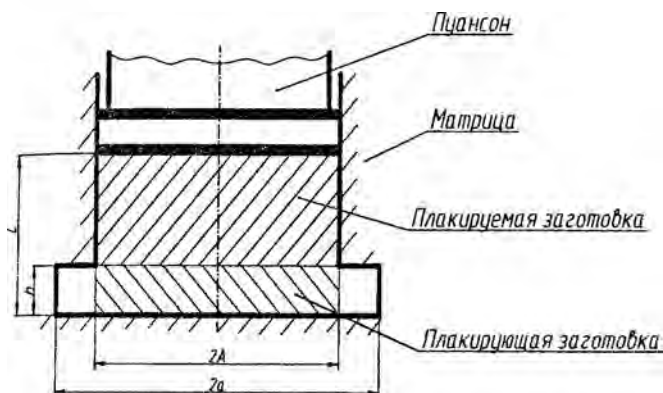


Рисунок 2 - Схема плакирования стержневых изделий ударной нагрузкой

Для получения наиболее полного решения динамической задачи по определению усилия, действующего на пуансон при

скоростном выдавливании плакируемой и плакирующей заготовок в радиальную полость матрицы толщиной  $h$  (рис. 2), необходимо при заданных граничных условиях, размерах инструмента, учесть массу пуансона и заготовок, а также кинематику течения металла. Величину усилия, найдем из уравнения баланса внешних и внутренних сил, которое представим в виде:

$$W_i = W_{\text{н.н.}} = W_{\text{н.д.}} + W_{\text{д.д.}} \pm W_{\text{д.и.}}, \quad (1)$$

где  $W_n$  - мощность движения пуансона (мощность внешних активных сил);  $W_{\text{н.н.}}$  - суммарная мощность сил сопротивления;  $W_{\text{н.д.}}$  - мощность сил (внешних и внутренних) собственного сопротивления деформированию;  $W_{\text{д.д.}}$  - мощность от действия динамических напряжений;  $W_{\text{д.и.}}$  - мощность от действия инерционных сил (взято со знаком «-» т.к. плакирование осуществляется на стадии торможения).

$$W_i = P_{i.i\bar{e}} \cdot v = p_{i.i\bar{e}} 2A \cdot b \cdot v, \quad (2)$$

где  $P_{i.i\bar{e}}$  и  $p_{i.i\bar{e}}$  - соответственно усилие и давление, действующие со стороны заготовки на пуансон;  $A$  - высота заготовки;  $b$  - ширина заготовки в плоскости перпендикулярной к направлению движения пуансона.

Выражение для расчета мощности  $W_{\text{н.д.}}$  представим в виде

$$W_{\text{н.д.}} = W_{\text{д.д.с.}} + W_{\text{д.д.т.}}, \quad (3)$$

где  $W_{\text{д.д.с.}}$  - мощность внутренних сил сопротивления, действующих на поверхностях разрыва скорости;  $W_{\text{д.д.т.}}$  - мощность сил контактного трения, действующих на поверхностях контакта деформируемых материалов и инструмента.

Величина мощности  $W_{\text{д.д.с.}}$  определяется из уравнения

$$W_{\text{д.д.с.}} = \sum k l_{rs} \cdot v_{rs}, \quad (4)$$

где  $l_{rs}$  - длина границ между блоками  $r$ ,  $s$  ( $r$  и  $s$  - номера блоков в принятом поле линий скольжения;  $r = 0, 1, 2, 3, 4$ ;  $s = 1, 2, 3, 4$ ,

5),  $v_{rs}$  - величина разрыва скорости вдоль границ смежных блоков  $r, s$ ;  $k$  – постоянная пластичности деформируемого материала (определяется по результатам динамических испытаний).

Для расчета мощности, затраченной на преодоление сил контактного трения  $W_{\partial\partial}$ , используется зависимость

$$W_{\partial\partial} = \sum \tau_k \cdot l_{rs} \cdot b \cdot v_{rs}, \quad (5)$$

где  $\tau_k$  - касательные напряжения, действующие на поверхности трения между деформируемой заготовкой и инструментом. Величину касательных напряжений можно определить по уравнению [3]

$$\tau_k = 2\mu k, \quad (6)$$

где  $\mu$  - коэффициент пластического трения, который характеризует состояние поверхности инструмента и может изменяться от  $\mu = 0$  (идеально гладкие поверхности) до максимального значения  $\mu = 0,5$  на поверхностях, где  $\tau_k = k$ .

С учетом (4), (5), (6) выражение для расчета мощности  $W_{\text{н.д.}}$  принимает вид

$$W_{\text{н.д.}} = (1 + 2\mu) \sum k l_{rs} b \cdot v_{rs}, \quad (7)$$

Согласно [3], скоростное пластическое течение частиц деформируемого материала через поверхность разрыва сопровождается изменением их количества движения. Под действием импульса силы, величина которого определяется указанным изменением количества движения, на поверхностях разрыва возникают дополнительные динамические напряжения  $(q_{\partial\partial i})_{rs}$ , определяемые по уравнению [3]

$$(q_{\partial\partial i})_{rs} = \rho(v_n)_{rs} \cdot v_{rs}, \quad (8)$$

где  $\rho$  - плотность деформируемого материала (принимается значение более плотного материала из двух деформируемых);  $(v_n)_{rs}$  - нормальная к поверхности разрыва компонента скорости (определяется по годографу скорости по рис. 16).

Мощность  $W_{a\dot{e}i.}$ , затраченная на преодоление напряжений  $(q_{a\dot{e}i.})_{rs}$ , рассчитывается по уравнению

$$W_{a\dot{e}i.} = q_{a\dot{e}i.} \cdot l_{rs} \cdot b \cdot v_{rs} = \rho(v_n)_{rs} v_{rs}^2 \cdot b l_{rs}. \quad (9)$$

Силы инерции  $P_{\dot{e}i.}$ , возникающие в заготовках при ударном воздействии на нее пуансона, определяется по формуле

$$P_{\dot{e}i.} = \sum_{i=1}^5 m_i \omega_i, \quad (10)$$

где  $m_i$  - массы блоков 1, 2, 3, 4, 5 в принятом поле линий скольжения;  $\omega_i$  - вектор ускорения частиц металла в жестких блоках 1, 2, 3, 4, 5 движущейся заготовки.

Учитывая выражение (10) и опуская в нем знак “минус”, обозначающий противоположное направление векторов силы инерции и ускорения блоков 1, 2, 3, 4, 5, запишем зависимость для расчета  $W_{\dot{e}i.}$

$$W_{\dot{e}i.} = \sum_{i=1}^5 m_i \omega_i v_i, \quad (11)$$

где  $v_i$  - вектор скорости частиц в жестких блоках 1, 2, 3, 4, 5

Для определения усилия, воспринимаемого пуансоном в процессе выдавливания, необходимо с помощью параметров поля  $\alpha, \beta, \chi$  размеров пуансона  $2A, b$ , уширения  $N$  выразить размеры границ блоков  $l_{rs}$ , определить массы блоков  $m_i$ , установить соотношение между кинематическими параметрами точек деформируемой заготовки  $v_{rs}, (v_n)_{rs}, \omega_i$  и блока 1 ( $v_{01}, \omega_{01}$ ).

Величина уширения  $N$  в условиях плоской деформации определяется из выражения

$$N = \frac{f}{f_0} = \frac{a}{A} = \frac{1}{\lambda}, \quad (12)$$

где  $f_0$  и  $f$  - площадь плоской заготовки до и после деформации;  $a$  - высота выдавленного профиля;  $\lambda_{те}$  - коэффициент уширения при плоской деформации.

С целью упрощения расчета линейных размеров блоков 1, 2, 3, 4, 5, их масс и кинематических параметров процесса введем вспомогательные углы  $\gamma$  и  $\theta$ , однозначно определяемые параметрами  $\alpha, \beta, x$  и геометрическими параметрами инструмента:

$$\begin{cases} \gamma = \text{arccctg} \frac{a - x \text{tg} \beta}{x} = \text{arccctg} \left( \frac{AN}{x} - \text{tg} \beta \right) \\ \theta = \text{arctg} \frac{h}{a - A} = \text{arctg} \frac{h}{A(N - 1)}. \end{cases} \quad (13)$$

Искомые величины длин граничных поверхностей  $l_{rs}$  для блоков поля на рис. 1 будут следующими

$$\begin{cases} l_{01} = L - m; l_{02} = A(2 - N); l_{04} = 2A(N - 1); l_{05} = A(N - 1); \\ l_{12} = \frac{x}{\cos \beta}; l_{13} = \frac{x - h}{\cos \alpha}; l_{23} = \frac{x}{\sin \gamma}; l_{34} = \frac{h}{\sin \theta} = l_{45}, \end{cases} \quad (14)$$

где  $m$  - путь деформирования,  $L$  - сумма длин плакируемой и плакирующей заготовок (рис. 2).

Зависимость (1) с учетом (3) - (14) представим в виде:

$$\begin{aligned} W_{\text{пл}} = kb \left[ (l_{12} \cdot u_{12} + l_{13} \cdot u_{13} + l_{23} \cdot u_{23} + l_{34} \cdot u_{34} + l_{45} \cdot u_{45}) + 2l_{01} \cdot u_{01} + l_{02} \cdot u_{02} + \right. \\ \left. + l_{04} \cdot u_{04} + l_{05} \cdot u_{05} \right] + pb \left[ (u_n)_{12} \cdot u_{12}^2 \cdot l_{12} + (u_n)_{13} \cdot u_{13}^2 \cdot l_{13} + (u_n)_{23} \cdot u_{23}^2 \cdot l_{23} + \right. \\ \left. + (u_n)_{34} \cdot u_{34}^2 \cdot l_{34} + (u_n)_{45} \cdot u_{45}^2 \cdot l_{45} \right] \pm (m_1 \omega_{01} \cdot u_{01} + m_2 \omega_{02} \cdot u_{02} + m_3 \omega_{03} \cdot u_{03} + \\ + m_4 \omega_{04} \cdot u_{04} + m_5 \omega_{05} \cdot u_{05}). \end{aligned} \quad (15)$$

Выражение (15) в результате преобразований с учетом (3) - (14) запишется следующим образом

$$W_{cc} = b \omega_{01} \left\{ k \left[ F_1(\alpha, \beta) + 2A(L - m) \right] + \rho_{01}^2 F_2(\alpha, \beta) \pm \rho_{01} \left[ (L - m) + F_3(\alpha, \beta) \right] \right\}, \quad (16)$$



Исходя из условия баланса мощностей (1) и учитывая зависимость (16), получим уравнение для определения минимального усилия  $P_{i,iz}$ , действующего на пуансон на стадии торможения при выдавливании плоской заготовки в радиальную полость матрицы

$$P_{i,iz} = \frac{\omega_0 \{k(F_1(\alpha, \beta) + 2\mu(L-m)) + \rho\omega_0^2 F_2(\alpha, \beta) \pm \rho\omega_0((L-m) + F_3(\alpha, \beta))\}}{2A} \quad (17)$$

Входящие в уравнение (17) функции  $F_1(\alpha, \beta)$ ,  $F_2(\alpha, \beta)$ ,  $F_3(\alpha, \beta)$  определяются из условий плоской деформации путем исследования на экстремум мощности сил собственного сопротивления  $W_{\text{н.д.}}$  деформируемой заготовки [5].

Анализируя зависимость (17), получаем достаточно полное отражение реальных условий ударного выдавливания с плакированием, так как в ней представлены реологические характеристики материала ( $k$ ,  $\rho$ ), параметры техпроцесса ( $\mu$ ,  $\nu$ ,  $\omega$ ), геометрия инструмента ( $L, A, m$ ).

Принимая во внимание сказанное, уравнение (17) может быть рекомендовано для прогнозирования оптимального силового режима работы инструмента при ударном выдавливании стержневых изделий с плакированием торцевой части в матрице.

### Литература

1. Шофман, Л. А. Основы расчета процессов штамповки и прессования / Л. А. Шофман. – М.: Машиностроение, 1981. – 340 с.
2. Губкин, С. И. Теория обработки металлов давлением / С. И. Губкин. – М.: Металлургия, 1947. – 532 с.
3. Томленов, А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.
4. Перлин, И. Л. Теория прессования металлов / И. Л. Перлин, Л. Х. Райтбарг. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1975. – 448 с.
5. Качанов, И. В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий / И. В. Качанов; под ред. Л. А. Исаевича. – Минск: УП «Технопринт», 2002. – 327 с. – ISBN 985 – 464 – 225 – 9.

# Материаловедение в машиностроении

УДК 629.735

**Разработка износостойких покрытий для повышения долговечности крепежных болтов корпусов плугов**

Ткаченко Г. А.

Белорусский национальный технический университет

Разработка износостойких покрытий для сельскохозяйственной техники, в частности плугов, является актуальной проблемой, т.к. ресурс работы быстро изнашиваемых деталей отечественных плугов не превышает 20 – 50 га вспаханной земли.

Рабочие элементы корпусов плугов в процессе эксплуатации подвергаются интенсивному абразивному изнашиванию. Одним из факторов ограничивающим срок эксплуатации рабочих элементов и увеличивающим частоту их замены, является повышенный износ головки болта, приводящий к нарушению целостности конструкции. Вследствие этого происходит отрыв рабочего элемента от корпуса плуга.

Болты изготавливают методом ОМД, при котором происходит наклеп всех поверхностей болта. Твердость головок болтов составляет 20 HRC – сталь 10, 30 HRC – сталь 40X. Для увеличения срока эксплуатации болта, было предложено использовать износостойкие диффузионные покрытия и наплавку предварительно борированной пластины.

Износостойкие диффузионные покрытия получали методом высокотемпературной нитроцементации из паст, используя нагрев токами высокой частоты.

Насыщение поверхности болтов проводили при температуре 1200 °С с последующей изотермической выдержкой 90 секунд, затем проводили закалку.

После ЭХТО величина диффузионного слоя составила на стали 10 - 300 мкм, а на стали 40X - 320 мкм. Металлографический анализ полученных структур показал следующее: после нитроцементации при 1200 °С, с последующей

закалкой, диффузионный слой состоит из мартенсита игольчатого и аустенита остаточного (рис. 1, 2)

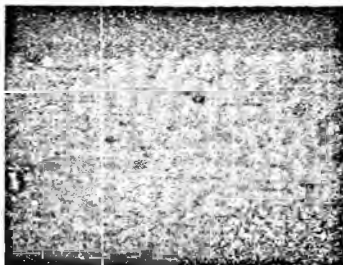


Рисунок 1 - Структура стали 40X после нитроцементации при 1100 °С – 1200 °С  
Х500



Рисунок 2 – Структура стали 10 после нитроцементации при 1100 – 1200 °С  
Х350

Увеличение температуры насыщения с 1200 °С до 1400 °С, приводит к образованию на поверхности болта жидкометаллической фазы, что позволило получить на стали 40X за 90 секунд слой в 0,9 мм белого доэвтектического чугуна, (рис. 3).

Такой же эффект, от увеличения температуры насыщения, наблюдается и на стали 10, где помимо нитроцементованного слоя образуется ледебуритный слой величиной 30 – 40 мкм, (рис. 4).

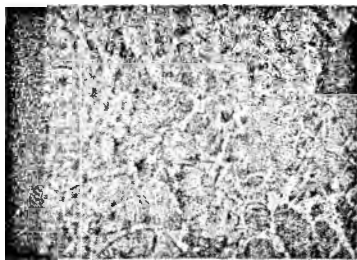


Рисунок 3 – Структура сталь 40X после нитроцементации при 1300 °С – 1400 °С  
Х500

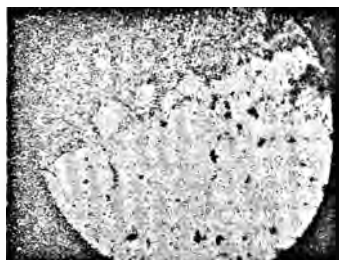


Рисунок 4 – Структура стали 10 после нитроцементации при 1300 – 1400 °С  
Х500

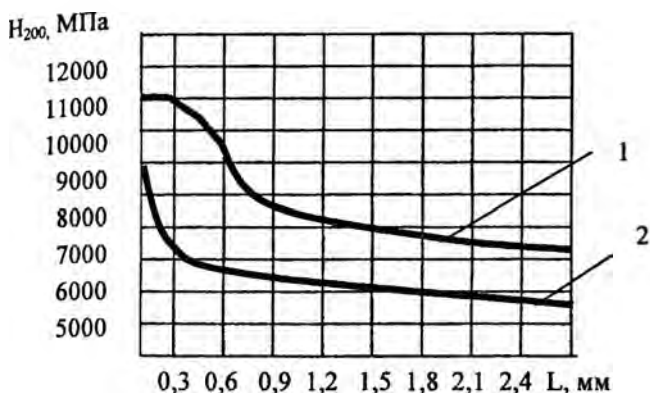


Рисунок 5 - Микротвердость стали после высокотемпературной нитроцементации и закалки:  
1 – сталь 40Х, 2 – сталь 10

Глубина упрочненного слоя, представлена на графике распределения микротвердости, (рис 5).

Из которого видно, что после насыщения при температуре 1200 °С максимальная твердость составляет 9000 МПа; при температуре 1400 °С – 12000 МПа.

Другим вариантом повышения износостойкости, являлась наплавка износостойкого покрытия в виде предварительно борированной пластины.

Для термодиффузионной наплавки использовали пластины толщиной 0,7 и 1,0 мм. Пластины предварительно подвергали двух фазному борированию в порошковой среде.

Пластину, помещенную на головку болта, нагревали до температур образования эвтектики, выдерживали при данных температурах от 0,5 до 2 минут. Охлаждение проводили и в воде, и на воздухе.

Пластина величиной в 1 мм подвергнутая нагреву, в течение 1 минуты, имеет структуру наплавленного слоя,

представляющую собой чередование оплавленных зон, остатков боридных слоев и основы (рис. 6, 7).

На поверхности сформировалась заэвтектическая зона, содержащая в качестве избыточной фазы, бориды железа (зона 1). Ее твердость составляла 8500 МПа, далее следует нерасплавленный боридный слой (зона 2) с твердостью 14500 МПа, за ним эвтектика с твердостью 8000 – 8100 МПа (зона 3), а которой располагается нерасплавленная основа листа (зона 4).

Далее наблюдается такое же чередование структур только в обратном порядке.

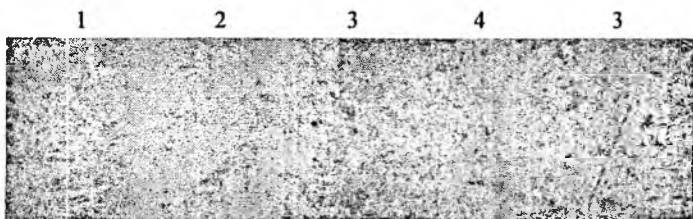


Рисунок 6 – Структура частично оплавленной борированной пластины  
X500

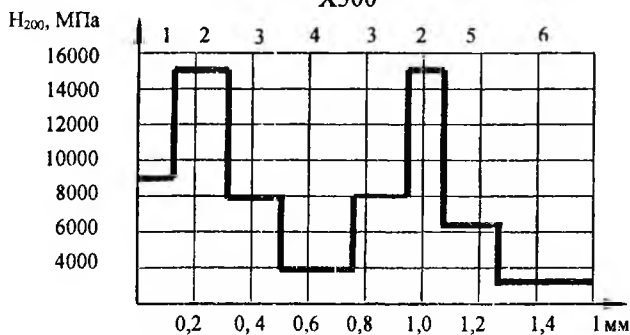


Рисунок 7 – Микротвердость частично оплавленной борированной пластины, после охлаждения в воде

Распределение микротвердости представлено на рисунке 7.

Дальнейшее увеличение времени выдержки приводит к полному оплавлению пластины и формированию эвтектической структуры с твердостью 8500 МПа и доэвтектической структуры

у поверхности болта. Таким образом, для повышения износостойкости крепежных элементов корпусов плугов, была применена высокотемпературная нитроцементация из паст, с последующей закалкой, а также наплавка предварительно борированной пластины. Эти покрытия дают твердость 63 HRC и обеспечивают упрочненный слой от 0,3 до 1,0 мм.

УДК 621.785.5

### **Использование двухкомпонентного диффузионного упрочнения с участием бора и кремния для повышения свойств сталей**

Ситкевич М. В., Кузменко Н. Н.

Белорусский национальный технический университет

Актуальными являются исследования по комплексному насыщению бором совместно с другими элементами, которые позволяют получить более высокие характеристики диффузионно-упрочненных материалов при эксплуатации в различных условиях.

В работе применялись образцы из сталей 45, У8. Насыщение образцов проводили в борлирующих и боросилицирующих смесях и обмазках в которых поставщиком активных атомов бора являлся карбида бора, поставщиком атомов кремния-пылевидной кварц, в качестве газогенерирующего активатора использовался фтористый натрий. Насыщение проводили при температурах 900, 950, 1000°C в течение 1-5 часов.

При насыщении в течении 1 часа в борлирующей смеси при 900° С на сталях 45 и У8 формируются слои толщиной 70 и 60 мкм соответственно. При насыщении в течение 1 часа в борлирующей обмазке, формируются слои 60 и 50 мкм соответственно. Увеличение времени насыщения до 5 часов дает увеличение толщины борированного слоя до 140 и 130 мкм при насыщении в смеси соответственно на сталях 45 и У8, а при ХТО в борлирующей обмазке толщина слоя уменьшается до 130 и 120 мкм соответственно.

Боросилицирование образцов сталей 45 и У8 при температуре 900°C приводит к формированию диффузионных слоев, которые по толщине заметно меньше, чем борированные. По

микроструктуре боросилицированные слои, полученные при 900°C, похожи на борированные. Боросилицированные слои имеют игольчатое строение, но иглы несколько более узкие, чем в случае борирования и между ними просматривается небольшая доля включений других фаз. В отличие от борированных слоев в структуре боросилицированных слоев рентгеноструктурным анализом не обнаружено фазы FeB.

Увеличение температуры боросилицирования не столь заметно влияет на толщину диффузионных слоев, как в случае борирования. Результаты исследований показывают, что если при температуре 900°C за 4 часа на стали 45 образуются боросилицированные слои толщиной порядка 90 мкм, то при 950°C за это время они - 100 мкм, а при 1000°C — 130 мкм. На стали У8 толщина диффузионных слоев несколько меньше, чем на стали 45, но тоже с увеличением температуры с 900°C до 1000°C резкого роста толщины боросилицированных слоев не наблюдается, что можно связать с изменением характера диффузионного насыщения двумя элементами (бором и кремнием) при увеличении температуры ХТО. Микроструктурный анализ показывает, что в случае боросилицирования при температуре 900°C преобладает насыщение бором - диффузионные слои имеют характерное для борирования игольчатое строение. При увеличении температуры в поверхностный слой диффундирует наряду с бором повышенная доля атомов кремния, что приводит к появлению в структуре диффузионных слоев значительной доли силицидных фаз, причем такое строение присуще как после боросилицирования стали 45, так и стали У8.

Структурные изменения, имеющие место в результате борирования и боросилицирования при различных параметрах ХТО, существенно сказываются на показателях микротвердости и микрохрупкости диффузионных слоев. Наиболее высокие показатели микротвердости имеют место в случае борирования сталей 45 и У8. Причем высокая микротвердость поверхности (18-20 ГПа) отмечается как в случае борирования в обмазках, так и порошковых смесях. Следует отметить, что такая твердость характерна находящейся вблизи поверхности фазе FeB, которая образуется в борированных слоях как при температуре 900°C, так при более высоких температурах. Под слоем фазы FeB

располагается зона фазы  $\text{Fe}_2\text{B}$ , твердость которой несколько ниже - на уровне 13-15 ГПа. В случае боросилицирования при температуре  $900^\circ\text{C}$  микротвердость поверхности как раз и соответствует микротвердости фазы  $\text{Fe}_2\text{B}$  и находится на уровне 13 ГПа на образцах стали 45 и на уровне 14 ГПа на стали У8. При этом ХТО как в обмазках, так и порошковых смесях в негерметизируемых контейнерах дает практически аналогичные результаты.

Повышение температуры боросилицирования до  $1000^\circ\text{C}$ , как отмечалось выше, приводит к появлению в структуре диффузионного слоя значительной доли силицидных фаз (по данным рентгеноструктурного анализа наряду с  $\text{Fe}_2\text{B}$  присутствует  $\alpha'$ -фаза ( твердый раствор на базе соединения  $\text{Fe}_3\text{Si}$ ), микротвердость которой заметно ниже, чем у фазы  $\text{Fe}_2\text{B}$ . Средняя микротвердость поверхности после боросилицирования при  $1000^\circ\text{C}$  находится на уровне 10-11 ГПа, что заметно ниже, чем в случае борирования (18-20 ГПа) и боросилицирования при температуре  $900^\circ\text{C}$  (13-14 ГПа), но значительно выше, чем твердость поверхности без ХТО - всего 2-2,5 ГПа.

Изменение структурного состояния боросилицированных слоев по сравнению с борированными очень заметно сказывается на микрохрупкости поверхностных слоев, которая определялась по напряжению (рис.1., 2.). Так, наиболее твердая поверхностная зона из фазы  $\text{FeB}$  боридного слоя обладает и наиболее высокой хрупкостью (минимальный уровень напряжения скола). В случае боросилицирования при температуре  $900^\circ\text{C}$  при снижении микротвердости всего на 20-25% (до уровня 13-14 ГПа, что характерно фазе  $\text{Fe}_2\text{B}$ ) напряжение скола увеличивается в 3-3,5 раза (рис.1., 2.), что свидетельствует о значительном повышении сопротивлению хрупкому разрушению диффузионноупрочненных поверхностей деталей при их работе в условиях динамических воздействий в процессе изнашивания. Если получать боросилицированные детали при температуре ХТО  $1000^\circ\text{C}$ , то при относительно высокой микротвердости (10-11 ГПа), сопротивление сколу увеличивается в 5-5,5 раз по сравнению с борированными слоями и примерно в 2 раза по сравнению с



боросилицированными слоями полученными при температуре 900°C.

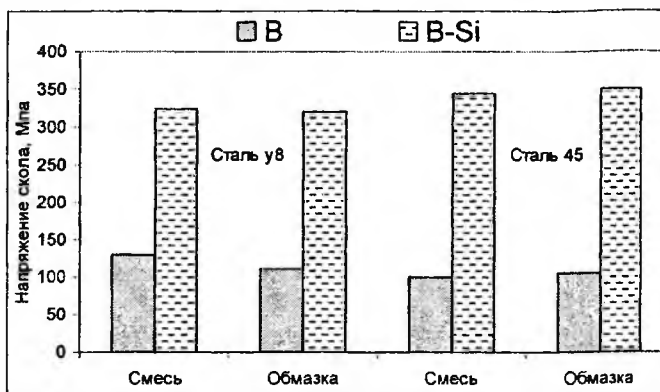


Рис.1. Влияние ХТО на микрохрупкость поверхностных слоёв, полученных при  $T = 900^\circ\text{C}$ ,  $t = 4$  часа.

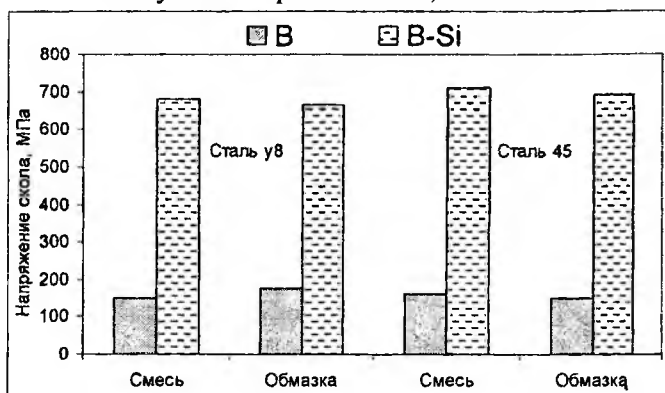


Рис.2. Влияние ХТО на микрохрупкость поверхностных слоёв, полученных при  $T = 1000^\circ\text{C}$ ,  $t = 4$  часа

Таким образом, изменяя параметры ХТО можно получить отличающиеся по структуре диффузионные слои с различным соотношением фаз  $\text{FeB}$ ,  $\text{Fe}_2\text{B}$ ,  $\text{Fe}_3\text{Si}$ , что в значительной степени влияет на сопротивление хрупкому разрушению поверхностных слоев деталей, эксплуатирующихся в реальных условиях в парах трения при периодических или постоянных ударных воздействиях.

УДК 621.785

**Разработка технологии получения наноструктурированных покрытий на высокохромистых сталях**

Галынская Н. А., Кухарева Н. Г., Петрович С. Н.  
Белорусский национальный технический университет

В настоящее время на предприятиях Беларуси для изготовления вырубных, вытяжных и гибочных штампов, режущего и мерительного инструмента, деталей насосов, буровой и топливной аппаратуры и т.п. используются высокохромистые стали типа X12. Для снижения их импорта необходимо увеличить эксплуатационные характеристики изготавливаемых из них изделий, что может быть достигнуто методами поверхностной обработки, в частности, диффузионной карбидизацией.

Карбидизация высокохромистых сталей типа X12 с последующей термической обработкой даст возможность создать благоприятный комплекс механических свойств: достаточно прочную и пластичную сердцевину с твердым износостойким, нехрупким поверхностным слоем.

Основной недостаток известных технологий – окисление поверхности изделий и наличие в диффузионном слое зоны разветвленных карбидных образований, отрицательно влияющих на эксплуатационные характеристики упрочненных изделий.

Целью работы явилось изучение возможности получения в карбидоупрочняемых диффузионных слоях на стали типа X12 мелкодисперсных равномерно распределенных карбидных включений при отсутствии внутреннего окисления.

В настоящем исследовании при проведении процесса карбидизации высокохромистых сталей в порошковую насыщающую среду помимо угля вводили хлористый аммоний, бикарбонат натрия, и хромирующую порошковую насыщающую смесь, приготовленную с использованием элементов технологии внепечного металлотермического производства. Насыщение проводили при 950-1050 °С в течение 3-6 час.

Проведен гранулометрический, рентгеноструктурный и микрорентгеноспектральный анализ хромирующей смеси.

Установлено, что данная смесь после восстановления состоит из отдельных зерен металлического хрома, зерен, состоящих из смеси металлического хрома и окиси алюминия, и зерен твердого раствора окиси хрома в окиси алюминия, где растворено до 6% окиси хрома, в то время как в традиционно используемых смесях это легирование отсутствует. Микроструктурные исследования алюмотермических и традиционных смесей показали, что однотипные по цвету зерна одинакового фракционного и фазового состава различны по строению (рисунок 1).

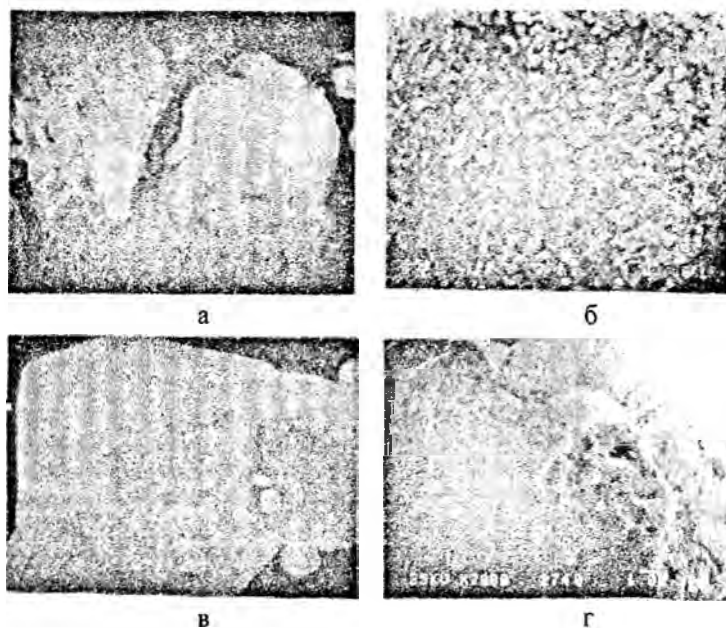


Рисунок 1 - Микроструктуры зерен  $Al_2O_3$  ( а, б) и  $Cr$  (в, г)  
а, в – в традиционных смесях;  
б, г - в металлотермических смесях

В результате насыщения в разработанной смеси на стали Х12Ф1 формируется диффузионный слой, состоящий из двух зон: верхней, так называемой активной, имеющей повышенную

травимость и более высокое содержание мелкодисперсных равномерно распределенных карбидных включений, и переходной, по травимости мало отличающейся от сердцевины, с карбидными включениями, концентрирующимися преимущественно по границам бывших аустенитных зерен. Легированный хромом цементит и карбиды  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  и  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  расположены в  $\alpha\text{-Fe}$ . Присутствие оксидов железа и хрома в слое не обнаружено.

Исследовано влияние температуры насыщения на распределение карбидов по толщине диффузионного слоя на стали X12Ф1. Исследования выполняли на анализаторе "Mini Magiscal" фирмы "Joese Loebl" (Англия) на шлифах по специальной методике с учетом направления прокатки прутка.

Термохимическая обработка при  $900\text{ }^\circ\text{C}$  (4 ч) в разработанной насыщающей среде приводит к формированию слоя толщиной 450 мкм, в котором на глубинке 30, 90 и 200 мкм до 75-80 % от общего числа карбидов приходится на мелкие карбиды с площадью до  $1\text{ мкм}^2$  (рисунок 2). Причем, размеры самых мелких карбидов (>30 %) лежат в наноразмерном диапазоне. Увеличение температуры свыше  $950\text{ }^\circ\text{C}$  приводит к снижению количества карбидов с минимальной площадью.

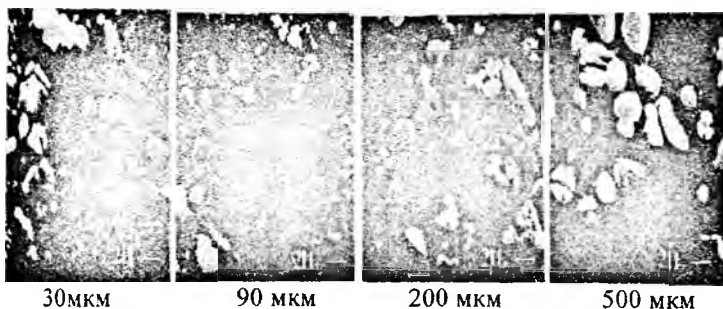


Рисунок 2 – Микроструктуры исследуемых на различном удалении от поверхности участков слоя на стали X12, подвергнутой карбидизации по режиму  $900\text{ }^\circ\text{C}$  (4 ч). Травитель – реактив "Мураками".  $\times 5000$

Твердость диффузионного слоя после обработки в порошковой среде составляет 36-38 HRC, поэтому после карбидизации изделия подвергали одинарной закалке с повторного нагрева в диапазоне температур 750-1050 °С и отпуску - 200-500 °С в течение 2-4 часов с последующим охлаждением на воздухе. Для защиты от окисления и обезуглероживания изделия нагрев под закалку осуществляли в контейнерах под слоем древесного угля.

Установлено, что максимальная твердость 66-68 HRC поверхностного слоя, при твердости сердцевины 48-50 HRC, достигалась при обработке в разработанных средах при температуре закалки 850 °С и отпуска - 200 °С. Микротвердость плавно уменьшается по толщине карбидизированного слоя. Высокая поверхностная твердость подтверждает отсутствие зоны внутреннего окисления.

Определены составы насыщающих сред для карбидизации, при использовании которых формируются слои с максимальным количеством мелкодисперсных равномерно распределенных карбидных частиц.

Выводы:

- разработана активированная металлооксидная среда и режимы термохимической обработки высокохромистых сталей, использование которых позволило получить карбидоупрочняемые слои заданной структуры и фазового состава;

- изучены строение и фазовый состав карбидизированных покрытий на стали X12Ф. Установлено, что при обработке в разработанных средах на поверхности высокохромистой стали формируется зона мелкодисперсных равномерно распределенных карбидных включений, >30 % из которых представляют собой наноразмерные частицы, зоны разветвленных крупных карбидов и внутреннего окисления поверхности отсутствуют.

- исследовано влияние условий последующей термообработки на твердость предварительно карбидизированной стали X12Ф1. Максимальная твердость HRC достигает на поверхности упрочненной стали 65-67 HRC, при закалке с 850-900 °С, отпуске – 200 °С, 2 ч.

**Получение и использование конгломерированных композиционных порошков для плазменного формообразования**

Соколов Ю. В., Калиновский В. Р., Хлебцевич В. А.,  
Позняк И. Г.

Белорусский национальный технический университет

Технологические особенности процесса плазменного напыления применительно к формованию сложных поверхностей типа матриц пресс-форм и кокилей требует создания условий, обеспечивающих высокую степень компактности напыленного слоя покрытия со стороны модели подложки [1]. Этот слой покрытия – рабочий слой матрицы – непосредственно участвует в процессе формообразования и является зоной наиболее часто подверженной разрушению, особенно при эксплуатации матриц в пресс-формах прямого прессования. На основе традиционного подхода – оплавления покрытий, напыленных порошками самофлюсующихся сплавов – проблема рабочего слоя крупногабаритных матриц не всегда решается, из-за возникновения таких явлений как коробление, отрыв слоя от модели или, напротив, приваривание частиц порошка к поверхности формообразующей модели и снижение тем самым качества формообразования. В этом случае оформление рабочего слоя целесообразно проводить напылением порошков композиционного типа, нивелирующими эффект оплавления покрытий, например экзотермически реагирующих порошков, в которых при нагреве протекают химические реакции, обусловленные взаимодействием компонентов композиций с формированием на модели напыленного слоя с высокими значениями плотности когезионной прочности, износостойкости [2].

Одним из способов получения смесей композиционных порошков является конгломерирование в присутствии связующего в смесительных устройствах различных конструкций – гравитационных, барабанных, лопастных, шнековых [3]. Использование последних двух конструкций смесителей является наиболее перспективным с точки зрения возможности достижения гомогенности гетерогенных смесей.

Однако смешивание происходит при образовании градиентов скоростей между слоями и смесительный орган должен обеспечивать перемешивание отдельных слоев относительно друг друга так, чтобы в объеме смесителя была исключена «мертвая» зона. Имеющиеся конструкции только частично отвечают этому требованию, что отрицательно сказывается на степени гомогенности конечного продукта.

Предложено устройство типа шнекового смесителя положительный результат в котором проявлен в новой кинематике узлов рабочего органа и приводов [4]. Общий вид конструкции с вертикальным разрезом приведен на рис.1.

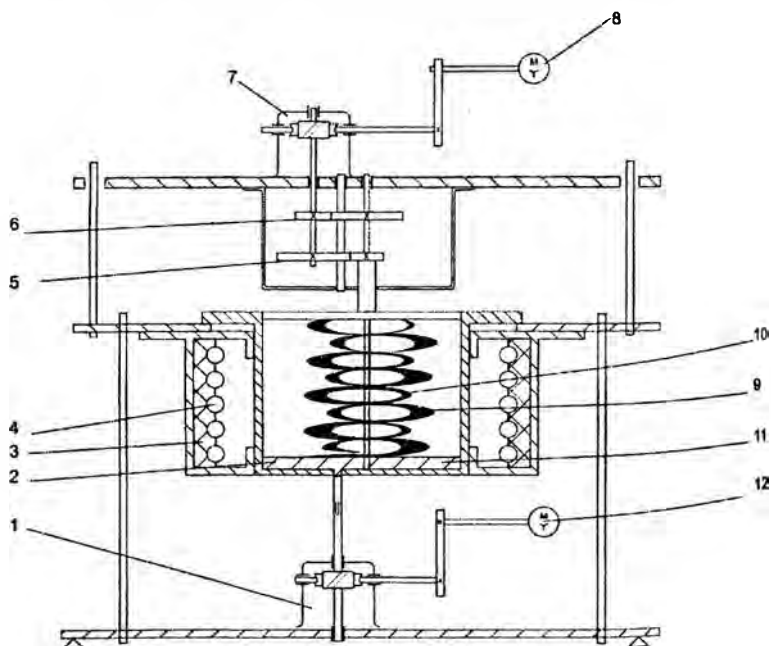


Рис.1 Шнековый смеситель

Смеситель содержит привод 1 осевого вращения смесительной камеры 2, размещенной в теплоизолирующем сосуде 3 с нагревателем 4, автономный привод, образованный зубчатыми парами 5 и 6 червячного редуктора 7, приводимого от двигателя 8, рабочий орган, образованный двумя шнеками 9 и 10, размещенный в смесительной камере 2 эксцентрично относительно вертикальной оси вращения смесительной камеры и коаксиально друг относительно друга. Шнеки 9 и 10 выполнены с различным направлением их винтовых образующих. В донной зоне смесительной камеры 2 размещены скребки 11. Автономный привод – червячный редуктор 1 осевого вращения смесительной камеры 2 приводится во вращение от двигателя 12. Зубчатые пары 5 и 6 автономного привода шнеков 9 и 10 обесцвечивают их однонаправленное вращение. Планетарное вращение шнеков 9 и 10 происходит за счет их расположения в смесительной камере 2 эксцентрично относительно вертикально оси вращения смесительной камеры 2.

В смесители приготавливали порошковые композиции на основе порошка нихрома (NiCr). Просеянный через сито 0,1 порошок NiCr перемешивали с высокодисперсным порошком алюминия с добавлением органической связки, в качестве которой использовали лак на основе нитроцеллюлозы НЦ-62 (ГОСТ 6-10-391-74). Перемешивание проводили с одновременной сушкой связующего вещества при температуре 80°С с целью удаления растворителя связующего. После высушивания, сбора и отсева композиции представляли конгломерат, состоящий из частиц основы, на поверхности которых при помощи связки закреплялись частицы высокодисперсного алюминия.

Состав композиций, контролируемый методом химического анализа отобранных проб соответствовал ~ 4,0 и 5,0 мас.% алюминия. Органическая связка составляла 2,5...4,0 мас.%.

Формы частиц порошка NiCr и композиции NiCr-Al представлены на рис.2.

Напыление порошков проводили на плазменной установке УПУ -ЗД в дуге аргонно-аммиачной плазмы при мощности дуги 30 кВт, дистанции напыления 0,12 м на холодную модель-



подложку из стали 45 при резонансном режиме вибрации подложки [5].

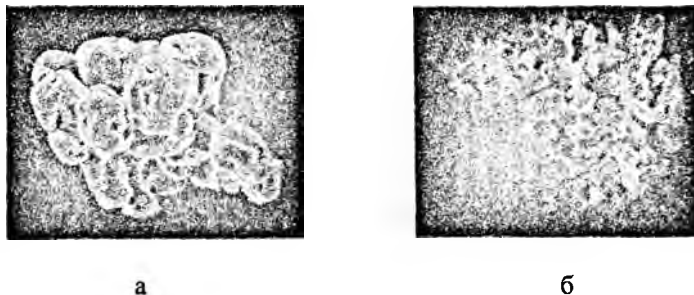


Рис.2 Формы частиц порошков материалов, х 700  
а – NiCr, б –NiCr-Al (5%Al)

О степени компактности напыленного покрытия судили по изменению пористости покрытия на расстоянии  $\sim 0,2$  мм от поверхности подложки. При напылении порошка NiCr пористость покрытий составляла 6,5...7,2%, добавки алюминия обеспечивали снижение пористости покрытия до 4,3%. Последнее обусловлено эффектом экзотермического взаимодействия компонентов композиций в плазменной струе и повышением теплосодержания частиц порошка.

### Литература

1. Технология изготовления матриц литейных форм / Ю. В. Соколов, М. А. Садоха, Ф. А. Чахович, Д. А. Попок // Литейное производство. – 1996. – №1. – С. 9–12.
2. Борисов, Ю. С. Технология получения композиционных порошков для газотермического напыления с применением связующих веществ / Ю. С. Борисов, В. Р. Калиновский. – Минск: БелНИИНТИ, 1989. – 32 с.
3. Когломерированные композиционные порошки для газотермического напыления / В. Р. Калиновский, Ю. В. Соколов, А. Ф. Ильющенко [и др.] // Перспективы развития поверхностного и объемного упрочнения сплавов: Сб. науч. трудов; под ред. Л. Г. Ворошнина. – Минск, 2004. – С. 124-133.

4. Шнековый смеситель для получения коагулированных композиционных порошков / Ю. В. Соколов, В. Р. Калиновский, В. А. Хлебцевич [и др.]. – Решение от 18.05.2007г. о выдачи патента РБ по заявке № а20041192.

5. Устройства для снятия внутренних напряжений в формообразующих деталях: пат. 8644 Респ. Беларусь / Ю. В. Соколов, Г. И. Залужный, В. А. Хлебцевич, Д. А. Попок. – Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели. Промышленные образцы». – 2006. – № 3.

УДК 620.178

**К вопросу оценки модуля упругости диффузионно-упрочненных слоев быстрорежущих сталей индентированием**

**Степанкин И. Н.**

**Гомельский государственный технический университет  
им. П. О. Сухого»**

В работе проведен анализ современных методов определения упругих характеристик локальных объемов многофазных материалов. Показано, что высокую достоверность обеспечивает метод индентирования малых объемов. Разработана уточненная методика и проведены экспериментальные исследования на образцах из быстрорежущей стали Р6М5. Определены значения поправки на податливость нагружающего узла испытательного комплекса “Instron” при расчетах модуля упругости материала, подвергнутого индентированию.

Выполнены экспериментальные исследования упругих характеристик диффузионно-упрочненных слоев. Исследован процесс контактного взаимодействия в системе индентор – упрочненный слой – сердцевина для рассмотренного диапазона нагрузок.

Показано, что характер упругого взаимодействия индентора с поверхностью образца зависит от соотношения размеров площади отпечатка индентора и фаз композиционного материала. При небольших нагрузках на индентор результаты исследования во многом определяются свойствами отдельных

компонентов композиционного материала. Для построения интегральной зависимости модуля упругости от совокупности свойств фаз, полученной в результате суперпозиции реакций отдельных фаз с учетом их взаимодействия между собой, необходимо проведение индентирования при нагрузках обеспечивающих получение отпечатков на контактных площадках, охватывающих все фазы материала.

Выявлено, что расчетное значение модуля упругости во многом зависит от точности определения начальной координаты индентора при его погружении в испытуемый материал.

Показано, что погрешность определения данной величины обусловлена как приборными показаниями, так и условиями сопряжения контактирующих поверхностей индентора и испытуемого образца.

Определены численные значения модуля упругости карбонитридного и карбидного слоев быстрорежущей стали (рис. 1, 2). Они составили  $2,22 \times 10^{11}$  и  $2,28 \times 10^{11}$  Па соответственно.

$2,22 \times 10^{11}$  Па

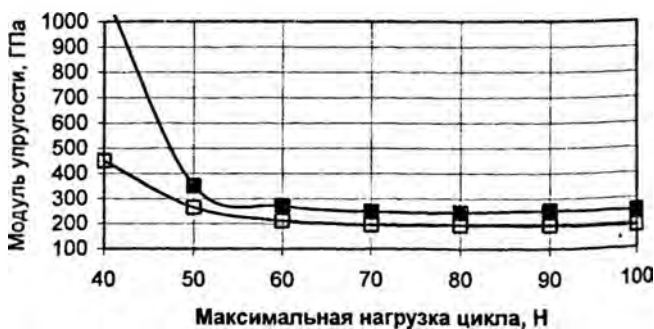


Рисунок 1

Зависимость расчетного значения модуля упругости карбонитридного слоя от величины приложенной к индентору нагрузки; максимальное (■) и минимальное (□) значения рассчитанной величины для одного и того же цикла нагружения.

$$2,28 \times 10^{11} \text{Па}$$



Рисунок 2

Зависимость расчетного значения модуля упругости карбидного слоя от величины, приложенной к индентору нагрузки; максимальное (■) и минимальное (□) значения рассчитанной величины для одного и того же цикла нагружения.

# Теория механизмов и машин

УДК 629.113.65

**Инерционные маховичные двигатели – один из путей развития экологически чистого городского и пригородного транспорта**

Астахов Э. И., Пирч А. И., Саболевский А. К.  
Белорусский национальный технический университет

Газовые выбросы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) городского автомобильного транспорта – один из основных источников загрязнения атмосферы и вредных осадков не только в городе, но и в пригородных зонах вдоль автомагистралей. Поэтому создание экологически чистого городского и пригородного автотранспорта является в настоящее время важной экоприоритетной задачей крупных городов и мегаполисов. Широко рекламируемое в настоящее время водородное топливо на наш взгляд является временной отсрочкой грозящей экологической катастрофы, так как массовый забор атмосферного воздуха или воды для получения водородных топливных элементов в массовом производстве неизбежно и непредсказуемо изменит водный и воздушный баланс внешней оболочки нашей планеты. Это и сейчас начинает проявляться в появлении «озоновых дыр» в разных точках атмосферы Земли. Применение экологически чистых инерционных маховичных двигателей в виде быстровращающегося ротора-маховика с большим запасом кинетической энергии было начато ещё в начале 20-го века [1,2], однако потом было почти забыто из-за бурного развития ДВС и дешевого в то время топлива. Особенно перспективно применение экологически чистых маховичных двигателей в городском и пригородном транспорте, когда на конечных остановках можно делать «раскруточные» станции для пополнения запаса кинетической энергии. Задачей работы является разработка схемы мобильной машины с маховичным двигателем для эксплуатации в городских условиях.

Общая схема трансмиссии предлагаемого автомобиля с маховичным двигателем приведена на рисунке 1. Быстровращаю-

шийся маховик 1 помещен в вакуум герметичного кожуха для снижения вентиляционных потерь. Кожух крепится к корпусу автомобиля при помощи карданных подвесов 3 для компенсации гироскопических моментов, возникающих при подъемах или спусках, а также при поперечном крене. Вращение из герметичного корпуса передается с помощью быстроходной волновой передачи 2, использующей генератор волн специальной конструкции, описанный в литературе [3]. Далее вращение через муфту сцепления 4 (механическое однодисковое сцепление) передается на коническую передачу 5, которая используется для изменения направления потока мощности, поворачивая его на  $90^\circ$  относительно вертикальной оси маховика. Далее следует двухступенчатый клиноременной вариатор 6. Первая ступень автоматическая и предназначена для компенсации уменьшения скорости вращения маховика. Вторая ступень регулируется педалью, на которую воздействует водитель, и служит для разгона автомобиля. После вариатора крутящий момент через карданную передачу 7 и дифференциал 8 передается на колеса автомобиля 9.

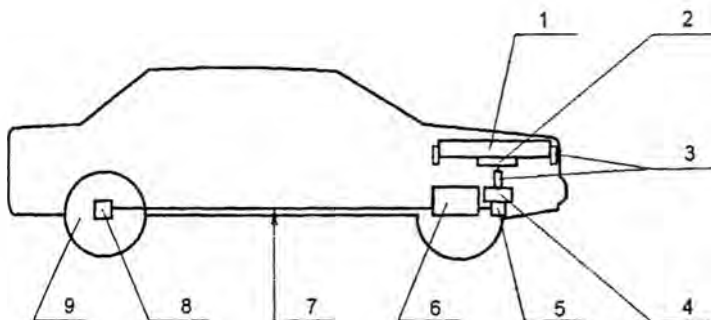


Рисунок 1. Схема автомобиля с маховичным двигателем

Силовой агрегат в виде быстровращающегося маховика, используемый в качестве автомобильного двигателя, не только не уступает ДВС по энергетическим и массогабаритным характеристикам, но и обладает огромными потенциальными возмож-

ностями. Перечислим некоторые из них: маховик способен выделять огромную удельную мощность, а срок зарядки может быть сколь угодно мал; накапливается и выделяется именно механическая энергия вращения, что существенно увеличивает КПД; срок консервации достаточно велик – более месяца; возможность рекуперации энергии, рассеиваемой в тормозах; маховик чрезвычайно долговечен и полностью экологически безопасен; способен стабилизировать корпус кузова. Недостатки быстровращающихся маховиков, как низкая удельная энергоемкость и опасность разрыва, тормозили их применение. Современное же развитие науки и техники подготовило хорошую почву для радикального увеличения полезных свойств маховика, ставшего вполне конкурентоспособным с другими энергоаккумуляторами, а по ряду показателей и превышающих их.

Для того, чтобы показать возможность применения маховика в качестве двигателя, приведем следующий пример. Для этого определим параметры используемого автомобиля: 1) масса автомобиля (с маховиком)  $m=1220$  кг; 2) скорость движения (для использования в городе)  $V_a=60$  км/ч; 3) расстояние, преодолеваемое при полной зарядке маховика  $L=100$  км; 4) количество остановок  $n=20$ ; 5) габаритные размеры автомобиля: длина  $L=4,4$  м, ширина  $B=1,6$  м, высота  $H=1,4$  м; 6) радиус колес  $r_k=0,31$  м; 7) плотность стеклопластика  $\rho = 2600$  кг/м<sup>3</sup>; 8) допускаемые напряжения стеклопластика  $\sigma = 5 \cdot 10^5$  кН/м<sup>2</sup>; 9) дорожный просвет  $h=0,31$  м. В результате расчета получаем, что маховик массой 114 кг, радиусом 0,5 м, который вращается со скоростью 15459 об/мин, запасает энергию, достаточную для движения легкового автомобиля на расстоянии свыше 100 км с 20 остановками и разгонами.

### Литература

1. Гулиа, Н. В. Маховичные двигатели / Н. В. Гулиа. – М: Машиностроение, 1976.– 176 с.
2. Джента, Дж. Накопление кинетической энергии: теория и практика современных маховичных систем / Дж. Джента. – М., 1980. – 470 с.
3. Непомнящих, Г. Е. Дисковые генераторы быстроходных волновых передач / Г. Е. Непомнящих, В. Н. Татищев // Волновые передачи; под ред. Н. И. Цейтлина, В. Н. Татищева. – М., 1975. – с. 187–198.

УДК 621.01

**Особенности курсового проектирования  
по теории механизмов и машин для специальностей  
«Техническая эксплуатация автомобилей» и «Автосервис»**

**Анципорович П. П., Авсиевич А. М.**

**Белорусский национальный технический университет**

Теория механизмов и машин (ТММ) является одной из основных общепрофессиональных дисциплин, необходимых для подготовки инженеров широкого профиля, сочетающих глубокие фундаментальные знания с объективной практической подготовкой. Знания и умения, полученные при изучении дисциплины ТММ, необходимы при освоении последующих специальных дисциплин, связанных с проектированием и расчетом машин, механизмов, их деталей и узлов. В соответствии с типовой программой, в результате изучения дисциплины студент должен иметь навыки составления расчетных схем машин и механизмов для решения различных технических задач, владеть методиками выполнения кинематических и динамических расчетов, в том числе с применением ЭВМ, уметь применять их результаты для получения оптимальных характеристик механизмов и машин. Итогом изучения дисциплины ТММ является курсовое проектирование, в процессе которого полученные знания и навыки должны быть закреплены.

Специфика специальностей «Техническая эксплуатация автомобилей» и «Автосервис», которую необходимо учесть при организации обучения ТММ, заключается в освоении студентами принципов функционирования, рациональной эксплуатации и ремонта автомобиля – сложного машинного агрегата с широким диапазоном режимов работы, включающего в себя согласованно работающие отдельные механизмы различного строения. Это предполагает необходимость освоения синтеза и анализа различных механизмов, осознание взаимосвязи производимых в ТММ расчетов с последующими этапами их конструирования. Поэтому при разработке заданий на курсовой проект или работу следует стремиться к сохранению комплексного подхода к проектированию и исследованию машинного агрегата как системы механизмов. Соблюдение данного требования затрудняется в условиях имеющего место в настоящее время сокращения объ-



емов курсового проектирования. Ранее студенты всех механических специальностей выполняли курсовой проект, состоящий из четырех разделов: динамики машинного агрегата, динамического анализа рычажного механизма, синтеза кулачкового механизма и синтеза системы управления машин-автоматов. С переходом на данных специальностях от проекта к курсовой работе встала задача сохранения комплексного подхода к проектированию при снижении объема работы.

В автомобильной технике широко применяются рычажные кривошипно-ползунные и кулачковые механизмы двигателей внутреннего сгорания, передаточные зубчатые механизмы. Учитывая, что вопросам динамики машинного агрегата в целом, синтезу зубчатых зацеплений и кинематике зубчатых механизмов посвящен значительный объем практических и лабораторных занятий в первом семестре изучения предмета ТММ, на курсовое проектирование вынесены вопросы кинематического и силового анализа рычажных механизмов, а также синтеза кулачковых механизмов.

В качестве исходных данных для работы подобраны различные по компоновке схемы кривошипно-ползунных механизмов с двумя шатунно-поршневыми группами и кулачковых механизмов, соответствующие используемым в автомобильной технике – от малолитражных до большегрузных машин.

Курсовая работа состоит из разделов: «Динамический анализ рычажного механизма ДВС» и «Синтез кулачкового механизма газораспределения», каждому из которых соответствует графическая часть формата А1. При рассмотрении рычажного механизма последовательно производятся структурный и кинематический анализ, силовой расчет. В процессе расчетов студент уясняет взаимосвязь разделов курса теории механизмов и машин, приобретает навыки решения комплексной инженерной задачи, которая по своему содержанию соответствует разработке технического задания на проектирование в условиях подготовки производства реальных машин. Делается акцент на том, что результаты силового расчета являются исходными данными для прочностного расчета элементов и разработки конструкторской документации на изделие. Синтез кулачкового механизма включает в себя определение кинематических характеристик движения выходного звена, расчет основных размеров и по-

строения профиля кулачка для механизма с поступательно движущимся роликовым или плоским толкателем в зависимости от варианта задания.

Рекомендуется применять графические методы расчетов, отличающиеся наглядностью и позволяющие студентам глубже усвоить теоретические основы проектирования. Лист, посвященный анализу рычажного механизма, содержит план скоростей, ускорений и планы сил групп Ассура и начального звена механизма. Второй лист включает построение графиков кинематических характеристик толкателя, диаграмму графического определения основных размеров и построение центрального и действительного профилей кулачка методом обращенного движения.

Для облегчения выполнения курсовой работы разработано учебно-методическое пособие, включающее в себя задания на курсовую работу и методические указания по ее выполнению. Отдельные главы пособия построены в виде примеров выполнения разделов работы. Они содержат постановку задач, описание последовательности и методик проектирования, что позволяет четко определить место всех расчетов в общей схеме исследования.

Успевающие студенты имеют возможность по их желанию выполнить расчеты аналитическими методами. Поощряется самостоятельное составление соответствующих алгоритмов и разработка программ с использованием различных языков программирования или прикладных программных пакетов. При этом проводится сопоставление результатов расчетов графическим и аналитическим методом. Для проектирования кулачкового механизма студенты могут использовать разработанный на кафедре программно-методический комплекс "Синтез кулачковых механизмов", включающий в себя компьютерную программу и методические указания по курсовому проектированию.

Таким образом, организация курсового проектирования для специальностей «Техническая эксплуатация автомобилей» и «Автосервис» позволила обеспечить комплексный подход к исследованию машинного агрегата, возможность самостоятельно творческого решения инженерных задач при успешном освоении методик проектирования.

УДК 531.8(085.8):621.01(076.5)

**Применение лабораторной установки ТММ-46  
для определения жесткостных и диссипативных параметров  
упругих элементов машин**

Астахов Э. И., Косинский А. С., Кудин В. В.  
Белорусский национальный технический университет

Лабораторная установка ТММ-46, описанная в [1] и поставленная во многие вузы СССР (в том числе и Беларуси), предназначена для экспериментального определения приведённого момента инерции рычажного механизма методом резонансных колебаний. Задачей работы является разработка методики определения на этой установке коэффициента жёсткости и коэффициента сопротивления упругих элементов машин, например, цилиндрических пружин по идеям работы [2].

Лабораторная установка ТММ-46 (рис. 1) содержит модель кривошипно-ползунного механизма 1,2, 3, кривошип 1 которого с диском 6 выставляется по угловой шкале 5 на угол  $\varphi$  и соединяется жёстко фиксатором 7 с качающимся рычагом 4, имеющим добавочный груз 9, устанавливаемый на линейной шкале 8. Установка имеет три важных узла для исследования механических колебаний.

Во-первых, узел упругой системы, состоящий из качающегося рычага 4, закреплённого левым концом шарнирно в корпусе, а правым концом соединённого упруго пружинами с корпусом 12.

Во-вторых, узел вибровозбудителя из регулируемого электродвигателя 14 постоянного тока, эксцентрикового привода 16, передающего вынужденные колебания через пружины на правый конец рычага 4 в точку П.

В-третьих, измеритель частоты вынужденных колебаний, состоящий из тахогенератора 16 на выходе электродвигателя, и микроамперметра 13, ток которого по тарифовочной таблице позволяет определить частоту  $N$  вращения электродвигателя и цикловую частоту  $f$  (Гц) вынужденных колебаний и угловую частоту  $p=2\Pi f$  (рад/с).

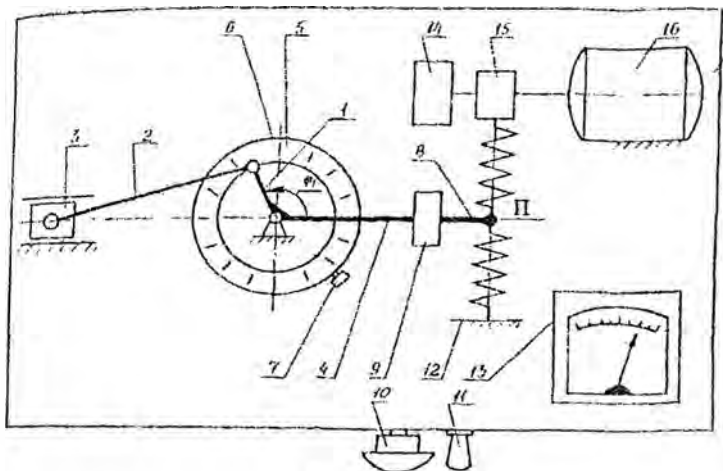


Рисунок 1

Для определения коэффициентов жёсткости и сопротивления в установке ТММ-46 сделаны следующие изменения. Добавлен измеритель 18 (рис. 2) амплитуды  $A_1$  колебаний качающегося рычага 1, выполненный в виде стрелочного индикатора КИ-1, закреплённого на корпусе установки, шток которого контактирует с измерительной пластиной на добавочном грузе 9 рычага. Испытываемые пружины 20 закрепляются в зажимах 21. По заранее найденным массам и моментам инерции звеньев механизма 1,2,3 при  $\varphi=0$  (рис. 1) и рычага с добавочным грузом рассчитывается и задаётся таблицей значений приведённая масса  $m_n$  в точке  $П$  крепления пружин к качающемуся рычагу (рис. 2). В режиме резонансных колебаний, когда совпадают угловые частоты  $p_p$  вынужденных и  $k$  собственных колебаний, замеряются значения  $p_p$  и по индикатору 18 амплитуда  $A_p$  вынужденных колебаний. При гармонической возмущающей силе

$$F(t)=F_0\cos(pt),$$

где  $F_0$  – амплитуда возмущающей силы, определяемая радиусом к эксцентрика 6 (рис. 2),  $F_0=c_n \cdot r$ ;

$C_n$  – приведённый коэффициент жёсткости двух пружин.

Из дифференциального уравнения вынужденных колебаний массы  $m_n$  при режиме резонанса, когда  $p_p \approx k$ , получены выражения для расчёта приведённого коэффициента жёсткости двух пружин  $c_n = m_n \cdot p_p^2$ ; и приведённого коэффициента демпфирования  $n_n = r \cdot p_p / A_p$ ; и далее приведённого коэффициента сопротивления

$$B_n = 2n_n \cdot m_n.$$

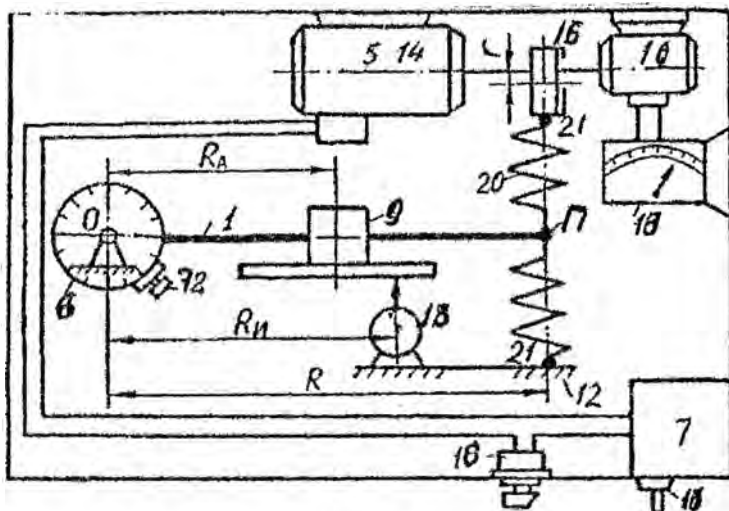


Рисунок 2

### Литература

1. Юденич, В. В. Технические средства обучения и типовое оборудование для вузов и сузов / В. В. Юденич, А. В. Бушует, В. И. Бабий. – М.: Высшая школа, 1974. – 264 с.
2. Астахов, Э. И. Комплекс лабораторных работ по колебаниям машин на установке ТММ-46 / Э. И. Астахов, В. В. Кудин, А. С. Косинский // Машиностроение, 2005. – Вып.21. – Т. 2. – С. 36–40.

# Гидропневмоавтоматика

УДК 629.114

## Обоснование диагностических параметров и алгоритма встроенного диагностирования гидрораспределителей с использованием метода Байеса

Жилевич М. И.

Белорусский национальный технический университет

Для повышения эффективности гидронасыщенных машин, выполняющих ответственные транспортные операции и работающих практически в непрерывном цикле или вахтовым методом, большое значение имеет уменьшение времени простоев. Решить эту задачу можно, в частности, путем снижения времени и затрат на поиск неисправностей (ПН) и их устранение.

На основе измерений параметров функционирования гидропривода (ГП) в различных контрольных могут быть получены логические схемы ПН. Обработку и анализ информации по разработанным алгоритмам можно возложить на бортовой микропроцессор встроенной системы диагностирования. Логическая структура диагностической модели ГП определяется состоянием гидрораспределителей (ГР), задающих режим функционирования ГП (по данным [1] отказы ГР составляют 20% общих отказов ГП). Одно и то же сочетание значений выходных параметров может соответствовать как исправному, так и неисправному техническому состоянию (ТС) ГП в зависимости от положения рабочего органа ГР. Поэтому в процессе синтеза алгоритмов ПН ГР важно предусмотреть возможность автоматического распознавать заданный оператором режим работы ГП.

Задача ПН заключается в постановке соответствия между комбинациями значений диагностических параметров  $K = \{k_j, j = 1..j_{max}\}$  и ТС объекта  $D_T = \{D_{T^i}, i = 1..i_{max}\}$ , причем количество распознаваемых ТС должно максимально приближаться к перечню возможных неисправностей.

Метод Байеса [2] применяют, как правило, в статистической диагностике, однако детерминистские методы с учётом ряда допущений можно рассматривать как частный случай статистических. Поэтому для обоснования схем ПН ГР на предваритель-

ном этапе воспользуемся формулой Байеса, а для их совершенствования - логическими методами анализа структуры объекта диагностирования. Если ГР находится в одном из  $N$  случайных ТС  $D_i$ , и известны признаки  $k_j$ , каждый из которых с определенной вероятностью характеризует ТС ГР, то вероятность того, что выбранная реализация  $K^*$  признаков  $k_j$  соответствует одному из диагнозов  $D_i$ , определяется по формуле Байеса:

$$P(D_i / K^*) = P(D_i) P(K^* / D_i) / \sum_{i=1}^N P(D_i) P(K^* / D_i),$$

где  $P(D_i / K^*)$  - вероятность  $D_i$ , после того, как стали известны результаты обследования по комплексу признаков  $K$ ;  $P(D_i)$  - априорная вероятность  $D_i$ ;  $P(K^* / D_i)$  - вероятность появления реализации  $K^*$  у объектов с  $D_i$ . Решение о диагнозе  $D_i$  принимается, если  $P(D_i / K^*) > P_d$ , где  $P_d$  - пороговое значение (0,8...0,9).

Основная функция ГР – отслеживать команды и в соответствии с ними направлять поток рабочей жидкости (РЖ), поэтому на предварительном этапе в качестве диагностических параметров выбраны сигнал управления (на электромагнитах, давление в торцовой полости золотника, положение рукоятки) и параметры потока РЖ (расход или давление) в выходных гидролиниях. Выбор в пользу расхода ограничен техническими возможностями измерения больших расходов РЖ. Кроме того, при завершении операции, когда поршень гидроцилиндра упирается в ограничитель, расход становится равным нулю при включенном ГР, что вносит дополнительные трудности в распознавание ТС в автоматическом режиме. Поэтому предпочтение отдано давлению, а диагностическим признаком может быть превышение некоторого его порогового значения, соответствующего, например, выполнению операции без нагрузки.

Перечень распознаваемых диагнозов, диагностические параметры и их вероятности заносятся в диагностическую матрицу (таблица 1, в исходную матрицу признак  $k_3$  не входит). Так как распознавание производится в условиях отсутствия статистической информации, будем считать диагнозы равновероятными. Если вероятность проявления признака при установлении диагноза не является однозначной (0 или 1), примем ее равной 0,5 (максимальная неопределенность).

Таблица 1 – Диагностическая матрица

Номер	Диагноз $D_i$ Наименование	Вероятность признаков $k_i$			Вероятность диагноза $P(D_i)$
		$k_1 (X_{от})$ Сигнал управления	$k_2 (X_{выс})$ Выходной сигнал (характеристика потока жидкости)	$k_3 (X_{дп})$ Датчик положения	
		$P(k_1/D_i)$	$P(k_2/D_i)$	$P(k_3/D_i)$	
$D_1$	Исправен	0,5	0,5	0,5	0,25
$D_2$	Заклинил (отказ электромагнита)	1	0	0	0,25
$D_3$	Утечки через распределитель	0	1	0	0,25
$D_4$	Поломка возвратных пружин	0	1	1	0,25

Результаты расчетов представлены в таблице 2. Для исходной диагностической матрицы при  $P_{д}=0,8...0,9$ , можно распознать лишь диагнозы  $D_1$  и  $D_2$ , а также и сделать предположение об одном из диагнозов  $D_3$  или  $D_4$  (совместная вероятность 0,9). Для увеличения глубины поиска в систему признаков вводится сигнал с датчика конечного положения золотника ГР. Расчет по дополненной матрице показывает (см. таблицу 2), что введенный признак позволяет разделить все диагнозы. Так как включенная позиции ГР распознается двумя способами: с помощью датчика и по давлению на выходе, базовый алгоритм становится более гибким, его можно корректировать с учетом конструктивных особенностей и контролепригодности конкретного типа ГР.

Таблица 2 - Решение о диагнозе

Реализация комплекса признаков $K^*$ (1 – есть; 0 – нет)			Вероятность диагноза при данной реализации комплекса признаков $P(D_i/K^*)$			
$k_1$	$k_2$	$k_3$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$
Расчет по исходной диагностической матрице						
0	0		1	0	0	0
0	1		0,1	0	0,45	0,45
1	0		0,2	0,8	0	0
1	1		1	0	0	0
Расчет по дополненной диагностической матрице						
0	0	0	1	0	0	0
1	1	0	1	0	0	0
1	0	1	1	0	0	0
0	1	1	0,1	0	0	0,9
1	0	0	0,1	0,9	0	0
0	0	1	1	0	0	0
0	1	1	0,1	0	0,9	0
1	1	1	1	0	0	0



Анализируя сочетания  $k_1 k_2 \overline{k_3}$  и  $\overline{k_1} k_2 k_3$ , соответствующие исправному ГР, можно предположить о неисправности датчиков положения. Комбинация  $k_1 \overline{k_2} k_3$  также соответствует  $D_1$ , что возможно, например, при неработающем насосе. Воспользовавшись дополнительно угловой скоростью  $\omega$  ротора насоса (включен-выключен), можно разделить ТС  $D_1$  и возможную разгерметизацию контура (ТС насоса оценивается отдельно).

По результатам анализа расчетов составлена таблица функций неисправностей (таблица 3). Такая таблица удобна для представления алгоритма в словесной форме, например, в инструкции по эксплуатации, когда последовательно анализируются все представленные в ней сочетания признаков.

Таблица 3 - Таблица функций неисправностей распределителя

$X_{сг}$	$X_{вых}$	$X_{пр}$	$\omega > \omega_0$	Диагноз	
0	1	1	-	$D_{p1}$	Утечки в распределителе (нарушение сопряжений)
0	1	0	-	$D_{p2}$	Излом или ослабление возвратных пружин
0	0	1	-	$D_{p3}$	Неисправен или разрегулирован датчик положения
1	1	0	-	$D_{p3}$	Неисправен или разрегулирован датчик положения
1	0	0	-	$D_{p5}$	Заклинил золотник (отказ эл/магнита, засорен дренаж)
1	0	1	1	$D_{p4}$	Негерметичность контура (или исправен насос)

\*Примечание - С учетом характеристик переходного процесса

Для автоматического ПН разработан условный алгоритм. Количество и последовательность проверок определяются результатом выполнения предшествующего условия. В автоматическом режиме переходные процессы в ГП могут стать причиной ошибочных диагнозов. Например, после регистрации сигнала на включение ГР при высокой частоте квантования «мгновенно» фиксируется отсутствие сигнала с датчика нового положения золотника, давления на выходе не успевает нарасти, «статический» алгоритм делает ложный вывод о неисправности. Это обуславливает необходимость ввода в алгоритм выдержки времени на завершение переходного процесса перед выдачей аварийного сообщения. Время выдержки можно оценить экспериментально или по результатам динамического расчета ГП.

1. Сырицын, Т. А. Эксплуатация и надежность гидро- и пневмоприводов / Т. А. Сырицын. – М.: Машиностроение, 1990. – 248 с.
2. Биргер, И.А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

# Горные машины

УДК 634.0.31

## К методике расчетно-теоретического исследования рубильной машины

Таяновский Г. А., Хамицевич М. В.

Белорусский национальный технический университет

Задача максимального использования внутренних ресурсов для ослабления зависимости от внешних закупок энергоносителей решается по многим направлениям, в частности, путем использования на топливо больших объемов древесных лесосечных и промышленных отходов.

Древесные отходы представляют собой сучья, лапы, тонкомер, верхушки деревьев после раскряжевки и обрубки сучьев, а также обрезки после распиловки сортиментов на доску или брус. Отходы неоднородны по размерам, использование их на топливо без измельчения затруднительно. Для этого за рубежом широко используют рубильные машины.

Создание отечественных импортзамещающих рубильных машин потребовало исследования и выбора общих технических компоновочных решений и их рациональных параметров, обеспечивающих конкурентоспособность машин. Прочностные расчеты элементов приводов рубильных машин должны вестись с учетом уровня их динамической нагруженности.

Авторами разработана методика исследования на ЭВМ динамической модели рубильной машины, которая позволяет определить выходные показатели машины, динамические нагрузки на элементы привода, параметры собственных и вынужденных колебаний в зависимости от ее конструктивных и режимных параметров. На основе результатов исследования производится выбор их рациональных значений.

Разработка методики расчетно-теоретического исследования нагруженности приводов рубильной машины включала следующие этапы:

- составление расчетной динамической схемы приводов и рабочего органа рубильной машины с сосредоточенными массами;

- установление места приложения внешних воздействий на элементы динамической системы рубильной машины, математическое описание внешних воздействий на систему;
- описание движения динамической системы дифференциальными уравнениями, которые позволяют: рассчитать динамические нагрузки в приводах и параметры колебаний, выявить при исследовании на ПЭВМ резонансные области при колебательных процессах, определить наиболее нагруженные звенья в динамической системе.

Динамическая система рубильной машины с барабанным режущим органом (см. рис. 1) включает несколько силовых контуров: привод режущего барабана; привод подающего вальца; привод пластинчатого конвейера; привод метателя; привод манипулятора; привод аутригеров; привод тормозов.

Значительные максимальные динамические нагрузки характерны только для первых трех контуров, взаимодействующих с исходным древесным материалом. При проектом выборе параметров двигателя, элементов этих приводов необходимо учитывать уровень их динамической нагруженности.

Рабочий процесс рубильной машины состоит из повторяющихся неустановившихся процессов набора пачки древесной нерубленой массы гидроманипулятором, загрузки ее в приемный патрон или приемный порт машины с участием подающих рабочих органов, измельчения ножевым режущим барабаном, загрузки просеянной щепы метателем в кузов прицепа или бункер-накопитель.

На схеме динамической системы рубильной машины обозначено (см. рис. 1):  $\dot{I}\ddot{\alpha}(w, h)$  – момент двигателя, зависящий от угловой скорости и положения рейки топливного насоса;  $I_d, I_c, I_{m1}, I_{m2}, I_\psi, I_p, I_k, I_v$  – моменты инерции, приведенные к валу двигателя, соответственно: двигателя с ведущими частями муфты сцепления, ведомой части муфты сцепления, ведущего шкива клиноременной передачи; ротора метателя, режущего ротора, приемного конвейера, прижимного вальца;  $M_{H1}$  – крутящий момент сопротивления, создаваемый насосом привода гидроманипулятора;  $M_c(t)$  – момент трения в муфте сцепления;  $M_{pn}$  – момент трения в контакте клиновых ремней

со шкивом;  $M_{\omega}$  – момент сопротивления вращению ротора двигателя;  $M_p$  – момент сопротивления резанию, приложенный к режущему ротору;

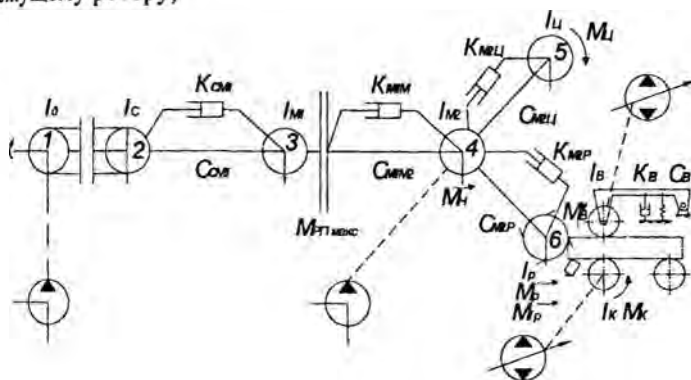


Рисунок 1 – Расчетная динамическая система рубильной машины

$M_B, M_k$  – крутящий момент, развиваемый соответственно, вальцом и приемным конвейером;  $m_6$  – масса измельчаемой древесины;  $C_{ij}$  – приведенные к валу двигателя жесткости частей привода между соответствующими сосредоточенными массами динамической системы;  $K_{ij}$  – приведенные к валу двигателя коэффициенты неупругого сопротивления относительно поворота масс динамической системы при колебаниях;  $K_B, C_B$  – коэффициент неупругого сопротивления и жесткость подвески прижимного подающего вальца.

Схема динамического взаимодействия с измельчаемой древесиной трех контуров привода: режущего и подающего рабочих органов учитывает горизонтальную реакцию со стороны барабана на пачку материала, продольную и поперечную жесткости последнего, кинематическую координату его переменной толщины, расстояние от оси качания рычага с прижимным вальцом до оси его вращения и до мест крепления амортизатора и прижимной пружины растяжения.

## Оценка параметров перерабатывающего органа формирующего агрегата

Ромашко Ю. В.

Белорусский национальный технический университет

Шнековые пресса благодаря ряду преимуществ нашли широкое применение в качестве прессующих механизмов во многих технологических процессах, когда требуется непрерывная подача пластичных материалов под давлением. В том числе они используются в качестве перерабатывающе-нагнетающего органа в фрезформовочных агрегатах для добычи кускового торфа. Для повышения эффективности и предотвращения вращения материала со шнеком используют различные конструктивные элементы, к которым можно отнести рифленую внутреннюю поверхность корпуса пресса, неподвижно закрепленные конгрножи, различного рода очищающие скребки и т.д. Однако влияние геометрических параметров данных конструктивных элементов устанавливается только экспериментальным путем, поэтому представляет научный и практический интерес определение теоретических зависимостей.

Для оценки геометрических параметров рифовых выступов шнекового пресса была рассмотрена следующая расчетная схема. Из объема витка шнека выделен элементарный объем, ограниченный рабочей и пассивной поверхностями витка, двумя положениями плоскости, перпендикулярной рабочей грани витка (второе положение определяется ее поворотом вокруг оси шнека относительно первого на угол  $d\beta$ ), внутренней поверхностью кожуха шнека и вала шнека.

Исследования проводились с применением математического аппарата винтового исчисления, согласно которому выделенный объем материала находится под действием некоторого силового винта. Для решения поставленной задачи определены силы и силовой винт через его мотор в точке  $O$  начала координат. Мотор винта получен в проекциях на оси координат путем приведения к началу координат системы сил, действующих на выделенный элементарный объем материала. Из винтового исчисления известно, что сумма моторов сил относительно произвольной точки приведения однозначно определяет мотор данного

силового винта относительно той же точки независимо от пространственного положения последней. Следовательно, просуммировав моторы сил, действующих на выделенный элементарный объем материала, получим мотор силового винта, приведенный к началу координат через его проекции на оси координат:

$$\left\{ \begin{aligned} dM_z &= dF_1 \sin\gamma - dF_2 \sin\gamma - 2dF_3 \sin\gamma + dF_{5,4} \sin\gamma + dF_{7,6} \sin\gamma + dF_8 \sin\gamma + a[dF_{2,r} \cos\gamma - dF_1 R \cos\gamma + \\ &\quad + dF_3(R+r) \cos\gamma + \frac{dF_{5,4}(R+r) \cos\gamma}{2} - dF_{7,6}(R-a/2) + dF_8(R-a) \cos\gamma]; \\ dM_y &= dF_2 \cos\gamma - dF_1 \cos\gamma + 2dF_3 \cos\gamma + dF_{5,4} \cos\gamma - dF_{7,6} \cos\gamma - dF_8 \cos\gamma - \\ &\quad - a[dF_{2,r} \sin\gamma - dF_1 R \sin\gamma + dF_3(R+r) \sin\gamma + \frac{dF_{5,4}(R+r) \sin\gamma}{2} - dF_{7,6}(R-a/2) \sin\gamma - dF_8(R-a) \sin\gamma], \end{aligned} \right.$$

где  $dF_i$  – силы, действующие на выделенный объем материала;  $dM_z$ ,  $dM_y$  – проекции мотора силового винта на оси координат;  $\omega$  – множитель Клиффорда, обладающий свойством  $\omega^2 = 0$ ;  $R$ ,  $r$ ,  $\gamma$ ,  $a$  – геометрические размеры шнекового пресса.

Приведенная система уравнений представляет собой зависимость значения и положения в пространстве силового винта, действующего на выделенный элементарный объем материала, от геометрических размеров шнека и рифовых выступов, возникающих при движении материала сил, а также от свойств последнего. В систему входит также угол  $d\beta$  поворота элементарного объема при перемещении его в винтовом канале. Этот угол можно представить в виде двух составляющих: угла  $d\beta_1$  образуемого при вращении объема вокруг оси шнека и  $d\beta^0$  – при поступательном движении вдоль оси. Иными словами угол  $d\beta$  представляет собой кинематический винт движения материала в винтовом канале шнека и его можно записать в виде комплексного вектора, что позволит преобразовать полученную систему уравнений в винтовой форме к виду дифференциального уравнения.

Таким образом, выполнив необходимые преобразования и решая полученное дифференциальное уравнение с помощью приближенных методов, можно определить зависимость развиваемого нормального давления от геометрических параметров шнекового пресса или решать задачи оптимизации.

УДК 629.114.2

**Оценка нагрузочных режимов колесной машины  
для уборки фрезерного торфа**

Басалай Г. А.

Белорусский национальный технический университет

Уборка фрезерного торфа из валков и доставка к месту складирования осуществляется машинами типа УМПФ [1]. Рабочий орган этих машин представляет сочетание скрепера и ковшового элеватора. Методика определения затрат мощности при рабочем проходе агрегата и во время выгрузки торфа из бункера вдоль штабеля изложена в литературе [2, 3].

Недостатком конструктивной схемы данных машин является то, что элеватор, вычерпывающий ковшами торф из скрепера, транспортирует его на максимальную высоту и выгружает в бункер сверху, а длинный выгрузной конвейер, из-за широкой колеи гусеничного движителя, создает значительные перегрузки в трансмиссии при трогании с места под действием вертикальной нагрузки от массы материала в бункере, а также требует подводить большой крутящий момент при выгрузке торфа.

Задача, решаемая изобретением [4], состоит в уменьшении металлоемкости машины для уборки фрезерного торфа, а также снижении энергозатрат на выполнение технологической операции. Это достигается тем, что в машине, схема которой представлена на рисунке 1 и включающей переднюю 1 и заднюю 2 оси колесного движителя, раму 3 с прицепным устройством 4, скрепер 5 с загрузочным конвейером 6 и желобом 7, бункер 8 с выгрузным люком 9, выгрузной конвейер 10, расположенный поперечно в днище бункера, и привод 11 рабочих органов, скрепер 5 и загрузочный конвейер 6 установлены спереди между бункером 8 и прицепным устройством 4. Загрузочный конвейер 6 выполнен в виде наклонного скребкового конвейера с нижней рабочей ветвью, днище желоба 7 которого расположено между скрепером и передней стенкой бункера. Нижняя часть бункера выполнена в виде четырехгранной усеченной опрокинутой пирамиды. Колея колес передней оси 1 в 2-3 раза больше колеи

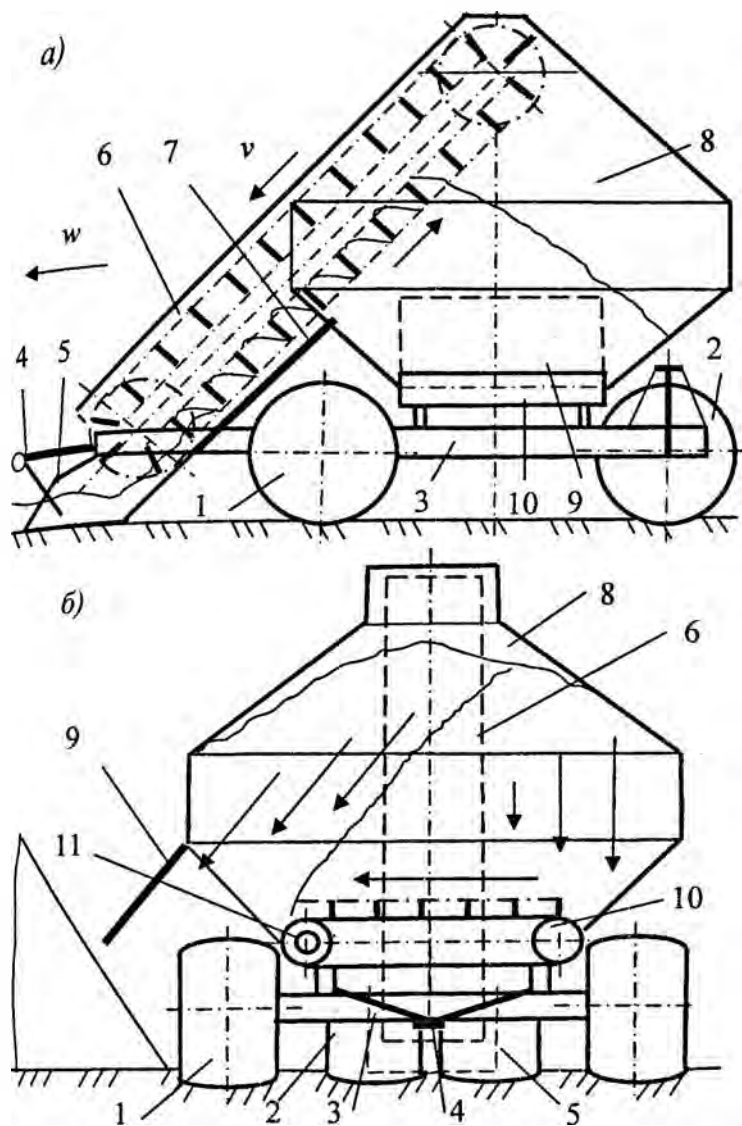


Рис. 1. Колесная машина для уборки фрезерного торфа с передним расположением скрепера и грузозачного конвейера



колес задней оси 2. Поперечный габарит конвейера 10 у выгрузного люка 9 находится на уровне колеи передней оси 1.

Фрезерный торф, сгребаемый из валков скрепером 5, непрерывно вычерпывается из него и транспортируется по желобу 7 скребковым конвейером 6 с последующим ссыпанием в бункер 8. Доставленный к месту складирования торф из бункера 8 выгружается через люк 9 конвейером 10 на откос штабеля или в навал у его подножья.

Целью работы является разработка методики оценки нагрузочных режимов колесной машины с передним расположением скрепера для оптимизации основных параметров конструкции на стадии проектирования.

При рабочем проходе машинно-тракторного агрегата (см. рис 1,а) мощность двигателя реализуется

$$N_{yn} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4, \quad (1)$$

где  $N_1$  - мощность на передвижение колесного трактора;

$N_2$  - мощность на передвижение колесной машины в режиме постоянно увеличивающейся массы груза в бункере;

$N_3$  - мощность на передвижение скрепера;

$N_4$  - мощность на работу погрузочного конвейера.

Мощность на передвижение груженой машины

$$N_2 = \frac{\mu(G_n + G_m)w_0}{1000\eta_1}, \text{ кВт}, \quad (2)$$

где  $\mu$  - коэффициент сопротивления передвижению колесного движителя;

$G_n$  - вес порожней машины,  $H$ ;

$G_m = f(S, L)$  - вес торфа в бункере,  $H$ ;

$S$  - площадь поперечного сечения вала,  $m^2$ ;

$L$  - длина рабочего прохода уборочного агрегата по карте,  $m$ ;

$w_0$  - кинематическая скорость трактора,  $m/c$ ;

$\eta_1$  - КПД трансмиссии колесного трактора.

Мощность на передвижение скрепера

$$N_3 = \frac{P_{скр} w_0}{1000\eta_1}, \text{ кВт}, \quad (3)$$

Сопротивление перемещению скрепера

$$P_{скр} = p_0 S + c \rho g V, \text{ Н}, \quad (4)$$

где  $p_0$  - удельное сопротивление при экскавации скрепером торфа из валка, Па ( $p_0=2000-2500$ );

$c$  - коэффициент сопротивления, который зависит от коэффициентов трения торфа о торф и поверхность скребков, а также от отношения продольного размера тела волочения к ширине конвейера,  $c=5-7$ ;

$\rho$  - плотность торфа в скрепере,  $\text{кг/м}^3$ ;

$V$  - объем торфа в скрепере,  $\text{м}^3$ .

Мощность на работу погрузочного скребкового конвейера

$$N_4 = \frac{\rho g Q_X H_{зл}}{1000 \eta_2 \eta_3}, \text{ кВт}, \quad (5)$$

где  $Q_X$  - производительность по ходу машины,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$H_{зл}=f(V_{Т.Б})$  - высота подъема торфа конвейером, является функцией от объема  $V_{Т.Б}$  торфа в бункере по мере движения агрегата по карте,  $\text{м}$ ; предельные значения высоты разгрузки определяются конструкцией движителя и бункера.

$\eta_2, \eta_3$  - КПД погрузочного конвейера и его привода.

При выборе параметров конвейера необходимо соблюдать соотношение  $Q_{ск} \geq Q_X$ , где  $Q_{ск}$  - производительность конвейера.

Здесь

$$Q_X = S w_0 (1 - \varepsilon); \quad (6)$$

$$Q_{зл} = \varphi b h t v, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon$  - буксование ведущих колес трактора;

$\varphi$  - заполнение пространства между скребками ( $\varphi \approx 0.6$ );

$b, h, t$  - ширина, высота и шаг скребков,  $\text{м}$ ;

$v$  - скорость цепи конвейера,  $\text{м/с}$ .

Во время выгрузки торфа из бункера при условии подъема в транспортное положение скрепера и отключении скребкового конвейера потребляемая мощность

$$N_{ус} = N_1 + N_2 + N_3, \quad (8)$$

где  $N_3$  - мощность для работы подвижного дна бункера.

При расчете мощности во время выгрузки торфа (см. рис. 1,б) выделяют три периода: первый - до включения подвижного дна после открытия бокового выгрузного люка, второй и третий

- работа подвижного дна при трогании рабочей ветви скребкового конвейера с места и установившаяся работа.

В первый период выгрузка обеспечивается свободным истечением основного объема груза под действием гравитационных сил благодаря геометрическим параметрам нижней части бункера в виде опрокинутой усеченной пирамиды. С учетом этого нагрузка на подвижное дно 10 определяется остаточным весом  $G_{m0}$  торфа в бункере и его положением относительно люка 9.

При работе скребкового конвейера преодолевается сопротивление между движущимся и неподвижным торфом и днищем бункера.

Сопротивление движению тяговых цепей конвейера при трогании с места  $T_{mp} = T_1 + T_2 + G_c \sin \alpha$ , (9)

где  $T_1$  - сопротивление между движущимся слоем и неподвижным торфом;

$T_2$  - сила трения между торфом и нижним листом;

$G_c$  - вес слоя, увлекаемого скребками;

$\alpha$  - угол поперечного крена машины во время выгрузки;

Составляющая  $T_1 = f_1(G_{m0} - G_c) \cos \alpha$ , Н. (10)

Минимальный вес выгружаемого слоя

$$G_{cmin} = \rho g h_c l b \cos \alpha, \text{ Н.} \quad (11)$$

где  $h_c$  - высота скребка, м;

$l, b$  - длина и ширина бункера понизу или параметры выгрузного конвейера, м.

Составляющая  $T_2 = f_1 G_{m0} \cos \alpha$ , Н. (12)

Затраты мощности при трогании с места

$$N_{mp} = \frac{T_{mp} v_n}{1000 \eta_4 \eta_5}, \text{ кВт.} \quad (13)$$

где  $\eta_4, \eta_5$  - КПД выгрузного конвейера и его привода.

При установившемся движении сопротивление перемещению тяговых цепей

$$T_{y0} = T_{1y} + T_{2y} + G_c \sin \alpha, \quad (14)$$

где  $T_{1y}$  - сопротивление между неподвижным и движущимся слоями торфа;

$T_{2y}$  - сила трения между торфом и днищем бункера.

$$T_{1y} = f_1(G_{m0} - G_c - T' - 2T'') \cos \alpha, \text{ Н}, \quad (15)$$

$$\text{Сила трения} \quad T' = f_1 p F', \text{ Н}, \quad (16)$$

где  $p$  - среднее давление торфа на боковую стенку, Па;

$F' = (H - h_c)b$  - среднее значение площади поверхности задней стенки над увлекаемым слоем,  $\text{м}^2$ .

Считая, что давление торфа на стенку распределяется по закону треугольника, имеем

$$P = \rho g(H - h_c)/2, \text{ Па}. \quad (17)$$

$$\text{Тогда} \quad T' = f_1 \rho g(H - h_c)^2 b/2, \text{ Н}, \quad (18)$$

$$\text{Сила трения} \quad T'' = f_3 p F'', \text{ Н}, \quad (19)$$

где  $F'' = (H - h_c)l$  - площадь соприкосновения опускающегося и зависающего торфа у боковых стенок бункера,  $\text{м}^2$ .

$$\text{Тогда} \quad T'' = f_3 \rho g(H - h_c)^2 l/2, \text{ Н}, \quad (20)$$

$$T_{2y} = f_1(G - T' - 2T'') \cos \alpha, \text{ Н}, \quad (21)$$

Мощность при установившемся движении конвейера

$$N_y = \frac{T_{2y} v_n}{1000 \eta_4 \eta_5}, \text{ кВт}. \quad (22)$$

Таким образом, предложенная методика позволяет определить потребляемую мощность рабочими органами колесной машины с передним расположением скрепера, как в режиме уборки фрезерного торфа, так и при выгрузке его в навалы, что дает возможность на стадии проектирования проводить оптимизацию основных параметров конструкции.

#### Литература

1. Справочник по торфу / Под ред. А.В. Лазарева и С.С. Корчунова. – М.: Недра, 1982. – С. 287–290).
2. Опейко, Ф.А. Торфяные машины. / Ф. А. Опейко. – Минск, Выш. школа, 1968. – С. 333–338.
3. Кислов, Н. В. Машины фрезерного способа добычи торфа / Н. В. Кислов, В. В. Шавель. – Минск: Ротапринт БПИ, 1984. – С. 23-31.
4. Машина для уборки фрезерного торфа: Заявка на изобретение (МПК E21C 49/00)/ Г.А. Басалай; № а20070161 от 16.02.2007.

# Двигателестроение

УДК 621.431.

## Средства обеспечения пуска дизелей при отрицательных температурах

Стефанович В. Р.

Белорусский национальный технический университет

Низкие температуры окружающей среды приводят к повышению вязкости масла, снижению температуры рабочей смеси в конце такта сжатия, что ухудшает пусковые свойства двигателя и увеличивает время подготовки его и систем силовой установки к работе под нагрузкой.

К главным причинам затруднений зимнего запуска относятся: рост крутящего момента сопротивления вращению коленчатого вала двигателя; уменьшение мощности стартера из-за снижения емкости аккумуляторной батареи; меньшая испаряемость топлива и ухудшение смесеобразования; увеличение требуемой пусковой частоты вращения коленчатого вала.

Действие всех этих причин при отрицательной наружной температуре проявляется одновременно, усугубляя и затрудняя весь процесс запуска [1, 4].

В решении задач обеспечения холодного пуска дизелей в условиях отрицательных температур прослеживаются два основных направления. Первое из них связано с обеспечением условий надежного самовоспламенения и сгорания топлива в цилиндрах дизеля, а второе – с повышением скорости вращения коленчатого вала в период прокрутки. Соответственно имеющиеся средства облегчения запуска двигателя при отрицательных температурах разделяются на две группы.

К первой группе относятся: подогрев поступающего воздуха; прогрев камеры сгорания свечами накаливания; повышение степени сжатия при запуске; применение легкоиспаряющихся и легковоспламеняющихся пусковых топлив.

К устройствам второй группы относятся: декомпрессоры; подогреватели воды и масла.

Обеспечение необходимых условий самовоспламенения и сгорания топлива в цилиндрах дизеля достигается следующими

путями: применением пусковых топлив, имеющих низкую температуру самовоспламенения; каталитическим воспламенением топлива; увеличением степени сжатия; принудительным воспламенением топлива; оптимизацией регулировочных параметров двигателя; подогревом впускного воздуха[2].

Для подогрева воздуха, поступающего в двигатель, в дизелях широко используется такое устройство как термостарт, включающий в себя факельную свечу, электромагнитный топливный клапан, добавочный резистор с термореле и переключатель. Топливо проходит по кольцевой полости между нагревательным элементом и трубкой, испаряется и после смешивания с движущимся во впускной трубе воздухом воспламеняется. Образующий факел пламени обеспечивает нагрев воздуха, поступающего в цилиндры.

Увеличение требуемого для запуска крутящего момента при отрицательных температурах можно существенно уменьшить и применяя синтетические и полусинтетические масла. Например, применять масла с низкой вязкостью M-5 /10 или M-5 /12 и аналогичного, с маркировкой SAE 10W-30[3].

В особо жестких условиях эксплуатации дизелей, при температуре ниже  $-35^{\circ}\text{C}$ , даже низкотемпературные свойства стандартных загущенных масел могут оказаться недостаточными. В этом случае целесообразно применять кратковременный подогрев дизеля предпусковым подогревателем [4].

Подогреватели используются для предпускового подогрева силовых установок, длительного их обогрева при неработающем двигателе и для ускорения прогрева двигателя после его запуска.

Время, необходимое на предварительный разогрев дизеля, в зависимости от температуры окружающей среды, размеров двигателя и мощности подогревателя колеблется в пределах 1800 ... 9000 с.

Конструкции котлов-подогревателей, в основном, подобны. Они содержат камеру сгорания, теплообменник, насосный агрегат, электромагнитный топливный клапан (топливный кран), пульт управления.

Принципиальным достоинством систем обогрева с котлами является их автономность, что важно в эксплуатационных ус-

ловиях, так как не требуется специально оборудованных стоянок.

Недостаток существующих индивидуальных подогревателей предпускового разогрева дизелей в условиях низких температур окружающей среды – чрезвычайно слабо прогревают подшипники коленчатого вала, на долю которых при температуре ниже  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  приходится основная часть сопротивления вращению коленчатого вала при пуске. Для интенсификации разогрева подшипников коленчатого вала целесообразно использовать специальный насос для прокачки масла через подшипники. Опыты, проведенные на дизеле Д-160 с предварительной прокачкой масла, показали, что при температуре  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  прокачка масла в течение 1200 с (без разогрева) повышает температуру масла в поддоне до  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в коренных подшипниках до  $4^{\circ}\text{C}$ . Масло из поддона гидронасосом продавливается через дроссель (отверстие диаметра 1 мм.) и затем поступает в основную масляную магистраль дизеля.

С технической точки зрения предпусковой подогрев обеспечивает: легкий и надежный пуск холодного двигателя с 1-2 попыток и сокращение времени прокрутки стартера в несколько раз; сокращение времени прогрева двигателя до  $40^{\circ}\text{C}$  более чем в 4 раза; снижение пускового тока стартера почти до летнего значения; повышение частоты вращения коленвала; снижение расхода топлива на пуск от 1 л/10 км до 0,3 л/10 км; снижение вредных выбросов автомобиля.

Необходимо отметить, что наибольший эффект получается при использовании рассмотренных предпусковых средств в комплексе. Опыт эксплуатации показывает, что, несмотря на тепловую предпусковую подготовку двигателя машин, находящиеся длительное время в условиях низких температур, заводятся с большим трудом даже при  $-20^{\circ}\text{C}$  не говоря уже и о более низких температурах.

Таким образом проблема запуска дизельного двигателя при температурах до  $-40^{\circ}\text{C}$ , несмотря на многочисленные разработки, остаётся и должна быть направлена на поиски решения различных способов прогрева масла в картере двигателя с сохранением мощности АКБ.

## Литература

1. Микулин, Ю.В. Пуск холодных двигателей при низкой температуре / Ю. В. Микулин, В. В. Карницкий, Б. А. Энглин. – М.: «Машиностроение», 1971. – С 62-73
2. Найман, В.С. Все о предпусковых обогревателях и отопителях / В. С. Найман. – Москва: Астрель, 2007. – 160 с.
3. Двигатели внутреннего сгорания: учеб. пособие для вузов / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров и [др.]; под общ. ред // издание второе, переработанное. – М.: «Высшая школа», 2005. – С. 382 – 385.

УДК 621.436

### Методы снижения эмиссии вредных веществ в отработавших газах дизельных двигателей

Кухаренок Г. М., Зеленков А. А.

Белорусский национальный технический университет

Неуклонное увеличение потребления топлива на транспорте приводит к росту объема поступающих в атмосферу вредных веществ. Транспорт представляет собой источник значительных выбросов в атмосферу твердых частиц, оксидов азота  $\text{NO}_x$ , оксидов углерода  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ .

Снижения уровня выбросов токсических веществ с отработавшими газами двигателей можно достичь: воздействием на рабочий процесс (уменьшение образования этих веществ в процессе сгорания), оборудованием двигателя системами нейтрализации выпускных газов, применением топлив, продукты сгорания которых содержат меньше токсичных компонентов.

Для очистки ОГ от твердых частиц применяется фильтр твердых частиц – сажевый фильтр. Регенерация сажевого фильтра осуществляется при повышении температуры отработавших газов (до  $600 \dots 650^\circ\text{C}$ ) за счет периодического впрыскивания топлива в зону реакции. При наличии системы регенерации фильтр твердых частиц присоединяется к окислительному нейтрализатору, который окисляет содержащийся в отработавших газах оксид азота  $\text{NO}$  в диоксид азота  $\text{NO}_2$ .

Для дожигания продуктов неполного сгорания топлива –  $\text{CH}$  и  $\text{CO}$  – применяют термические и каталитические нейтрализа-



торы. Термический нейтрализатор применяется в двигателях с принудительным воспламенением и представляет собой камеру сгорания, размещенную в выпускной системе двигателя. Реакции окисления CO и CH протекают достаточно быстро при температуре свыше  $830^{\circ}\text{C}$  и при наличии в зоне реакции несвязанного кислорода. Термические нейтрализаторы недостаточно эффективны на режимах холостого хода и малых нагрузок, вследствие низкой температуры отработавших газов. Применение в окислительных нейтрализаторах катализатора в виде благородных металлов (платины, палладия, родия) обеспечивает достаточно высокую скорость окисления CO и CH при сравнительно невысоких температурах ( $300 - 400^{\circ}\text{C}$ ) и выгорание сажи при  $580^{\circ}\text{C}$ .

В случае жидкостного катализатора отработавшие газы проходят через слой жидкости, в которой в зависимости от её состава связываются или растворяются токсичные компоненты (главным образом альдегиды, частично оксиды азота и сажа). Процесс осуществляется при сравнительно низкой температуре ( $40-80^{\circ}\text{C}$ ).

Основным токсичным компонентом отработавших газов дизелей принято считать оксиды азота. Примерно 95% оксидов азота в дизельном двигателе состоят из монооксида азота – NO, который образуется по термическому механизму в результате окисления атмосферного азота в зоне продуктов сгорания при высокой температуре, содержащимся там свободным кислородом.

Для снижения температуры сгорания и как следствие уменьшения выбросов оксидов азота применяется ряд мероприятий:

- уменьшение угла опережения впрыска топлива и применения многоступенчатого впрыска;

- использование водно-топливной эмульсии. Эмульсия образуется вследствие тщательного перемешивания топлива с водой в различных пропорциях до получения гомогенной смеси. Впрыск эмульсии в цилиндр позволяет снизить максимальную температуру сгорания. На дизелях снижения максимальной температуры сгорания также можно достичь путем впрыска воды в конце процесса сгорания;

- понижения степени сжатия;

– применение рециркуляции отработавших газов.

Смысл рециркуляции отработавших газов заключается в пепуске их части во впускную систему. Добавление отработавших газов в воздушный заряд приводит к уменьшению содержания в нем кислорода. Вследствие этого снижается температура продуктов сгорания за фронтом пламени, что приводит к уменьшению интенсивности образования  $\text{NO}_x$ . Кроме того, входящие в состав рециркулируемых газов  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  имеют большую по сравнению с воздухом теплоемкость. В результате этого снижаются локальные и средние температуры рабочего цикла.

Наилучшую эффективность снижения выбросов оксидов азота имеет окислительный нейтрализатор. Принцип работы заключается в применении специального селективного катализатора SCR с дозированным впрыском мочевины (дозирование мочевины осуществляется электромагнитной форсункой). В ходе процесса происходит реакция восстановления  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$  мочевиной  $\text{NH}_3$  с образованием азота и водяного пара:



Комплексную очистку отработавших газов от токсичных компонентов обеспечивают комбинированные системы очистки, которые дают возможность фильтрации твердых частиц и максимально эффективного снижения уровня эмиссии  $\text{NO}_x$ . Примером могут служить следующие совокупности компонентов и систем:

– на первом этапе системой рециркуляции отработавших газов снижается уровень эмиссии  $\text{NO}_x$ , на втором этапе фильтром твердых частиц достигается снижение содержания твердых частиц в отработавших газах;

– на первом этапе происходит непрерывное окисление сажи фильтром с каталитическим покрытием, на втором этапе достигается снижение уровня эмиссии  $\text{NO}_x$  системой селективного каталитического восстановления SCR.

### Литература

1. Марков, В. А. Токсичность отработавших газов дизелей / В. А. Марков, Р. М. Баширов, И. И. Габитов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Изд-во МГТУ, 2002.
2. Звонов, В. А. Образование загрязнений в процессах сгорания / В. А. Звонов. – Луганск: Изд-во Восточноукраинского государственного университета, 1998. – 126 с.

3. EGR System in a Turbocharged and Intercooled Heavy-Duty Diesel Engine. Expansion of EGR Area with Venturi EGR System. Technical Review, 2003, № 15.
4. Taking the Diesel Engine into the Future. DAUS Tryck&Media AB Sundsvall, Sweden, May 2004.

УДК 621.436

**Влияние параметров системы рециркуляции  
на показатели рабочего процесса и содержание  $\text{NO}_x$   
в отработавших газах дизелей**

Зеленков А. А., Петрученко А. Н.

Белорусский национальный технический университет

Чтобы уменьшить загрязнения окружающей среды вредными компонентами отработавших газов автомобильных двигателей внутреннего сгорания, допустимые предельные значения уровня эмиссии данных веществ в последние годы неуклонно уменьшаются. Для этого транспортные средства имеют дополнительные системы, ограничивающие уровень эмиссии отработавших газов.

Ни один двигатель внутреннего сгорания не обеспечивает полного сгорания топливоздушнoй смеси даже при избытке кислорода. Чем хуже протекает процесс сгорания рабочей смеси, тем выше уровень эмиссии вредных веществ.

При сгорании топливоздушнoй смеси выделяются многочисленные продукты неполного сгорания и побочных реакций, протекающих при сгорании топлива, основными из которых являются: монооксид углерода ( $\text{CO}$ ); углеводороды ( $\text{CH}$ ), оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ) и твердые частицы.

Из-за высокой опасности для окружающей среды основным токсичным компонентом отработавших газов двигателей принято считать оксиды азота. Наиболее высокий выход оксидов азота в дизелях поскольку сгорание топливоздушнoй смеси у них происходит при избытке воздуха и как следствие с незначительным образованием монооксида углерода и углеводородов.

Эффект уменьшения интенсивности образования  $\text{NO}_x$  при использовании рециркуляции отработавших газов объясняется уменьшением содержания кислорода в рабочей смеси, замедле-

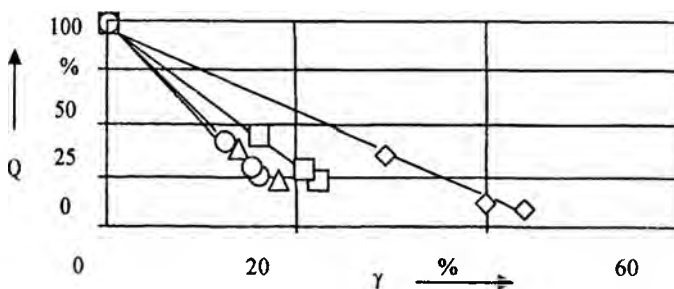
нием процесса сгорания и как следствие – снижением температуры продуктов сгорания.

Внешняя рециркуляция, как наиболее эффективная и распространенная на сегодняшний день, как правило, осуществляется двумя способами:

– перепуск отработавших газов через турбокомпрессор (линия низкого давления);

– перепуск отработавших газов во впускной коллектор с введением в систему дополнительных конструктивных элементов для обеспечения положительного перепада давлений перед турбиной и после компрессора (линия высокого давления).

На рисунке 1 показан эффект применения рециркуляции отработавших газов по линии высокого давления для дизеля с турбонаддувом и промежуточным охлаждением надувочного воздуха, имеющего литровую мощность 24 кВт.



◇ – нагрузка 20%, □ – нагрузка 50%, Δ – нагрузка 80%,  
○ – нагрузка 100%

Рисунок 1 – Зависимости изменения степени эмиссии  $NO_x$   $Q$  от степени рециркуляции  $\gamma$ , для различных нагрузочных режимов

Из зависимостей видно, что эффект снижения  $NO_x$  при той же степени рециркуляции увеличивается, когда нагрузка на двигатель возрастает.

Оценить влияния параметров рабочего процесса дизеля с системой рециркуляции отработавших газов на выход оксидов азота можно с помощью эмпирической зависимости.

В результате обработки экспериментальных данных, полученных на Минском моторном заводе при испытании 4-х цилиндрового дизельного двигателя с турбонаддувом с системой рециркуляции отработавших газов по 8-ступенчатому циклу, построена регрессионная зависимость для определения выхода  $\text{NO}_x$  вида:

$$M_{\text{NO}_x} = a_0 + a_1 \cdot \alpha + a_2 \cdot \alpha \cdot \alpha + a_3 \cdot T_z + a_4 \cdot T_z \cdot T_z + a_5 \cdot P_z + a_6 \cdot P_z \cdot P_z + a_7 \cdot p_i + a_8 \cdot p_i \cdot p_i, \quad (1)$$

где:  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$  – коэффициенты регрессии;

$\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;

$T_z$  – максимальная температура сгорания;

$P_z$  – максимальное давление цикла;

$p_i$  – среднее индикаторное давление.

Данная зависимость позволила выполнить анализ влияния количества и температуры рециркулируемых газов на содержание окислов азота в отработавших газах (рисунок 2).

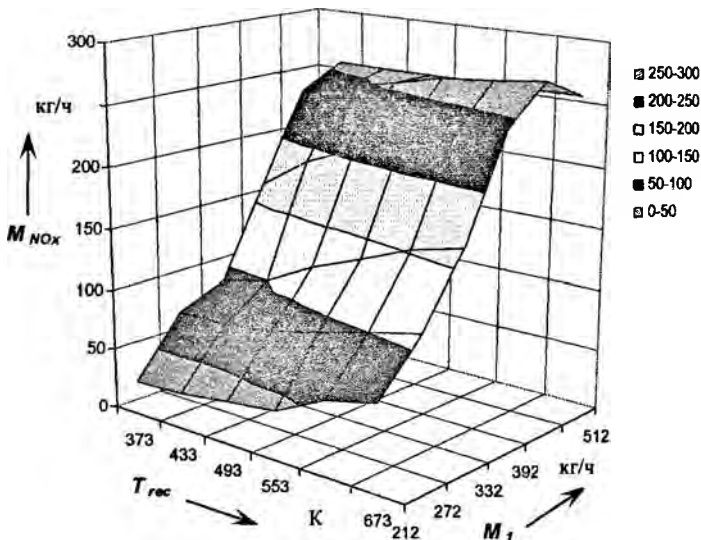


Рисунок 2 – Зависимость содержания окислов азота от количества свежего заряда  $M_1$  и температуры рециркулируемых газов  $T_{\text{rec}}$

Снижение количества образуемых оксидов азота обусловлено снижением концентрации кислорода в рабочей смеси, замедлением скорости сгорания топлива, увеличением его количества выгорающего на линии расширения и, как следствие, снижением максимальной температуры цикла.

С увеличением температуры рециркулируемых газов, снижается количество отработавших газов, поступивших в цилиндр. При этом повышается температура конца сжатия и, как следствие, возрастает максимальная температура сгорания. Поэтому с ростом температуры наблюдается некоторое увеличение выбросов оксидов азота.

Рост продолжительности выгорания топлива обуславливает увеличение его количества сгорающего вблизи нижней мертвой точки, что ведет к ухудшению топливной экономичности. При этом из-за ухудшения протекания рабочего процесса резко возрастают выбросы СН и СО.

Как показывает анализ применение рециркуляции отработавших газов наиболее эффективно на режимах частичных нагрузок и холостом ходу. При выборе системы рециркуляции следует учитывать следующие факторы:

- уровень токсичности ОГ который необходимо достичь.
- технико-экономические показатели двигателя
- значение перепада между давлением ОГ перед турбиной и давлением воздуха после компрессора, замеренное по всей характеристике работы двигателя (при выборе системы РОГ по контуру высокого давления).
- определенные значения необходимой степени рециркуляции ОГ на каждом режиме работы двигателя.
- рабочий процесс в двигателе должен быть согласован с работой системы РОГ.

### Литература

1. Кухаренок, Г.М. Рабочий процесс высокооборотных дизелей / Г. М. Кухаренок. – Минск: БГПА, 1999. – 179 с.
2. Марков, В. А. Токсичность отработавших газов дизелей / В. А. Марков, Р. М. Баширов, И. И. Габитов. – 2-е изд., перераб. и доп.– Москва: Изд-во МГТУ, 2002.

# Судостроение и гидравлика

УДК 614.842.6

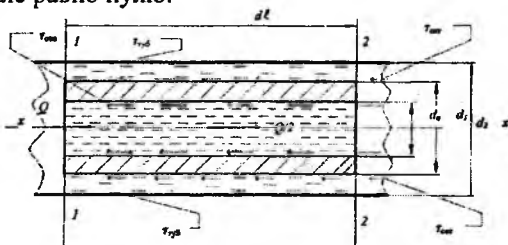
**Применение коаксиальных твердофазных источников ПАВ для повышения эффективности ручных стволов**

Лебян Ю. П., Карпенчук И. В., Леоник Д. А.

Белорусский национальный технический университет  
Учреждение «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций»  
МЧС Республики Беларусь

При использовании твердофазных источников смачивателей и пенообразователей основной задачей является обеспечение постоянства концентрации огнетушащего раствора. Поставленная задача может быть достигнута использованием твердофазного источника трубчатой формы с коаксиальным цилиндрическим каналом.

Выделим в потоке, обтекающем твердотельный коаксиальный источник некоторый объем малой длины  $dl$  ограниченный сечениями 1-1 и 2-2 и применим к его движению теорему о движении центра масс. Так как движение равномерное, ускорения центра масс выделенного объема в трубчатом и цилиндрическом канале равно нулю.



Следовательно, сумма проекций всех внешних сил, приложенных к указанному объему, на любую ось (например, ось  $x$ - $x$ ) также равна нулю.

Такими внешними силами – являются силы давления в сечениях 1-1 и 2-2, нормальные к этим сечениям; силы гидродинамического давления на боковые поверхности рассматриваемого

объема и проектирующиеся в ноль на ось  $x-x$ ; сила тяжести (вес объема жидкости между сечениями 1-1 и 2-2) направленная вертикально вниз (в виду ее малостью по сравнению с другими силами – пренебрегаем); сила сопротивления движению.

Допускаем, что все частицы жидкости движутся с одинаковыми скоростями, равными средним скоростям потока в каналах при обтекании коаксиального источника. Сила сопротивления будет равна силе трения, возникающей на боковых поверхностях выделенного объема. Касательное напряжение на стенке обозначим через  $\tau$ , то полная сила трения  $T$  будет равна:

$$T = \tau \chi dl, \quad (1)$$

где  $\chi$  – смоченный периметр рассматриваемого объема.

С другой стороны:

$$T = T_k + T_0, \quad (2)$$

где  $T_k$  – сила трения в кольцевом канале;  $T_0$  – сила трения во внутреннем канале.

Рассмотрим схему течения, представленную на рисунке.

Составим сумму проекций всех перечисленных сил с учетом сделанных допущений на ось  $x-x$ , параллельную оси потока:

$$F_1 - F_2 - T = 0, \quad (3)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – силы давления в сечениях 1-1 и 2-2.

Произведя соответствующие подстановки получим:

$$\Delta p S = \tau \chi dl, \quad (4)$$

где  $\Delta p$  – потери давления на участке  $dl$ ;  $S$  – площадь сечения потока.

Тогда для всего источника смачивателя уравнение (4) примет

$$\text{вид:} \quad \Delta p S = \int_0^l \tau \chi dl = \tau \chi l. \quad (5)$$

Для обеспечения равномерности растворения твердофазного источника потоком и постоянства концентрации получаемого раствора необходимо равенство сил трения и расходов жидкости в кольцевом и центральном каналах источника:

$$T_k = T_0, \quad Q_k = Q_0 \quad \text{и} \quad Q = Q_k + Q_0, \quad (6)$$

где  $Q$ ,  $Q_k$  и  $Q_0$  – соответственно общий расход и расход в кольцевом канале и в центральном канале.



Сила трения в кольцевом канале может быть рассчитана по формуле:  $T_k = \tau_{\text{мыб}} \partial \pi d_2 + \tau_{\text{сет}} \pi d_1 = \pi d (\tau_{\text{мыб}} d_2 + \tau_{\text{сет}} d_1)$ , (7)

где  $\tau_{\text{мыб}}$  – касательное напряжение на стенке тубуса, в котором находится твердофазный источник;  $\tau_{\text{сет}}$  – касательное напряжение на стенке цилиндрической сетки, в которую помещен коаксиальный источник;  $d_2$  – внутренний диаметр тубуса;  $d_1$  – внешний диаметр сетки источника.

Сила трения в центральном канале может быть рассчитана по формуле:  $T_0 = \tau_0 \pi d_0$ , (8)

где  $\tau_0$  – касательное напряжение на внутренней стенке центрального канала смачивателя;  $d_0$  – диаметр центрального канала смачивателя.

После преобразования можно определить диаметр центрального канала смачивателя:  $d_0 = \frac{\tau_0 (d_2^2 - d_1^2)}{\tau_{\text{мыб}} d_2 - \tau_{\text{сет}} d_1}$ . (9)

Касательное напряжение связано с коэффициентом гидравлического трения зависимостью:  $\tau = \frac{\rho v^2 \lambda}{8}$ , (10)

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения;  $v$  – средняя скорость.

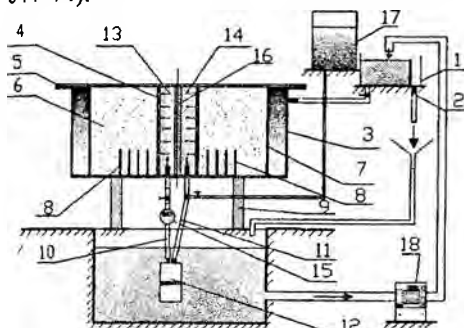
Следует отметить, что и данный расчет является приближенным, так как не учитывает следующие факторы. Раствор ПАВ при растворении твердофазного источника является не ньютоновской жидкостью, для которой возникающие касательные напряжения являются функцией скорости сдвига и динамической вязкости такого раствора не постоянна. Кроме того, наружный и внутренний диаметр твердофазного источника в процессе растворения будет изменяться. Поэтому гидродинамика движения жидкости при растворении твердофазного источника смачивателя и пенообразователя будет более сложной и эти факторы необходимо учитывать в дальнейшем при проектировании конструкции тубуса и размеров источника. Необходим ряд исследований по определению реологических характеристик растворов, полученных при растворении.

## Циркуляционная регенерация фильтра скважины

Шейко А. М., Ивашечкин В. В.

Белорусский национальный технический университет

Цель работы – исследовать в лабораторных условиях эффективность применения циркуляционно-реагентной регенерации скважины, фильтр которой в процессе обработки разделен на нагнетающие и всасывающие сектора. Процесс циркуляционной регенерации осуществлялся на экспериментальной установке, состоящей из круглого фильтрационного лотка, в центр которого помещалась модель фильтра скважины (Рис. 1). Фильтр представлял собой трубчатый полиэтиленовый каркас диаметром 0,225 м обмотанный проволокой  $d = 2$  мм (по ТУ 51–644–74).



1 - напорный бак; 2 - холостой слив; 3 - фильтрационный лоток; 4 - закольцованный фильтр скважины; 5 - крышка фильтрационного лотка; 6 - водовмещающий грунт; 7 - кольцевой бьеф; 8 - пьезометры; 9 - стойка; 10 - нагнетательный трубопровод; 11 - отводящий трубопровод; 12 - насос «Ручеек-1»; 13 - нагнетательный сектор; 14 - всасывающий сектор; 15 - счетчик воды СХВ; 16 - разделительный вертикальный пакер; 17 - емкость для реагента; 18 - насос;

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для отработки процесса циркуляционной регенерации

Методика проведения экспериментальных исследований. Для оценки эффективности процесса циркуляционной регенерации модель фильтра скважины и прифилтровая зона искусственно кольматировалась смесью железосодержащего осадка и цемента марки М 500. Добавка цемента к кольматанту способствовала сцеплению и удержанию кольматирующего осадка на наружной и внутренней поверхности фильтра, а также в прифилт-

ровой зоне скважины, что имитировало естественную химическую кольматацию скважины, эксплуатировавшейся длитель-

ный период (5-10 лет и более лет). Характеристика железосодержащего осадка приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав железосодержащего осадка

Вид кольматанта и условия эксперимента	Химический состав железосодержащего осадка, %			
	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	потери при прокаливании
Осадок станции обезжелезивания водозабора «Островы»; кольматировалась прифильтровая зона	16,2	28,55	13,64	24,83
Осадок из водоподъемных труб скважины № 21 г в/з Боровляны; кольматировался фильтр	7,86	66,33	6,44	12,04

Помимо фильтра скважины прифильтровая зона скважины вокруг фильтра заполнялась смесью состоящей из гравия, кольматирующего осадка и цемента М 500. Смесь предварительно затворялась водой, высушивалась и дробилась на конгломератобразные структуры, представляющие собой дегидратированные соединения. Затем загружалась в фильтрационный лоток и совместно с грунтом водоносного пласта послойно трамбовалась. Далее заполненный водой при температуре 16 °С фильтрационный лоток отстаивался сутки. После этого проводились гидравлические испытания скважины с целью определения основных гидродинамических параметров: производительности и понижения в скважине.

Процесс растворения дегидратированных соединений железа осуществлялся при помощи сильного восстановителя – дитионита натрия (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) раствора 10 % концентрации с добавлением 1 % раствора триполифосфата натрия (Na<sub>5</sub>P<sub>3</sub>O<sub>10</sub>). Количество реагента определялось по известной методике. Готовый раствор помещался в емкость для реагента, установленного выше статического уровня воды (Рис. 1). Температура предварительно отстоянной воды в резервуаре и в фильтрационном лотке не превышала 16 °С, что является необходимым условием применения дитионита натрия в качестве реагента.

Теоретически и экспериментально установлено, что максимальная скорость в прифильтровой зоне достигается при двухсекторной схеме. Первым этапом циркуляционной регенерации была подача реагента из емкости по шлангу в фильтр и прифильтровую область скважины. Далее включали насос, и реа-

гент от нагнетательного к всасывающему сектору циркулировал в прифилтровой зоне скважины в течение 50 минут, растворяя коагулирующий осадок. Затем после циркуляции реагента насос отключался, и реагент взаимодействовал с коагулянтном в режиме реагентной ванны в течение 2 – х часов. Далее производился слив отработанных продуктов реакции до полного их удаления, и проводили гидравлические испытания скважины после регенерации. Далее определялся удельный дебит модели скважины после регенерации при постоянном расходе, а также показатель обобщенного сопротивления (Табл. 2).

Таблица 2 – Эффективность циркуляционной регенерации

Условия эксперимента	Удельный дебит, см <sup>3</sup> /с		Показатель обобщ. сопротивления	
	До обработки	после	До обработки	после
Закоагулирован фильтр и прифилтровая зона; количество секторов – 2; Первонач. уд. дебит 11,1 см <sup>3</sup> /с	4.9	8.9	9,12	4,49
Закоагулирован только фильтр; количество секторов – 2; Первонач. уд. дебит 11,1 см <sup>3</sup> /с	7.0	9.33	6.65	3.55
Закоагулирован только фильтр, количество секторов – 2; Первонач. уд. дебит 11,1 см <sup>3</sup> /с	6.8	8.13	12.65	10.93
Закоагулирована только прифилтровая зона. Режим – «реагентная ванна». Продолжительность регенерации t = 18 час. Первонач. уд. дебит 11,1 см <sup>3</sup> /с	4.2	5.1	8.92	8.38

Анализ данных табл. 2 показывает, что удельный дебит после циркуляционной регенерации возрос в среднем в 1,5 раза и достиг в среднем 79% от первоначального. В режиме «реагентная ванна» удалось повысить удельный дебит в 1,2 раза, что составило 46% от первоначального. Это свидетельствует об эффективности проведения восстановительных работ циркуляционным способом, при существенном сокращении продолжительности регенерации.

## Способ создания силовой нагрузки в тренажерах для армрестлинга

Качанов И. В., Шелег А. А.

Белорусский национальный технический университет

Практика применения пневмоприводов в промышленности доказала их прогрессивную роль в развитии техники. Благодаря таким важным для большинства случаев применения преимуществам пневмоприводов, как малая масса и объем, приходящиеся на единицу передаваемой мощности, высокий к. п. д., надежность действия, простота автоматизации управления, быстродействие, а также возможность бесступенчатого регулирования выходной скорости в широком диапазоне, пневмоприводы нашли широкое применение в самых различных отраслях машиностроения. В области создания тренажеров одним из основных преимуществ применения пневмосистем, создающих силовую нагрузку, является отсутствие влияния инерционных сил на кривую сопротивления (Рис.1) в отличие от обычных силовых тренажеров в которых инерционные силы искажают кривые сопротивления, особенно при высоких скоростях, что приводит к травмам. Даже при использовании эксцентриков силовые тренажеры могут должным образом работать только с медленными контролируруемыми движениями.

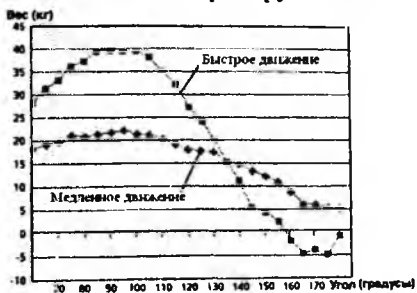


Рис. 1. Кривая сопротивления при использовании обычного силового тренажера

Ввиду этого разработана пневматическая система на основе которой создан тренажер для армрестлинга. Данный тренажер сконструирован как для атлетических тренировок, так и для реабилитации и предназначен для совершенствования тренировочного процесса в таком виде спорта как армрестлинг

(борьба на руках). Тренировочный процесс данного вида спорта недостаточно обеспечен техническими средствами.

Биомеханика в армрестлинге имеет свою специфику. Она заключается в том, что в ходе борьбы возникают быстротечные изменения векторов скоростей и усилий, создаваемых биозвеньями спортсменов друг на друга, вследствие чего происходит смена режимов работы нервномышечной системы спортсмена. Эта специфика армрестлинга задает определенные условия к проектированию тренажеров для этого вида спорта.

Один из вариантов конструкции тренажера на основе пневмопривода, учитывающих эти условия, приведен на рис.2. Данное устройство содержит рукоятку 1, закрепленную на рычаге 2, который соединен с приводным валом 3. Приводной вал 3 соединен, в свою очередь, со штоком 4 силового цилиндра 5. Вход 6 силового цилиндра 5 сообщен через регулятор давления, образованный редукторами следящего действия 7, 8, и обратный клапан 9 с компрессором 13. С помощью шарнирного зажима 10 рукоятка 1 закреплена на рычаге 2, который, в свою очередь, с помощью шарнирного зажима 11 закреплен на приводном валу 3. Рычаг 2 снабжен также осью 12. Приводной вал 3 соединен со штоком 4 силового цилиндра 5 посредством тросо-блочной системы, состоящей из закрепленного на приводном валу диска 17 и троса 18. Перед редуктором следящего действия 7 установлен манометр 19, а перед редуктором следящего действия 8 установлен манометр 15. Управление редукторами следящего действия 7, 8 осуществляется ЭВМ 16.

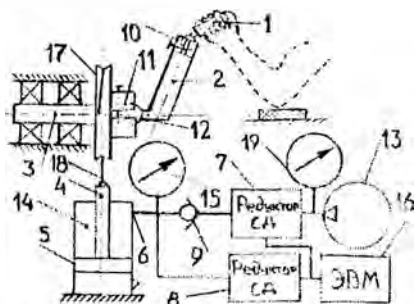


Рис.2. Спортивный тренажер для армрестлинга на основе пневмопривода

Для выполнения упражнения сжатый воздух подают на вход редуктора следящего действия 7. Затем, в соответствии с задан-

ной редуктору 7 ЭВМ 16 программой, заданный объем воздуха нагнетается в штоковую полость 14 силового цилиндра 5 до заданного давления. При этом спортсмен непрерывно воздействует на рукоятку 1, пытаясь переместить рычаг 2. В это же время по программе, заданной ЭВМ 16 редуктору 8, изменяется диаметр отверстия через которое воздух вытесняется из штоковой полости 14, или величина давления в штоковой полости при достижении которой воздух стравливается в атмосферу. Воздух из штоковой полости 14 вытесняется под действием усилия прилагаемого рукой к рукоятке 1 в следствие чего проворачивается ось 12 вместе с приводным валом 3 и диском 17, который через трос 18 соединен со штоком 4 силового цилиндра 5. Прикладываемому армрестлером усилию будет противопоставляться усилие создаваемое давлением сжатого воздуха в штоковой полости цилиндра 5. В процессе воздействия на рукоять 1 спортсмен будет преодолевать сопротивление оказываемое со стороны пневмоцилиндра 5 и вытеснять воздух из штоковой полости 14. При этом величина преодолеваемых инерционных нагрузок будет незначительной, из-за относительно малых масс элементов данного тренажера (поршень, шток и т.д.), участвующих в передаче нагрузки на рукоять 1.

#### Выводы:

Разработанный способ создания силовой нагрузки в тренажере для армрестлинга обеспечивает эффективную работу тренажера и учитывает специфику данного вида спорта, что позволяет быстрее повысить спортивное мастерство армрестлера, а также может применяться в других спортивных и реабилитационных устройствах.

#### Литература

1. Герц, Е. В. Пневматические устройства и системы в машиностроении / Е. В. Герц [и др.]. – М.: Машиностроение, 1981. – 408 с., ил.
2. Устройство для тренировки армрестлеров: пат. 2580 Респ. Беларусь, МКИ А 63В 21/00 / И. В. Качанов, И. В. Бельский, А. Э. Павлович, А. А. Шелег.

УДК 502.7:626.86

**Разработка и экспериментальные исследования макета  
низконапорной лопастной гидротурбины с повышенным  
коэффициентом полезного действия**

Чернобылец А. Н., Недбальский В. К., Куриленко А. Е.,  
Мяделец С. О.  
Белорусский национальный технический университет

В связи с непрерывным удорожением энергоносителей необходимо максимально использовать гидроэнергетический потенциал республики. В географических условиях Беларуси экономически невыгодно повсеместно строить высоконапорные плотины. Для выработки электроэнергии на малых водотоках необходимо устанавливать лопастные турбины. В то же время у известных лопастных турбин коэффициент полезного действия не превышает 40-45% [1].

Для увеличения к.п.д. гидротурбины необходимо, чтобы турбина вращалась с минимальными потерями энергии. Поэтому была предложена конструкция гидротурбины, у которой каждая лопасть состоит из двух лопаток, установленных на осях с возможностью поворота на угол  $85^\circ$ . Вследствие этого лопатки лопастей раскрываются в активной зоне воздействия потока и складываются в пассивной зоне.

В то же время турбина, расположенная на горизонтальном валу, не может вырабатывать электроэнергию в зимний период времени. Поэтому и было предложено установить гидротурбину на вертикальном валу. Разработана и изготовлена модель гидротурбины, схема которой приведена на рис.1а (вид сверху) и рис.1б (вид сбоку) представляющая собой осевое колесо со спицами, закрепленное на вертикальном валу 1, при этом на спицах расположены образующие лопасти парные лопатки, установленные с возможностью поворота навстречу друг другу.

Для обеспечения минимальных потерь энергии, лопатки располагаются в плоскости лопасти в активной зоне воздействия потока 3 и складываются в пассивной зоне 2, при этом лобовое сопротивление при движении сложенных лопастей минимальное. На конструкцию турбины, расположенной на вертикальном валу, получен патент Республики Беларусь на полезную модель [2].



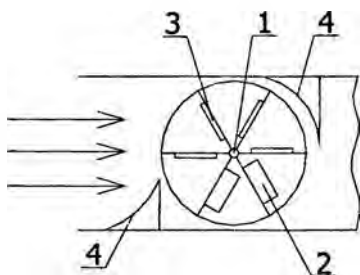


Рис. 1а. Схема модели турбины (вид сверху): 1 – вал турбины, 2 – лопатки лопастей в пассивной зоне потока, 3 – лопатки лопастей в активной зоне потока, 4 – направляющие пластины распределяющего устройства потока воды

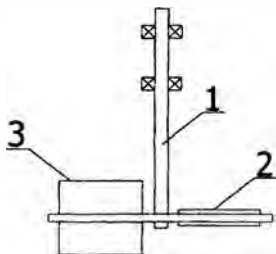


Рис. 1б. Схема модели турбины (вид сбоку): 1 – вал турбины, 2 – лопатки лопастей в пассивной зоне потока, 3 – лопатки лопастей в активной зоне потока

Для измерения мощности на валу турбины, предложено и изготовлено устройство, схема которого представлена на рис.2.

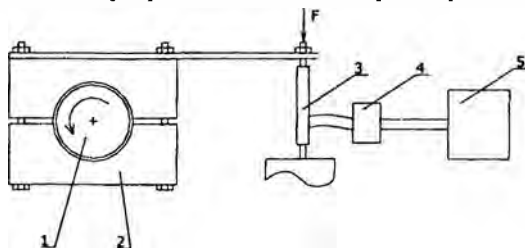


Рис. 2. Схема устройства для измерения мощности на валу турбины: 1 – вал турбины, 2 – тормозные колодки, 3 – датчик усилия растяжения, 4 – усилитель сигналов, 5 – компьютер

Разработана программа для расчета мощности на валу турбины с помощью компьютера, используя сигналы с датчиков усилия растяжения и числа оборотов вала, т.е. можно непосредственно в процессе эксперимента определять мощность на валу турбины  $N$ .

Результаты измерения мощности на валу гидротурбины в диапазоне частот вращения вала  $n=0,2-0,5$  1/с при скорости потока воды  $V_1=0,6$  м/с представлены на рис. 3.

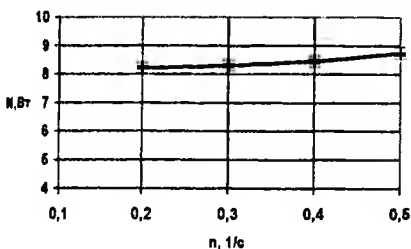


Рис. 6. Зависимость мощности на валу гидротурбины  $N$  от частоты вращения вала гидротурбины  $n$  при скорости потока  $V=0,6$  м/с и мощности потока воды  $N_v=11,5$  Вт

Таким образом, получено, что к.п.д. модели низконапорной лопастной гидротурбины  $\eta=76-78\%$

### Выводы

Разработана конструкция расположенной на вертикальном валу низконапорной лопастной гидротурбины, способной круглогодично вырабатывать электроэнергию. В результате испытаний модели гидротурбины установлено, что ее к.п.д.  $\eta=76-78\%$ , что на 30-33% превышает к.п.д. известных низконапорных лопастных турбин.

### Литература

1. Справочник по гидротурбинам: Справочник / В. Б. Андреев, Г. А. Броновский [и др.]; под общ. ред. Н. Н. Ковалева. – Л.: Машиностроение, 1984. – 496 с.
2. Гидроагрегат: патент 3031 Респ. Беларусь на полезную модель от 15.06.2006 г. / Б. М. Хрусталева, В. К. Недбальский, В. Д. Сизов, И. М. Шаталов, А. Е. Куриленко [и др.].

УДК 628.112

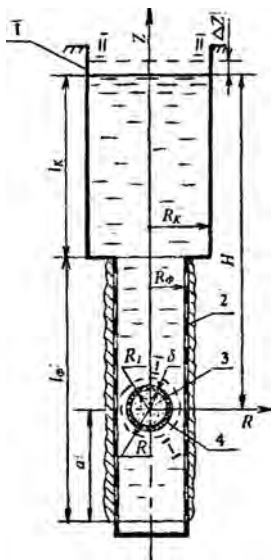
## Динамика пульсаций шаровой полости с продуктами газового взрыва в водозаборной скважине

Ивашечкин В. В., Верменюк В. В., Чернобылец А. Н.  
Белорусский национальный технический университет

Подводный газовый взрыв нашел свое применение при восстановлении снизивших дебит скважин [1].

Целью настоящей работы является теоретический расчет пульсаций сферической взрывной камеры с эластичной оболочкой в скважине.

Расчетная схема пульсаций представлена на рис. 1.



Пусть в фильтре скважины имеется сферическая взрывная камера с энергоносителем с наружным радиусом  $R_1$ , имеющая тонкостенную упругую оболочку толщиной  $\delta$  менее  $0,1R_1$ . Пусть в энергоносителе произошло быстрое химическое превращение – взрыв.

Камера практически мгновенно оказывается заполненной продуктами взрыва с одинаковым и равным по всему объему давлением  $p_1 = m p_0$ , где  $m$  – степень возрастания

давления,  $p_0$  – гидростатическое давление. Камера радиально расширяется. Жидкость можно считать несжимаемой [2].

Согласно первому закону термодинамики, начальная энергия продуктов взрыва  $\mathcal{E}_1$  расходуется на увеличение их внутренней

энергии  $W_{(R-\delta)}$ , на работу  $A$  над окружающей жидкостью и на работу  $A_{об}$  растяжения тонкостенной упругой оболочки:

$$A + A_{об} + W_{(R-\delta)} = \mathcal{E}_1. \quad (1)$$

Окончательно уравнение имеет вид:

$$\int_{4\pi R_1^2}^{4\pi(R_1-\delta)^2} p_l dV + 4\pi E \delta (R - R_1)^2 + \frac{4\pi p_0 \pi (R_1 - \delta)^{2n}}{3(n-1)} (R - \delta)^{3(n-1)} = \frac{4\pi p_0 \pi (R_1 - \delta)^2}{3(n-1)}, \quad (2)$$

где  $p_l$  – давление на оболочку со стороны жидкости в скважине в процессе движения.

Давление  $p_l$  найдем из уравнения Д. Бернулли на случай неустановившегося движения, записанного для сечения I – I, совпадающего с наружной поверхностью сферической оболочки и сечения II – II, проходящего по уровню воды в скважине (рис. 1). Плоскость сравнения проводим через центр шара.

Используем следующие допущения: стенки скважины абсолютно жесткие и непроницаемые; давление продуктов взрыва по всему объему полости одинаково.

С учетом сил инерции и сил трения выражение для давления  $p_l$  на оболочку со стороны жидкости во время пульсации имеет вид

$$p_l = \rho g \cdot \left[ H + \frac{p_{взм}}{\rho g} + \frac{4}{3} \cdot \frac{R^3 - R_1^3}{R_1^2} + \frac{\alpha}{g} \left( \frac{8R^4}{R_1^4} - \frac{1}{2} \right) \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{2R^4 \left[ 1 - \left( \frac{R_\phi^2 - R^2}{R_\phi^2} \right)^2 \right]}{g\mu^2 (R_\phi^2 - R^2)^2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4}{g} \left( \frac{l_\phi - a}{R_\phi^2} + \frac{l_\phi}{R_1^2} \right) \frac{d \left( R^2 \frac{dR}{dt} \right)}{dt} + \frac{4}{g} \left[ \lambda_\phi \frac{l_\phi - a}{R_\phi^2} + \lambda_\phi \frac{l_\phi}{R_1^2} + \frac{2}{R_1^4} \left( \frac{R_1^2}{R_\phi^2} - 1 \right)^2 \right] \cdot R^4 \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где  $\lambda$ - коэффициент гидравлического трения;  $\mu$ - коэффициент расхода кольцевого отверстия между взрывной камерой и стенкой фильтра.

Для нахождения решения уравнения (2) использовались численные методы (а именно, метод Рунге-Кутты-Мерсона). В результате составлена программа расчета, которая позволяет получить зависимости  $R(t)$ ,  $v(t)$ ,  $p(t)$  и значения импульса давления

$$I = \int_0^t p(t) dt \text{ при различных параметрах скважины и взрывной}$$

камеры. Вследствие потерь энергии, пульсации скорости и давления продуктов взрыва имеют затухающий характер.

Обработка результатов вычислений позволила предложить формулу для расчета импульса давления  $I$  для стадии расширения продуктов взрыва (при  $m = 10$  и  $E = 8$  МПа), которая имеет вид:

$$I = mp_0 \cdot k_n \cdot k_\phi \cdot \left( \frac{R_1}{R_\phi} \right)^{0,7} \frac{(l_\phi - a)^{0,015} \cdot (l_\phi + l_K - a)^{0,08} \cdot (1 + \delta)^{20}}{R_K^{0,79}} \quad (4)$$

где  $k_n = 1,57 - 0,51 \cdot n + 0,032 \cdot n^2$  – коэффициент, учитывающий влияние коэффициента политропы  $n$ ,  $k_\phi = 0,00164 - 0,006 \cdot R_\phi + 0,43 \cdot R_\phi^2 - 0,86 \cdot R_\phi^3$ . Значения переменных следует задавать в метрах. Ограничения на использование формулы следующие:  $R_\phi \in [0,08; 0,25]$ ,  $0,35R_\phi \leq R_1 \leq 0,55R_\phi$ ,  $R_\phi \leq R_K \leq 2R_\phi$ ,  $l_K \in [20; 100]$ ,  $(l_\phi - a) \in [2; 18]$ ,  $\delta \in [0,001; 0,005]$ ,  $n \in [1,17; 1,81]$ . Анализ формулы (4) показывает, что импульс давления  $I$  имеет практически линейный рост при возрастании длины фильтра и колонны (поскольку от них линейно зависит глубина  $H$  и, соответственно, давление  $p_0$ , а множители  $(l_\phi - a)^{0,015}$  и  $(l_\phi + l_K - a)^{0,08}$  вносят несущественный вклад), уменьшается с увеличением  $R_K$  и  $n$ , но увеличивается с ростом  $\delta$ .

### Литература

1. Ивашечкин, В. В. Газоимпульсная технология восстановления пропускной способности фильтров водозаборных скважин/В. В. Ивашечкин; под ред. А. Д. Гуриновича. – Мн.: БНТУ, 2005. – 270 с.
2. Наугольных, К. А. Электрические разряды в воде /К. А. Наугольных, Н. А. Рой. – М.: Наука, 1971. – 155 с.

УДК 629.12

**К вопросу определения геометрических параметров струйного аппарата для гидроабразивной очистки корпусов судов от коррозии**

Качанов И. В., Яглов В. Н., Клищевский В. Ф.,  
Филипчик А. В., Жук А. Н., Щерба А. Н.

Белорусский национальный технический университет,  
Белорусская инспекция Речного Регистра

Одним из направлений повышения производительности и улучшения условий труда при очистке корпусов судов от коррозии является использование метода гидроабразивной очистки (ГАО). Сущность метода состоит в том, что в рабочую зону очистки под большим давлением подают водно-песчаную смесь (пульпу). В струйных аппаратах ГАО интенсивное смешивание песка с водой происходит в смесительном сопле. Производительность ГАО до чистого металла может составлять до 45-60 м<sup>2</sup>/час.

Исследования, проведенные в НИИЛ «Водохозяйственные системы» БНТУ показали, что эффективность и стабильность работы струйного аппарата зависит от конструкции отдельных его элементов и их взаимного расположения.

Основными геометрическими параметрами струйного аппарата с коническим смесительным соплом, определяющим его скоростные и расходные характеристики, являются:

диаметр смесительного сопла  $d_c$ ;

диаметр активного сопла (жиклера)  $d_a$ ;

расстояние между выходным сечением активного сопла и входным сечением смесительного сопла  $a$ ;

длина смесительного сопла  $l_c$ ;

длина цилиндрической части смесительного сопла  $l_c$ ;

угол сходимости конусной части смесительного сопла  $2\alpha$  (рис. 5.1).

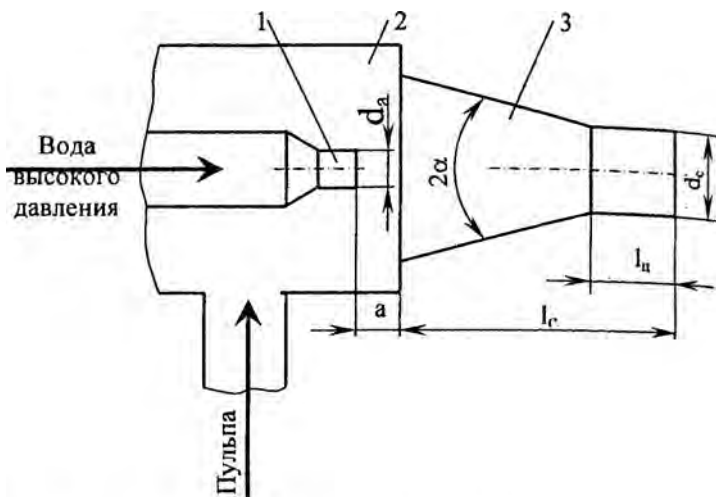


Рис. 5.1. Схема струйной эжекционной насадки:

1 – активное сопло; 2 – приемная камера; 3 – смесительное сопло

Эффективность работы струйного аппарата оценивалась по массовому съему металла в единицу времени. Эксперименты выполнялись на плоских образцах из стали ВСтЗсп с размерами  $4 \times 50 \times 50$  мм. Массовый съем металла определяется взвешиванием до и после ГАО на аналитических весах ВЛЛ-200М. Образцы обрабатывались при следующих постоянных параметрах: абразивный материал – речной песок ( $\bar{N} = 500$  мкм); концентрация абразивного материала в суспензии  $C = 20\%$ ; длина струи  $L = 190$  мм; угол атаки  $\beta = 70^\circ$ ; время обработки  $t = 3$  мин. Варьируемыми параметрами были: давление воды на входе в активное сопло  $p_{вх} = 7, 9, 11, 13, 15$  МПа, а также геометрические параметры струйного аппарата:  $d_c$ ;  $d_a$ ;  $a$ ;  $l_c$ ;  $2\alpha$ . Активные сопла с диаметрами  $d_a = 1,5-8$  мм и смесительные с диаметром  $d_c = 2-10$  мм изготавливались из стали У10А с закалкой HRC 53-55. Внутренняя поверхность сопел шлифовалась до  $R_A = 0,63-1,25$  мкм. Длина смесительного сопла изменялась в диапазоне  $l_c = (2-$

7) $d_c$ , угол сходимости  $2\alpha = 13-60^\circ$ , расстояние между соплами  $a = (-0,5-2,5)d_a$ .

По результатам проведенных экспериментов были установлены зависимости, характеризующие массовый съем металла от конструктивно-геометрических параметров струйного аппарата. Оптимальными для данного диаметра смесительного сопла считались геометрические параметры, при которых обеспечивался максимальный съем металла.

Разгон гидроабразивной жидкости осуществляется в смесительном сопле. Здесь же происходит выравнивание полей скоростей компонентов смеси. На выходе из смесительного сопла должно быть обеспечено равномерное поле скоростей и заданный угол раскрытия струи. Для выяснения степени влияния длины смесительного сопла на эффективность работы струйного аппарата были проведены эксперименты при следующих геометрических параметрах:  $l_c = 5-50$  мм;  $d_c = 3-9$  мм,  $l_c = 1,0$  мм;  $a = 3$  мм. Эксперименты показали, что с увеличением отношения  $l_c/d_c$  от 1,0 до 5 массовый съем материала с поверхности увеличивается (рис. 5.2).



Рис. 5.2. Влияние относительной длины смесительного сопла на величину  $\Delta m$  при  $p_{вх} = 10$  МПа; при  $d_c = 5$  мм (3), 4 мм (2), 3 мм (1); угол сходимости  $2\alpha = 40^\circ$

Дальнейшее увеличение  $l_c/d_c$  приводит к возникновению пульсаций и снижению съема металла струи и, как следствие, рассеянию энергии и снижению силового воздействия струи на



преграду. Из графика на рис. 5.2 видно, что оптимальная длина сопла определяется соотношением  $l_c = (4-5)d_c$ .

На рис. 5.3 приведены результаты по изучению влияния угла сходимости смесительного сопла  $2\alpha$  на эффективность работы струйного аппарата. Из графиков видно, что с увеличением угла  $2\alpha$  от 0 до  $40^\circ$  массовый съем возрастает и достигает максимального значения при  $\theta = 40^\circ$ . При дальнейшем возрастании угла  $2\alpha$  отмечается снижение зависимости  $\Delta m = f(2\alpha)$ , что очевидно, можно объяснить динамическими (скоростными) характеристиками струи, которые достигают своего максимального значения при  $2\alpha = 40^\circ$ .

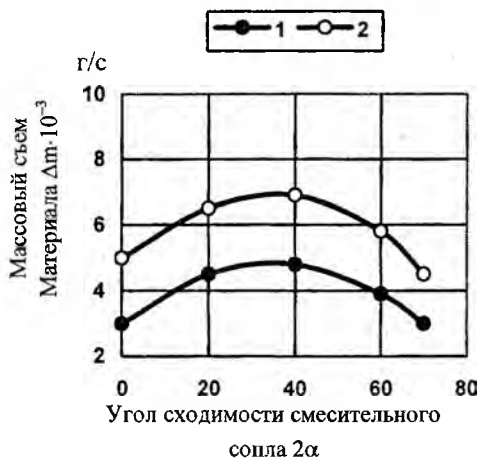


Рис. 5.3. Зависимость массового съема материала  $\Delta m$  от угла сходимости  $2\alpha$  при  $p_B = 10$  МПа;  $d_c = 3$  мм (1); 5 мм (2);  $l_c/d_c = 5$

Оценивая полученные результаты можно сделать выводы о том, что они в совокупности представляют научно-экспериментальную базу данных, на основе которой может осуществляться разработка технологического процесса ГАО. При этом, полученные данные позволяют разработать техпроцесс, реализуемый с минимальными затратами мощности и с оптимальным (по микронеровности) качеством обработанной поверхности.

УДК 556

**Стокообразующие слои дождевых осадков в регионах  
Республики Беларусь, географически близких  
к гидрометеорологическим станциям  
г.г. Брест, Гомель, Василевичи**

Киевец И. М., Юхновец В. Н., Шаталов И. М., Дмитриев Ю. В.  
Белорусский национальный технический университет

Целью исследования явилось получение значений стокообразующих слоев дождевых осадков в регионах страны, указанных в заголовке работы, для их трансформации в дальнейших исследованиях в расчетные расходы дождевых паводков через ординаты кривых редукции осадков по времени  $\Psi_{(H1\%)}$ .

Для получения значений слоев дождевых осадков  $H_{p,t}$  разовой обеспеченности  $p$ , % и продолжительности  $t$ , мин выполнена обработка записей всех дождей (плювиограмм) плювиографами за 30 лет – с 1971 г. по 2000 г. Обработка состояла в анализе интенсивностей дождей (мм/мин) по разным временным интервалам, измеряемых в минутах 10, 20, 40, 60, 90, 150, 300, 720, 1440, 2880 минут.

Плювиограммы позволили получить слои осадков за каждый временной интервал по каждому дождю за весь период наблюдений. Из полученного на основе указанного анализа массива данных наблюдений выбирался один максимум в году по каждому временному интервалу. При этом соблюдалось условие, чтобы за больший интервал времени был и больший слой дождевых осадков, что приводило в отдельных случаях к изъятию некоторых максимумом, когда они в хронологической последовательности оказывались меньшими относительно впереди размещаемых. Таким образом, были составлены статистические ряды дождевых осадков по каждому временному интервалу по всем трем гидрометеорологическим станциям общим количеством 30 шт. К обработке записей дождей самописцами и составлению указанных статистических рядов осадков привлекались студенты гр.110134 Евстратьев А.И., Кучеров А.В., которые докладывали результаты своих исследований, выполненных под руководством авторов настоящего доклада, на СНТК 2007 г.

Полученные статистические ряды осадков подвергались статистической обработке с использованием кривых распределения

вероятностей. Эта статистическая обработка состояла в расчете и построении на клетчатках вероятностей сначала эмпирических кривых обеспеченности по каждому ряду и затем в подборе теоретических кривых распределения, согласующихся с эмпирическими кривыми. Теоретические кривые распределения необходимы для экстраполяции базовых (эмпирических) кривых в область расчетных обеспеченностей  $p$ , %. А подобранной теоретической кривой распределения является та, которая ложится на построенную эмпирическую кривую обеспеченности.

Из теоретических кривых распределения использовались как наиболее научно обоснованные кривые трехпараметрического гамма-распределения. Эти кривые подбирались по параметрам – коэффициенту вариации  $C_v$  и коэффициенту асимметрии  $C_s$  (использовалось отношение  $C_s/C_v$ ). Значения  $C_v$  и  $C_s/C_v$  каждой кривой определялись по данным наблюдений, т.е. по составленным статистическим рядам с использованием метода наибольшего правдоподобия, согласно которому значения  $C_v$  и  $C_s/C_v$  снимались с номограмм.

Снятые с номограмм значения  $C_v$  и  $C_s/C_v$  по всем 30 кривым распределения позволили определить по специальным таблицам значения переходных коэффициентов  $K_p$  этих кривых во всем диапазоне обеспеченностей  $p$ , %.

После подбора теоретических кривых распределения вычислены искомые значения слоев дождевых осадков разной обеспеченности и продолжительности  $H_{p,t}$  определены по формуле

$$H_{p,t} = \bar{H} \cdot K_p. \quad (1)$$

По результатам исследования построены графики (рисунок 1), показывающие значения слоев дождевых осадков любой продолжительности в регионах, примыкающих к Василевичской, Гомельской и Брестской гидрометеостанциям.

Если ординаты  $H_{p,t}$ , снятые с кривых на рисунке 1 разделить на известное значение суточного слоя осадков  $H_{1\%}$  [1], то получаем значения необходимых ординат кривых редукции  $\Psi_{(H_{1\%}, t)}$ .

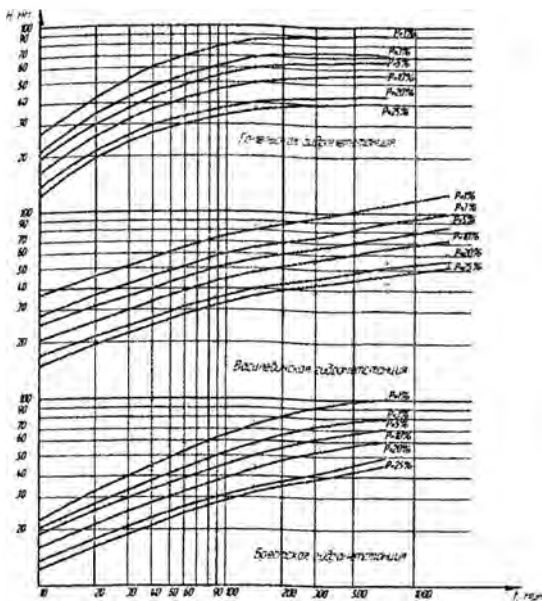


Рисунок 1

### Вывод

В результате выполненного исследования получены значения слоев дождевых осадков разной обеспеченности и разной продолжительности ( $H_{p,t}$ ). Эти данные можно использовать в расчетах расходов дождевых паводков на водосборах регионов страны, тяготеющих к гидрометеорологическим станциям в г.г. Гомеле, Василевичах, Бресте.

### Литература

1. Юхновец, В. Н. Кривые редукции дождевых осадков по времени по Минской гидрометеорологической станции / В. Н. Юхновец, И. М. Шаталов, И. А. Артамонов // Наука – образованию, производству, экономике: материалы Четвертой международной научно-технической конференции. – Минск: БНТУ. – Т. 1. – С. – 413–417.

УДК 614.842.6

**Работа в кавитационном режиме пеногенератора  
проточного типа системы подслоного тушения резервуаров  
нефтепродуктов**

Карпенчук И. В., Пармон В. В., Полешук Г. К.

Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь  
Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и  
проблем чрезвычайных ситуаций

При разработке кавитационных высоконапорных пеногенераторов, работающих в гидравлических системах при высоких статических противодавлениях, необходимо наряду с заданными гидродинамическими параметрами течения рабочей жидкости в системе находить оптимальные геометрические характеристики кавитатора, определяющие возникновение и развитие в нем кавитационного режима [1].

Основными характеристиками, определяющими работу высоконапорных пеногенераторов, служат следующие параметры: расход жидкости –  $Q$ ; давление на входе в пеногенератор –  $P_1$ ; противодействие на выходе из пеногенератора –  $P_2$ ; угол конусности конфузора –  $\alpha_k$ ; угол конусности диффузора –  $\alpha_d$ ; площадь узкого сечения пеногенератора –  $S_c$ ; площадь входного и выходного сечения, регламентируемая диаметром подводящей и отводящей гидромагистралей системы –  $S$ . Зная эти параметры, можно решить вопрос о наличии и степени развития кавитации. Как известно, кавитация будет иметь место, если выполняется следующее неравенство (1).

$$\sigma \leq \sigma_k . \quad (1)$$

Оптимальными параметрами будут такие, которые обеспечивают возникновение кавитации в высоконапорном пеногенераторе при минимальных потерях давления, т.е.

$$\sigma = \sigma_k \text{ или } \xi = \beta \sigma_k , \quad (2)$$

где  $\beta$  – параметр, зависящий от противодействия ( $\beta = 1 - P_2/P_1$ );

$\sigma_k$  – критическое число кавитации ( $\sigma_k = P_1/(\rho v^2)$ ).

Для нахождения искомых критических чисел кавитации используется уравнение (3).

$$\sigma_k = 4,54\sqrt{n/m}\xi^{0,4}, \quad (3)$$

где  $n=S/S_c$ ;  $m=\alpha_k/\alpha_\delta$ .

Откуда получаем:

$$\sigma_k = 4,54/m \times n^{2,5} \xi^{0,4}. \quad (4)$$

Коэффициент гидродинамического сопротивления в момент возникновения кавитации принимался равным коэффициенту сопротивления в квадратичной области  $\xi=\xi_{кв}$ , который определялся как сумма коэффициентов гидродинамического сопротивления конфузора и диффузора [2, 3].

$$\xi_{кв} = k_{конф} (1/n^2)(1-1/\varepsilon)^2 + \sin \alpha_\delta (1-1/n)^2, \quad (5)$$

где  $k_{конф}$  – эмпирический коэффициент [5];

$$\varepsilon = 0,57 + 0,043/(1,1-n).$$

Ставится задача отыскания таких значений  $n$  и  $\alpha_\delta$  при заданных параметрах течения жидкости  $Q, P_1, P_2$  геометрических характеристик, зависящих от параметров гидросистемы  $\alpha_k$  и  $S$  чтобы можно было гарантировать возникновение кавитации в высоконапорном пеногенераторе.

Предлагается численное решение данной задачи. В силу уравнения (2) для выполнения неравенства (1) нам достаточно так определить  $n$  и  $\alpha_\delta$ , чтобы:

$$\xi_{кв} = \beta \sigma_k. \quad (6)$$

Анализ формул (4) и (5) показывает, что существует такая функция  $\alpha_\delta=f(n)$ ,  $0 < n < 1$ , что при любом  $n \in (0,1)$  и  $\alpha_\delta=f(n)$  равенство (6) будет выполнено. Подставляя в формулы (4) и (5) при каждом  $n$  вместо  $\alpha_\delta$  значение  $f(n)$ , мы можем построить график  $\alpha_k=\varphi_n$ .

Вычисления производятся по следующей схеме. Фиксируется значение угла конфузора  $\alpha_k$  ( $\alpha_k=10^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 40^\circ$ ). Затем для каждого из значений  $\beta=0,1, 0,2, \dots, 0,7$  организуется цикл по  $n$ , которое изменяется от 0,01 до 0,9 с шагом 0,01. Каждый шаг этого цикла включает в себя нахождение методом половинного деления  $\alpha_\delta$  как корня уравнения (6) с точностью до  $2^{-8}$  градусов (если на отрезке от  $1^\circ$  до  $20^\circ$  корня нет, то полагается  $\alpha_\delta=20^\circ$ ) и вычисление соответствующего значения  $\sigma_k$ . После этого строятся графики зависимости  $lg\sigma_k$  от  $n$ . Используя полученные зависимости, расчет оптимальных параметров производится сле-

дующим образом. Для заданных параметров  $Q, P_1, P_2, \beta$  вычисляем  $\sigma_k$  и  $lg\sigma_k$ . По построенным графикам определяем  $n$ , которое соответствует значению  $\sigma_k = \sigma$ .

Тогда в силу уравнений (4) и (6):

$$\alpha_0 = \alpha_k n^{2.5} \beta^{0.4} \sigma_k^{1.4} / 4,54. \quad (7)$$

Найденные параметры  $n$  и  $\alpha_0$  высоконапорного пеногенератора обеспечивают возникновение в нем кавитации при минимально возможных потерях давления.

При необходимости получения в пеногенераторе более развитого кавитационного режима задаем критическим числом кавитации  $\sigma_k > \sigma_k$  и по построенным графикам и формуле (7) определяем необходимые геометрические размеры высоконапорного пеногенератора. Критический параметр кавитации для пеногенератора с новыми геометрическими размерами можно определить по формуле (8).

$$K_{sp} = 1 - \xi' / \sigma_k', \quad (8)$$

где  $\xi'$  – коэффициент гидродинамического сопротивления при найденных размерах высоконапорного пеногенератора по формуле (5).

Степень развития кавитации определяется сравнением критического параметра кавитации и параметра кавитации  $K$ , определяемого по уравнению (9).

$$\left( \xi^{kav} / \xi \right)_{max} = 1 / (1 - K_{sp}). \quad (9)$$

Данная методика расчета оптимальных параметров кавитационных эжекторов-смесителей работающих в кавитационном режиме, позволяет при наличии основных характеристик высоконапорного пеногенератора решить вопрос о наличии и степени развития кавитации.

### Литература

1. Сточек, Н. П. Гидравлика жидкостных ракетных двигателей / Н. П. Сточек, А. С. Шапиро. – М.: Машиностроение, 1983. – 128 с.
2. Альтшуль, А. Д. Примеры расчетов по гидравлике / А. Д. Альтшуль. – М.: Стройиздат, 1976. – 255 с.
3. Рабинович, Е. З. Гидравлика / Е. З. Рабинович. – М.: Недра, 1980. – 278 с.

УДК 532.628:614.843

## Методика определения расчетных параметров и построения графика движения волны прорыва по водотоку

Карпенчук И. В., Стриганова М. Ю., Киевец И. М.

Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

Разрушение гидротехнического сооружения напорного фронта с образованием волны прорыва вызывает катастрофическое затопление местности, причиняя значительный материальный ущерб и создавая угрозу жизни населения. Одним из основных факторов управления ликвидацией чрезвычайных ситуаций при разрушении напорных гидротехнических сооружений является заблаговременное прогнозирование.

Для представления полной картины прохождения волны прорыва, оценка возможных последствий затопления и подготовки исходных данных для планирования мероприятий по защите населения, целесообразно построение графика движения волны прорыва.

### Расчет параметров волны прорыва

1. Высота волны прорыва в каждом расчетном створе определяется по формуле

$$h_{\max} = 0,1H \left[ 0,2 \cdot \frac{L \cdot i}{H} \left( \frac{L \cdot i}{H} - 8,5 \right) + 6 \right], \quad (1)$$

где  $L$  – расстояние от створа разрушенной плотины до расчетного створа

Максимальная глубина потока в расчетном створе

$$H_i = h_{bi} + h_6 \quad (2)$$

2. Максимальная скорость тела волны (гребня) в каждом расчетном створе

$$V = \frac{0,6\sqrt{H^{1,33} \cdot i}}{n \left( \frac{L \cdot i}{H} \right)^{0,37}} \quad (3)$$

Скорость течения в расчетном створе

$$V_i = V_0 + V, \quad (4)$$

где  $V_0$  – скорость течения до прихода волны.



При построении графика движения волны прорыва для расчета времени добега волны для расчетного створа среднюю скорость движения волны на участке предлагается определять по формуле

$$V_{ср}^{zp} = \frac{0,6\sqrt{H^{1,33} \cdot i}}{n \left( \frac{L \cdot i}{2H} \right)^{0,37}} \quad (5)$$

Скорость фронта волны в каждом расчетном створе можно определить по формуле И.В.Еглазарова

$$C_i^{\phi p} = V_0 + \sqrt{gh_6} \left( 1 + \frac{3}{4} \cdot \frac{h_{bi}}{h_6} \right) \quad (6)$$

Скорость хвоста волны прорыва в каждом расчетном створе будет связана с временем прохождения волны через данный створ

$$V_i^{xh} = \frac{L_i}{t_i + T_i}, \quad (7)$$

где  $L_i$  - расстояние до расчетного створа от нулевого (створа гидроузла);

$t_i$  - время добега волны до расчетного створа;

$T_i$  - время прохождения волны через расчетный створ.

3. Время прохождения волны через створ разрушенного гидроузла предлагается по формуле:

$$T_0 = \frac{4,5 \Omega_{зсрк}}{B\sqrt{2gH}} \quad (8)$$

Время прохождения волны прорыва через расчетный створ можно определить по зависимости  $T_i = t_i + 1,024T_0$  . (9)

Время добега волны фронта волны

$$t_i^{\phi p} = \frac{L_i}{C_i^{\phi p}} \quad (10)$$

Время добега волны гребня до расчетного створа

$$t_i^{zp} = \frac{L_i}{V_{ср}^{zp} + V_0} \quad (11)$$

Время добега волны хвоста волны  $e_i^{xh} = t_i + T_i$  . (12)

Таким образом определены основные скоростные ( $C_{фр}$ ,  $V_{гр}$ ,  $V_{хв}$ ) и временные (время добегания  $t_{фр}$ ,  $t_{гр}$ ,  $t_{хв}$  и время прохождения волны  $T$ ) параметры волны прорыва в расчетных створах водотока.

#### Построение графика движения волны прорыва.

1. В соответствии с картой местности, по которой возможно прохождение волны прорыва, водоток (река) разбивается на участки расчетными створами. Створы рационально проводить нормально к динамической оси потока, в местах расположения населенных пунктов, ответственных сооружений, промпредприятий. Нулевым створом принимается створ разрушенного гидроузла, первый расчетный участок начинается от нулевого створа и оканчивается 1-м створом, второй участок от нулевого створа до 2-го створа и т.д.

2. Определяем параметры волны в нулевом створе.

Высота волны прорыва в нулевом створе  $h_0=0,6H$ . (13)

3. Находим основные режимы движения волны прорыва на первом участке и параметры, характеризующие ее в первом створе.

- максимальную высоту волны в 1-м створе по формуле (1);
- максимальную скорость тела волны по формуле (3);
- скорость волны на 1-м участке находим по формуле (5).
- время добегания волны до 1-го створа;
- скорость фронта волны в первом створе по формуле (6);
- время прохождения волны через 1-й створ по формуле (9);
- время добегания хвоста волны до 1-го створа по формуле (12).

Аналогично рассчитываются режимы движения волны прорыва и параметры, характеризующие на втором участке и во 2-м створе; на последующих участках и створах.

По данным, полученным на основе расчета, строится график прохождения волны прорыва. Створы рационально проводить в местах расположения населенных пунктов, важных объектов и сооружений, мостов, которым угрожает прохождение волны прорыва.

**Интенсификация процесса флотации  
сильвинитовой руды**

Ледян Ю. П., Селивончик В. В., Пастухов А. В.,  
Башкардина Е. А.

Белорусский национальный технический университет

Флотация является одним из основных технологических процессов, определяющим эффективность переработки сильвинитовой руды. На обогатительных фабриках «ПО «Беларуськалий» процесс флотации состоит из трёх – четырёх стадий. На первой стадии (основная флотация) получают черновой концентрат, который затем подвергается двух (а на некоторых фабриках и трёхкратной) перечистке.

Минерализованная пена, образующаяся во флотационной камере на поверхности пульпы содержит не только гидрофобные частицы хлорида калия, но и достаточно большое количество гидрофильных частиц хлорида натрия и глинистых шламов, попадающих в пену в результате механического выноса.

Для снижения количества глинистых шламов и хлорида натрия во флотационном концентрате минерализованную пену необходимо подвергать перечисткам. С этой целью черновой концентрат разбавляют маточным раствором в общем сливном желобе флотокамер основной флотации.

Как основная флотация, так и перечистки осуществляются в стандартных флотационных многокамерных машинах механического типа в которых пена, содержащая частички флотированного минерала, создаётся с помощью механических импеллеров. В мировой практике применяются импеллеры самых различных конструкций, однако, все они по принципу действия практически ничем не отличаются от центробежного насоса.

Под действием центробежной силы, пульпа циркулирует внутри флотационной камеры, насыщается мелкодисперсными пузырьками воздуха, которые вместе с гидрофобными частицами хлорида калия подымаются вверх. Всплывающая на поверхность минерализованная пена сливается через сливной порог флотационной камеры в общий жёлоб, в котором минерализованная пена всех флотационных камер, осуществляющих флотацию или перечистку, размывается маточным раствором, пре-

вращаясь в суспензию, содержащую как гидрофобные частицы (KCl), так и гидрофильные (NaCl).

Образовавшаяся в результате размывания минерализованной пены маточным раствором суспензия поступает на первую перечистку, которая осуществляется во флотокамерах. В перечистных камерах процесс флотации осуществляется точно таким же образом, как и в камерах основной флотации. В результате осуществления первой перечистки качество флотационного концентрата возрастает, вследствие чего увеличивается содержание хлорида калия и уменьшается содержание нерастворимого остатка (глинистых шламов) и хлорида натрия.

Пена, образующаяся в результате первой перечистой флотации, сливается в общий желоб, также где разбавляется маточным раствором и которая затем поступает на вторую перечистку. Пенный продукт второй перечистки в большинстве случаев подаётся на фильтрацию, и образующийся концентрат (кек) направляют на выщелачивание, после которого процесс обогащения и переработки руды завершается.

В ходе осуществления процесса флотационного обогащения в конечном продукте остается сравнительно небольшое количество нерастворимого остатка (глинистых шламов) и NaCl. Хлорид натрия содержится как в сростках кристаллов, состоящих из KCl и NaCl, так и в виде отдельных частичек хлорида натрия, механически унесенных в пенный слой пузырьками воздуха.

Интенсификация процесса флотации направлена на повышение качества флотационного концентрата при уменьшении трудозатрат, связанных с проведением процесса.

Эта задача может быть решена в результате использования разработанного в Белорусском национальном техническом университете способа каскадной флотации, совмещенного с методом вторичного обогащения.

Сущность способа каскадной флотации состоит в том, что создание пены в поверхностном слое осуществляется за счет струй маточного раствора, подаваемых на поверхность пульпы через специальные форсунки, обеспечивающие эжекционный подсос атмосферного воздуха. Аэрированная воздухом струя маточного раствора ударяется о поверхность пульпы и при этом увлекает с собой вглубь жидкой фазы дополнительное количество воздуха, который затем подымается вверх в виде мелко-

дисперсных пузырьков, создавая на поверхности пульпы минерализованный слой пены.

Разработанный способ флотации не требует дополнительных затрат энергии, т.к. для его реализации не требуется использования перемешивающих устройств, а создание слоя пены осуществляется за счет маточного раствора, который ранее использовался для получения суспензии на второй перемешке.

Вторичное обогащение минерализованной пены в поверхностном слое осуществляется за счет подачи маточного раствора на поверхность минерализованной пены непосредственно во флотационной камере из специального устройства.

В ходе выполнения исследований были изготовлены и испытаны на сильвинитовой обогатительной фабрике третьего рудоуправления «ПО «Беларуськалий» (СОФ ЗРУ) пилотные установки каскадной флотации и вторичного обогащения в поверхностном слое.

Проведенные испытания показали работоспособность и эффективность разработанных способов и нового технологического оборудования, внедрение которого позволит интенсифицировать процесс флотации, снизить экономические затраты и повысить извлечение хлорида калия из сильвинитовой руды.

### **Литература**

1. Абрамов, А. А. Флотационные методы обогащения / А. А. Абрамов. – М.: Недра, 1984. – 383 с.
2. Мещеряков, Н. Ф. Флотационные машины и аппараты / А. Ф. Мещеряков. – М.: Недра, 1982. – 280 с.

# Строительные и дорожные машины

УДК 69.002.5 – 82

## Математическая модель многодвигательного гидропривода строительных и дорожных машин

Вавилов А. В., Котлобай А. Я., Котлобай А. А.  
Белорусский национальный технический университет

Для обеспечения синхронности работы гидравлических моторов привода ходового оборудования и активных рабочих органов многофункциональных строительных и дорожных машин применяются делители потока [1].

Двухпоточный делитель потока (рис. 1) состоит из корпуса 1, с ротором 2, вращающимся в подшипнике скольжения 3 [2]. На поверхности ротора 2 образованы продольные пазы 4 с центральными углами  $\alpha$ , связанные с источником давления. В подшипнике скольжения 3 образованы рабочие камеры 5, 6 с центральными углами  $\beta_1, \beta_2$ , связанные с каналами подключения полостей гидроцилиндров 7, 8, со штоками нагруженными грузом массой  $m_1, m_2$ . Рабочие камеры 5, 6 разделены перешейками с центральными углами  $\gamma$ . Между полостями рабочих камер 5, 6 неизбежны перетечки [3], условно образована гидролиния с дросселем 9.

При вращении ротора 2 полости продольных пазов 4 периодически соединяются с полостями камер 5, 6, соединяя рабочие полости гидроцилиндров 7, 8 с источником давления.

Характеристики расхода рабочей жидкости по контурам потребителей [4]:

$$\left. \begin{aligned} Q_1(t) = Q_i, Q_2(t) = 0; \frac{2\pi m}{\omega_a k} \leq t < \frac{2\pi(b_1 + a_1 + m)}{\omega_a k}; \\ Q_1(t) = 0, Q_2(t) = Q_i; \\ \frac{2\pi(b_1 + a_1 + m)}{\omega_a k} \leq t < \frac{2\pi(b_1 + b_2 + 2a_1 + m)}{\omega_a k}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $t = \frac{\varphi}{\omega_a}$ ,  $\omega_a$  – частота вращения ротора делителя потока;  
 $Q_i = q\omega_i$  – расход рабочей жидкости, подаваемой насосом в делитель потока;  $q$  – объемная постоянная насоса;  $\omega_i$  – частота вращения вала насоса;  $Q_1, Q_2$  – расход рабочей жидкости,  
 $a_1 = \gamma/\theta; b_1 = \beta_1/\theta; b_2 = \beta_2/\theta; m$  – число циклов вращения ротора 2 делителя потока;  $\theta$  – угол поворота ротора 2, в течение которого совершается полный цикл подачи рабочей жидкости;  
 $k = 2\pi/\theta$  – коэффициент дискретизации.

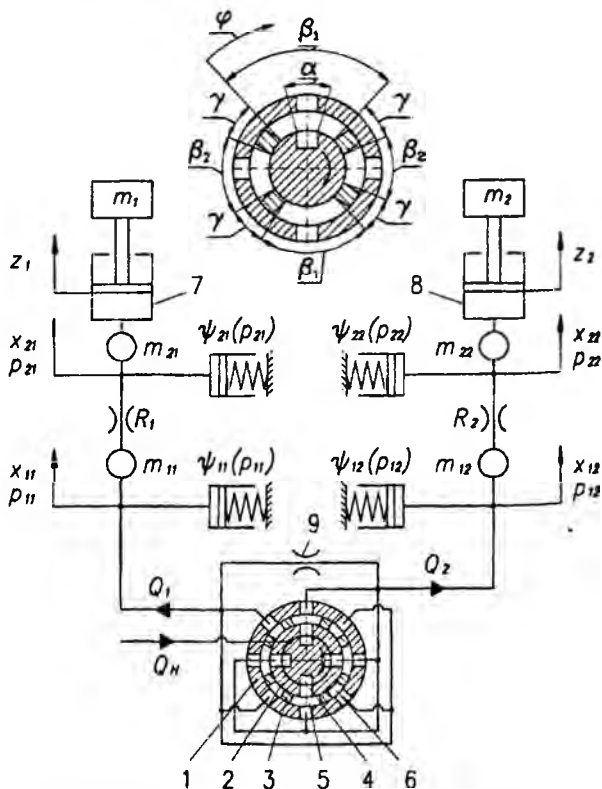


Рис. 1. Расчетная схема гидравлического привода

В математической модели [5], жидкость сосредоточена в узле  $Y_{1i}$  (массой  $m_{1i}$ ) – трубопроводе длиной  $l_i$ ; и в узле  $Y_{2i}$  (массой  $m_{2i}$ ) – гидроцилиндре с диаметром  $d_{ci}$ . Коэффициенты податливости  $\psi_{1i}(p_{1i}), \psi_{2i}(p_{2i})$ .  $l_i = n_{1i}d$ ,  $d_{ci} = n_{2i}d$ , где  $d$  – условный проход.  $z_i$  – перемещение поршня гидроцилиндра;  $x_{1i}, x_{2i}$  – перемещение столба рабочей жидкости в узлах  $Y_{1i}, Y_{2i}$ ;  $x_{1i} = z_i n_{2i}^2$ ;  $m_i$  – масса груза;  $i$  – номер линии.

Уравнение движения жидкости на участке  $Y_{1i} - Y_{2i}$

$$a_{1i} \frac{d^2 z_{1i}}{dt^2} + a_{2i} \frac{dz_{1i}}{dt} + a_{3i} \left( \frac{dz_{1i}}{dt} \right)^2 \operatorname{sgn} \frac{dz_{1i}}{dt} + p_{2i} = p_{1i}, \quad (2)$$

$$a_{1i} = \rho n_1 n_2^2 d; a_{2i} = 27,5 \frac{\rho v n_1 n_2^2 d}{f}; a_{3i} = n_2^2 \left( 0,443 \frac{k_\varepsilon \rho n_1 d}{\sqrt{f}} + \frac{\xi \rho}{2} \right),$$

$\rho$  – плотность жидкости;  $v$  – кинематическая вязкость жидкости;  $k_\varepsilon$  – коэффициент шероховатости трубопровода;  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления;  $f$  – площадь шланга магистрали насоса.

Преобразуя уравнения баланса мгновенных объемных расходов жидкости для узлов  $Y_{1i}, Y_{2i}$  получим

$$\left. \begin{aligned} \frac{dz_{1i}}{dt} &= b_{1i} Q_i - b_{2i} \psi_{1i}(p_{1i}) \frac{dp_{1i}}{dt} - b_{3i} (p_{1i} - p_{1(i+1)}) \\ \frac{dz_i}{dt} &= \frac{dz_{1i}}{dt} - (z_{\min i} + z_i) \psi_{2i}(p_{2i}) \frac{dp_{2i}}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $b_{1i} = \frac{4}{\pi n_{2i}^2 d^2}$ ;  $b_{2i} = \frac{n_{1i} d}{n_{2i}^2}$ ;  $b_{3i} = \frac{D s^3}{3 L v \rho n_{2i}^2 d^2}$ ;  $D$  – средний диаметр зазора ротора и подшипника скольжения делителя потока;  $s$  – номинальная величина зазора;  $L$  – длина зазора;

Дифференциальное уравнение движения поршня исполнительного гидроцилиндра, перемещающего груз массой  $m_i$ :



$$\frac{d^2 z_i}{dt^2} = \left( \frac{\pi}{4} n_{2i}^2 d^2 p_{2i} - G_i - k_g \frac{dz_i}{dt} - P_{mp} sqn \frac{dz_i}{dt} \right) \frac{1}{m_i}, \quad (4)$$

где  $G_i$  – нагрузка на рабочий цилиндр;  $k_g$  – коэффициент вязкого трения о стенки цилиндра;  $P_{mp}$  – сила сухого трения.

Синхронность работы исполнительных механизмов гидропривода может быть оценена относительной погрешностью

$$\Delta = \frac{|z_i(t) - z_{i+1}(t)|}{z_{i(i+1)\max}}. \quad (5)$$

Анализ уравнений (3) показывает, что величина  $\Delta$  увеличивается при увеличении разности масс  $m_i$ , величины  $s$ .

Таким образом, представлена математическая модель гидропривода с делителем потока объемного типа, позволяющая обосновать параметры делителя потока при разработке многомоторных приводов строительных и дорожных машин.

### Литература

1. Вавилов, А. В. Формирование структуры гидрообъемной трансмиссии компактного универсального погрузчика / А. В. Вавилов, А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай // Строительная наука и техника. – 2007. – № 4. – С. 58 – 66.
2. Делитель потока: пат. 3362 Респ. Беларусь, МПК7 F 15B 11/22 / В. А. Коробкин, А. Я. Котлобай, А. Н. Ивановский, Ю. А. Андрияненко, Б. А. Луцков, А. А. Котлобай; заявитель Республиканское унитарное предприятие «Минский тракторный завод». – № u 20060499; заявл. 28.07.06; опубл. 28.02.07 // Афiцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 1. – С. 189.
3. Башта, Т. М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика / Т. М. Башта. – М.: Машиностроение, 1972. – 320 с.
4. Коробкин, В. А. Обоснование параметров агрегата дозирования гидропривода строительных и дорожных машин / В. А. Коробкин, А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай, Ю. А. Андрияненко // Строительная наука и техника. – 2007. – № 4. – С. 51 – 57.
5. Метлюк, Н. Ф. Динамика пневматических и гидравлических приводов автомобилей / Н. Ф. Метлюк, В. П. Автушко. – М.: Машиностроение, 1980. – 231 с.

**Агрегат дозирования гидропривода  
строительных и дорожных машин**

Котлобай А. Я., Котлобай А. А.

Белорусский национальный технический университет

Наиболее перспективным механизмом передачи мощности от двигателя к рабочему оборудованию строительных и дорожных машин является объемный гидропривод. Увеличение давления в гидросистемах до 25 МПа и выше не требует увеличения габаритов гидроагрегатов и соединительных трубопроводов, и позволяет передавать высокие мощности исполнительным механизмам. Однако, гидравлика имеет один существенный недостаток: сложность деления потока мощности на несколько потребителей. При разветвлении гидравлической магистрали появляется дифференциальная связь между потребителями: потребитель с низким потреблением мощности неизбежно приведет к падению давления во всем контуре, что не позволит потребителю, оказавшемуся в более тяжелых условиях, развить необходимое усилие либо крутящий момент.

В гидроприводе поток мощности может быть разделен применением специальных следящих систем, либо путем добавления в цепь механических и электрических приводов.

В некоторых случаях можно обойтись без деления потока мощности. В автогрейдерах успешно применяются сложные гидросистемы с одним насосом и десятком исполнительных механизмов – сервоприводов тормоза и сцепления, гидроцилиндров и гидромоторов. Технологический цикл автогрейдера не требует постоянного совмещения рабочих движений, гидроцилиндры и гидромоторы активируются попеременно, а в исключительных случаях опыт машиниста позволяет ему мириться с возникающей при одновременном включении контуров дифференциальной связью между ними.

Однако в полноповоротных экскаваторах ситуация меняется. Рабочий цикл копания гидравлическим экскаватором практически целиком построен на совмещении двух движений: опускание стрелы и напор рукояти; напор рукояти и поворот ковша; подъем либо опускание стрелы и поворот платформы – в отвал либо в забой. Наличие дифференциальной связи между гидроцилинд-

рами делает выполнение работ невозможным: вместо подъема стрелы с поворотом стрела начнет опускаться за счет возрастания скорости поворота платформы. Отказ же от совмещения рабочих движений уменьшит производительность машины практически вдвое.

Выход из сложившейся ситуации был найден в применении на полноповоротных экскаваторах сдвоенных насосов. Гидросистема машины сконструирована таким образом, что при подключении одного потребителя поток обоих насосов суммируется и направляется в этот потребитель; при включении же двух потребителей каждый остается работать со своим насосом, изолированно от другого. Габарит моноагрегата превышает габарит каждого отдельного насоса в 6...10 раз.

В дорожно-строительной отрасли наметилась тенденция создания сложных машин для выполнения целого ряда технологических операций за один проход. Например, машины для термического восстановления и ремонта асфальтобетонных покрытий при ремонте дорожного полотна осуществляют разогрев старого полотна, срез его фрезой, дозированное смешивание с новыми минеральными наполнителями, также дозированный впрыск в смесь вяжущего, повторное перемешивание смеси, ее транспортировку вдоль машины, укладку на полотно и последующее уплотнение. Все операции выполняются машиной одновременно, на ходу. Дифференциальные связи между контурами рабочих органов таких машин недопустимы. В связи с этим применяется принцип «каждому контуру свой насос».

В отечественной промышленности наиболее развит подход в создании моноагрегатных насосных станций посредством установки на двигатель раздаточной коробки, с присоединением к ней необходимого количества небольших по габариту гидронасосов [1].

Применяются варианты последовательной установки нескольких насосов (как правило, не более трех) [2]. Экономится поперечный габарит моноагрегата за счет отсутствия раздаточной коробки, однако увеличивается продольный, а также вступает в силу ограничение мощностей: все последующие насосы не могут реализовывать мощность, в сумме превышающую 60% номинальной мощности первого насоса. Ряд западных фирм-производителей гидроаппаратуры предлагают тандемные насо-

сы. Sauer-Danfoss выпускает продольный тандемный насос, где два блока цилиндров установлены на одном валу и обращены опорно-распределительными дисками друг к другу.

В ряде гидравлических систем отбора мощности для синхронизации перемещения рабочих органов находят применение агрегаты дозирования, работающие в режимах деления и суммирования потоков рабочей жидкости. Агрегат дозирования обязателен в технологических машинах, агрегатированных с шасси, насыщенных исполнительными органами, питающихся от насоса шасси.

Агрегат дозирования может быть решен технически, как роторный (рис. 1).

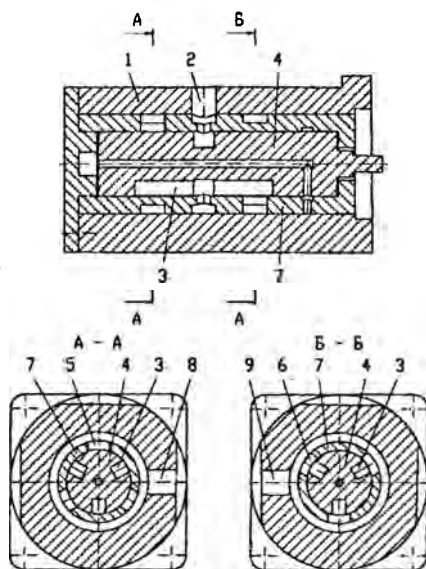


Рис. 1. Агрегат дозирования

При работе агрегата дозирования в режиме деления потока, рабочая жидкость через канал 1 корпуса 2 поступает в полости продольных каналов 3 ротора 4, откуда, периодически, через продольные каналы 5, 6, подшипника скольжения 7, в магистрали потребителей, подключенные к каналам 8, 9 корпуса 1.

Основная особенность работы агрегата дозирования: цикличность подачи рабочей жидкости в напорные магистрали потребителей, обеспечивающая независимость работы контуров.

Изменение числа потоков достигается изменением числа групп продольных каналов подшипника скольжения, и каналов подключения контуров потребителей.

Объем рабочей жидкости, поступающий в напорную магистраль данного за цикл пропорционален центральному углу канала 5, 6, обратно пропорционален частоте вращения ротора 4, и параметрами дискретизации потока, определяемой числом каналов 3, и 5, 6 [3].

Конструктивно агрегат дозирования может быть решен, как отдельный агрегат, устанавливаемый в рациональном, с точки зрения компоновочных решений, месте трансмиссии, компоноваться совместно с насосом [4].

Разработка предлагаемой конструктивной схемы позволит создать агрегат дозирования с заданными параметрами расхода рабочей жидкости по напорным магистралям потребителей, обеспечивает модульное построение дозирующей системы.

## Литература

1. Караваев, В. А. ОАО «Пневмостроймашина» – ведущее российское предприятие по проектированию, изготовлению и продаже аксиально-поршневых гидромашин / В. А. Караваев // Строительные и дорожные машины. – 2000. – № 6. – С. 5–8.

2. Вавилов, А. В. Многопоточные насосные агрегаты многофункциональных технологических машин / А. В. Вавилов, А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай // Инженер-механик. – 2006. – № 4. – С. 10–14.

3. Коробкин, В.А. Обоснование параметров агрегата дозирования гидропривода строительных и дорожных машин / В. А. Коробкин, А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай, Ю. А. Андрияненко // Строительная наука и техника. – 2007. – № 4. С. 51 – 57.

4. Делитель потока: пат. 2841 Респ. Беларусь, МПК7 F 15B 11/22 / А. Я. Котлобай, А. А. Котлобай; заявитель Белорусский национальный технический университет. – № u 20050707; заявл. 09.11.05; опубл. 30.03.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 3. – С. 198.

# Тракторостроение

УДК 629.214.001.2

## Методика построения универсальной потребительской характеристики трактора

Гуськов А. В.<sup>1</sup>, Гуськов В. В.<sup>2</sup>, Радченко П. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>РУП «Минский тракторный завод»

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

В связи с поступлением в сельское хозяйство комбинированных сельскохозяйственных машин, которые требуют отбора мощности через ВОМ на привод активных рабочих органов, потребовалось разработать методику построения универсальной характеристики трактора, по которой можно было бы судить о тяговой и ротационной мощностях, их рациональному соотношению, тягово-сцепным качествам и другим показателям машины. Существующие тяговые и потенциальные характеристики ответа на этот вопрос не дают.

Основанием для такой характеристики, которую мы назовем универсальной потребительской характеристикой трактора (УПХТ), служит известное соотношение

$$P_{кр} = F_{кр} V_{д}, \quad (1)$$

где  $P_{кр}$  – тяговая мощность (мощность на крюке трактора), кВт;  $F_{кр}$  – крюковое усилие, Н;  $V_{д}$  – действительная скорость движения, м/с.

И

$$V_{д} = P_{кр} / F_{кр}. \quad (2)$$

В свою очередь

$$P_{кр} = P_{\epsilon} \eta_{т}, \quad (3)$$

где  $P_{\epsilon}$  – мощность двигателя, Вт;  $\eta_{т}$  – тяговый коэффициент полезного действия.

$$\eta_{т} = \eta_{тр} \eta_{r} \eta_{\delta} \eta_{спр}, \quad (4)$$

где  $\eta_{тр}$  – КПД, учитывающий потери мощности в трансмиссии;  $\eta_{r}$  – КПД, учитывающий потери мощности в ходовой части;  $\eta_{\delta}$  – КПД, учитывающий потери скорости;  $\eta_{спр}$  – КПД, учитывающий потери мощности на смятие грунта движителем и образование колес.

Произведение  $\eta_{тр}\eta_r$  показывает совершенство конструкции трактора, а  $\eta_{\delta}\eta_{снр}$  – совершенство его тягово-сцепных качеств,

$$\eta_{\delta}\eta_{снр}=(1-\delta)F_{кр}/F_k=(1-\delta)(1-F_{снр}/F_k), \quad (5)$$

где  $F_{снр}$  – сила сопротивления движению, образующаяся за счет смятия грунта движителем и образования колеи, Н;  $F_k$  – касательная сила тяги, Н;  $\delta$  – буксование, в долях единицы.

При установившемся движении

$$F_k = F_{снр} + F_{кр}. \quad (6)$$

Зависимость буксования трактора от тяговой нагрузки носит сложный характер и зависит от многих факторов и, прежде всего, от почвогрунта и его фона.

Существует много зависимостей  $\delta=f(F_{кр})$ . Однако наиболее приемлемой и адекватной реальной является зависимость предложенная НАТИ [1], которая имеет вид:

$$\varphi_{кр} = \varphi_{кр \max} - Ae^{-B\delta}, \quad (7)$$

где  $\varphi_{кр}$  – коэффициент крюкового усилия (коэффициент использования сцепного веса),  $\varphi_{кр}=F_{кр}/G$ , где  $G$  – эксплуатационная масса трактора, Н;  $\varphi_{кр \max}$  – максимальный коэффициент крюкового усилия;  $A$  и  $B$  – эмпирические коэффициенты.

Формулу (7) можно преобразовать следующим образом: прологорифмируем выражение (7):

$$\ln(\varphi_{кр \max} - \varphi_{кр}) = -\ln(Ae^{B\delta}). \quad (8)$$

И

$$\delta = -\ln(\varphi_{кр \max} - \varphi_{кр}) / (B \ln A). \quad (9)$$

Заменим  $\delta$  в формуле (5) и значения  $F_k = \varphi_{кр}G$ ,  $F_{снр} = fG$ ,

$$\eta_r = \eta_{тр}\eta_r \left[ 1 + \frac{\ln(\varphi_{кр \max} - \varphi_{кр})}{B \ln A} \right] \left( 1 - \frac{f}{\varphi_{кр} + f} \right), \quad (10)$$

где  $f$  – коэффициент сопротивления движению трактора.

С учетом использования коэффициента запаса мощности  $\chi_s$  (коэффициента эксплуатационной нагрузки) формула (2) будет иметь следующий вид

$$V_d = \frac{(P_e - P_{ном})\chi_s\eta_{тр}\eta_r \left[ 1 + \frac{\ln(\varphi_{кр \max} - \varphi_{кр})}{B \ln A} \right] \left( 1 - \frac{f}{\varphi_{кр} + f} \right)}{F_{кр}}, \quad (11)$$

где  $P_{\text{вoм}}$  – общая мощность, отбираемая через ВОМ:

$$P_{\text{вoм}} = P'_{\text{вoм}} / \eta_{\text{вoм}},$$

где  $P'_{\text{вoм}}$  – мощность, отбираемая на привод активных органов агрегируемых машин;  $\eta_{\text{вoм}}$  – КПД, учитывающий потери мощности при передаче ее через ВОМ.

Результаты расчетов по формуле (11) приведены на рис. 1.

На рис. 1 пунктирными и штрихпунктирными линиями показаны действительная скорость движения и крюковой расход топлива при отборе мощности через ВОМ.

Из рис. 1 также видно, что максимум тягового КПД  $\eta_{\text{т max}}$  находится в области номинального крюкового усилия  $F_{\text{кр н}}$ . Если допустить снижение  $\eta_{\text{т max}}$  от точки А до точек  $A_1$  и  $A_2$  в пределах 5% - 6% (т.е. в пределах коэффициента эксплуатационной нагрузки  $\chi_3$ ), то получим диапазон рациональных крюковых усилий для данного трактора,  $D(F_{\text{кр}})$ , т.е. рабочий диапазон.

Точка В графика  $V_{\text{д}} = f(F_{\text{кр}}, \varphi_{\text{кр}})$  определяет действительную скорость движения при номинальном крюковом усилии, а точки  $B_1$  и  $B_2$  – рабочий диапазон скоростей  $D(V_{\text{д}})$ .

Если необходимо перейти к теоретическим скоростям движения  $V_{\text{т}}$ , то нужно учесть буксование трактора, т.е.  $V_{\text{д}} = V_{\text{т}}(1 - \delta)$ .

При использовании формулы (11) можно решить и обратную задачу: при заданной скорости движения и доли отбора мощности через ВОМ найти крюковое усилие и тем самым определить возможно ли агрегирование трактора с данной сельскохозяйственной машиной.

Интерес представляет определение удельного расхода топлива  $g_{\text{кр}}$  на крюке трактора.

$$g_{\text{кр}} = g_e / (m\eta_{\text{т}} + n\eta_{\text{вoм}}), \quad (12)$$

где  $g_e$  – эффективный расход топлива, кг/(э\*Вт\*ч);  $m$  – доля мощности, идущей на тягу;  $n$  – доля мощности, отбираемой через ВОМ.

Эти зависимости показаны на рис.1 штрихпунктирными линиями.



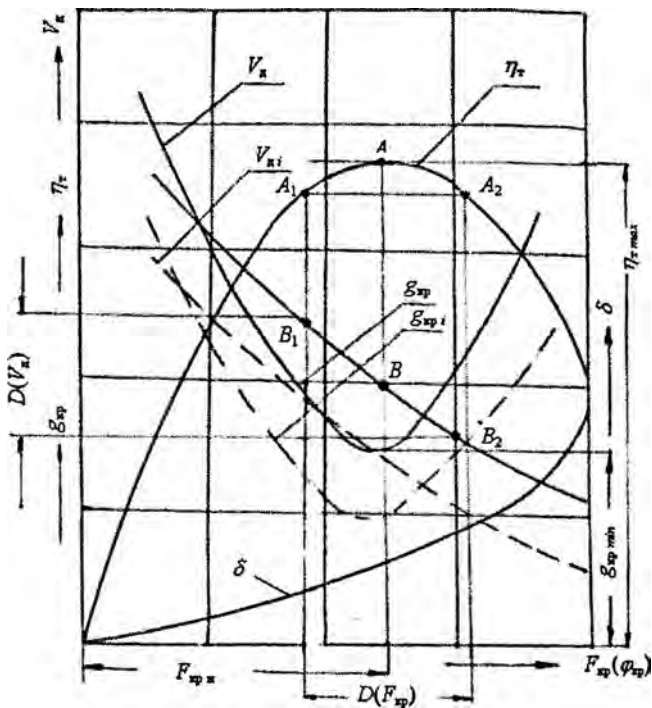


Рис. 1. Универсальная потребительская характеристика трактора

Таким образом, универсальная потребительская характеристика трактора позволяет оценить его потребительские свойства на стадии проектирования и дать заключение о его конкурентоспособности.

### Литература

1. Гуськов, В. В. Тракторы. Теория / В. В. Гуськов, И. П. Ксенович, Н. Ф. Богдан [и др.]; под ред. В. В. Гуськова. – М., 1998.
2. Зангиев, А. А. Производственная эксплуатация машино-тракторного парка / А. А. Зангиев, Г. П. Лышко, А. М. Скороходов. – М., 1996.
3. Колобов, Г. Г. Тяговые характеристики тракторов / Г. Г. Колобов, А. П. Парфенов. – М., 1972.

Жданович Ч. И., Плищ В. Н.

Белорусский национальный технический университет

Для определения динамической нагруженности элементов ходовых систем гусеничных тракторов необходимо знать упругую характеристику подвески. В настоящее время на гусеничных тракторах находят широкое применение индивидуальные торсионные подвески опорных катков. Для каждой конкретной конструкции характеристику торсионной подвески определяют через упругую характеристику торсионного вала.

Целью работы является определение упругих характеристик торсионных валов  $\varnothing 38$  мм и  $\varnothing 42$  мм, используемых на гусеничных тракторах «Беларус».

Жесткость торсионного вала  $m_{т1}$  определяется выражением [1, с. 15]:

$$m_{т1} = J_{р11} \cdot G_{1111} / L_{т1}, \quad (1)$$

где  $J_{р11}$  – полярный момент инерции сечения торсионного вала;  $G_{1111}$  – модуль упругости при сдвиге;  $L_{т1}$  – приведенная длина торсионного вала.

Полярный момент инерции сечения торсионного вала  $J_{р11}$  для вала круглого сечения [2, с. 127]:

$$J_{р11} = \pi D_{т1}^4 / 32, \quad (2)$$

где  $D_{т1}$  – наружный диаметр торсионного вала (рисунок 1).

Приведенная длина торсионного вала  $L_{т1}$  [3, с. 132]:

$$L_{т1} = l_{т1} + l_{еб1} + l_{ем1}, \quad (3)$$

где  $l_{т1}$  – конструктивная длина цилиндрической части торсионного вала;  $l_{еб1}$ ,  $l_{ем1}$  – эквивалентная длина переходного участка соответственно к большой и малой головкам торсиона.

Эквивалентные длины переходных участков  $l_{еб1}$  и  $l_{ем1}$  соответственно к большой и малой головкам торсиона, образованной дугой окружности радиуса  $R$  ( $R = 100 \dots 110$  мм) [3, с. 132]:

$$l_e = \frac{l_n}{48(D/D_{т1})^3} \left[ 8 + 10 \frac{D}{D_{т1}} + 15 \frac{(D/D_{т1})^3}{\sqrt{D/D_{т1} - 1}} \arctg \sqrt{\frac{D}{D_{т1}} - 1} \right], \quad (4)$$

где  $D$  – диаметр по впадинам шлиц большой или малой головок торсионов;  $l_n = D_{т1} \sqrt{((D/D_{т1} - 1)R/D_{т1} - ((D/D_{т1} - 1)/2)^2}$ .

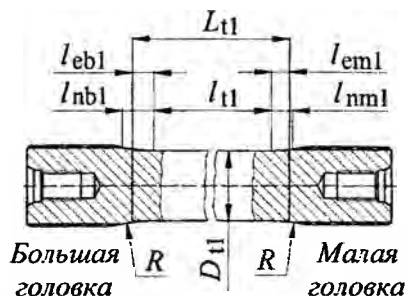
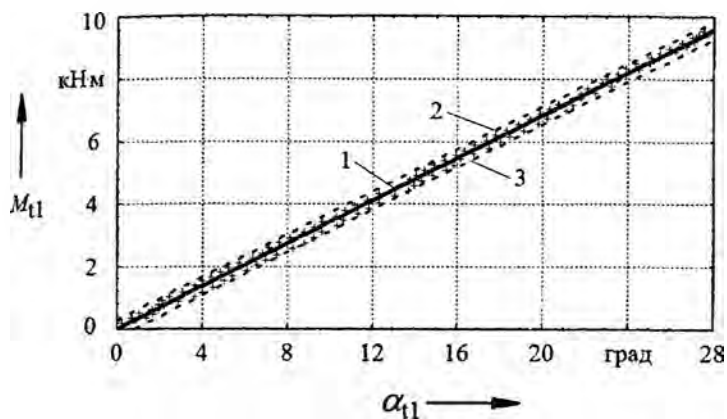


Рисунок 1 – Основные размеры торсионного вала

Жесткость торсионного вала, как видно из (1), прямо пропорциональна модулю упругости при сдвиге  $G_{III1}$ , который зависит от качества металла, технологии изготовления и упрочнения вала. Согласно данным, приведенным в [4, с. 616], для незакаленной стали 45ХН2МФА при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  модуль упругости при сдвиге  $G_{III1}$  составляет 87 ГПа, при  $100^{\circ}\text{C}$  – 82 ГПа, по данным [1, с. 19]  $G_{III1}$  для незакаленной стали составляет 81 ГПа, для закаленной 76,5 ГПа, по данным [5, с. 13]  $G_{III1}$  для торсионных сталей составляет 85 ГПа. Это подтверждает неоднозначность значения модуля упругости при сдвиге  $G_{III1}$  торсионных сталей, который существенно сказывается на упругой характеристике торсиона.

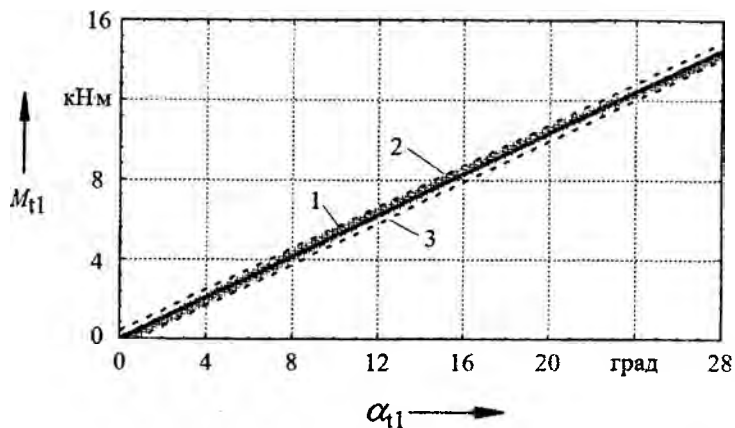
В связи с этим, жесткость торсионных валов  $m_{I1}$  была определена экспериментально. Также по экспериментальным данным был установлен модуль упругости при сдвиге  $G_{II1}$  для данных конструкций торсионных валов. Для этого был модернизирован стенд для испытания торсионов [6].

Результаты экспериментальных исследований торсионных валов  $\varnothing 38$  мм и  $\varnothing 42$  мм приведены на рисунках 2 и 3. Жесткость торсиона  $m_{I1}$  в результате обработки экспериментальных данных и определенная по известной зависимости  $m_{I1} = M_{I1}/\alpha_{I1}$  [1, с. 16], где  $M_{I1}$  – момент закрутки торсиона;  $\alpha_{I1}$  – угол закрутки, для вала  $\varnothing 38$  мм составила 342,426 Нм/град, для вала  $\varnothing 42$  мм – 518,687 Нм/град.



1 – упругая характеристика торсионного вала; 2 и 3 – верхняя и нижняя границы доверительного интервала экспериментальных данных с вероятностью 95%

Рисунок 2 – Экспериментальная упругая характеристика заневоленного торсионного вала  $\varnothing 38$  мм



1 – упругая характеристика торсионного вала; 2 и 3 – верхняя и нижняя границы доверительного интервала экспериментальных данных с вероятностью 95%

Рисунок 3 – Экспериментальная упругая характеристика заневоленного торсионного вала  $\varnothing 42$  мм

Для данных торсионных валов были определены модули упругости при сдвиге  $G_{III}$  с использованием экспериментальных упругих характеристик и зависимостей (1) – (4). В результате расчетов получено, что для вала  $\varnothing 38$  мм ( $L_{т1} = 723,404$  мм [ $l_{т1} = 694,677$  мм;  $D_{сб1} = 46,579$  мм;  $D_{ем1} = 44,023$  мм;  $R = 100$  мм];  $J_{рт1} = 204707,75$  мм<sup>4</sup>) модуль упругости при сдвиге  $G_{III}$  составил 69,33 ГПа, для вала  $\varnothing 42$  мм ( $L_{т1} = 731,078$  мм [ $l_{т1} = 709,345$  мм;  $D_{сб1} = 46,579$  мм;  $D_{ем1} = 44,023$  мм;  $R = 100$  мм];  $J_{рт1} = 305490,04$  мм<sup>4</sup>) соответственно 71,12 ГПа.

В результате проведенных исследований установлено:

- для торсионного вала  $\varnothing 38$  мм модуль упругости при сдвиге  $G_{III}$  составил 69,33 ГПа, для вала  $\varnothing 42$  мм - 71,12 ГПа;
- жесткость торсиона для вала  $\varnothing 38$  мм составила 342,426 Нм/град, для вала  $\varnothing 42$  мм – 518,687 Нм/град.

Проведенные расчеты показали, что при определении упругих характеристик торсионных валов необходимо уточнять для конкретных конструкций торсионов механические свойства материалов.

## Литература

1. Волков, Ю. П. Ходовая часть транспортных гусеничных машин. Ч. 2. Система поддрессоривания: учеб. пособие / Ю. П. Волков, В. Е. Ролле, А. Д. Самойлов. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997. – 142 с.
2. Подскребко, М. Д. Соппротивление материалов / М. Д. Подскребко. – Минск: ДизайнПРО, 1998. – 592 с.
3. Автомобили: Конструкция, конструирование и расчет. Системы управления и ходовая часть: учеб. пособие для вузов / А. И. Гришкевич [и др.]; под общ. ред. А. И. Гришкевича. – Мн.: Вышэйшая школа, 1987. – 200 с.
4. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин [и др.]; под общ. ред. В. Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
5. Ходовая часть гусеничных машин: учеб. пособие / В. Д. Галышев [и др.]; под общ. ред. В. Д. Галышева. – Ленинград: Изд-во ЛПИ им. М.И. Калинина, 1976. – 84 с.
6. Жданович, Ч. И. Модернизированный стенд для испытания торсионов / Ч. И. Жданович, В. Н. Плищ, В. В. Герашенко // Тракторы и с/х машины. – 2005. – №12. – С. 30 – 31.

## Вопросы диагностирования тракторов

Жуковский Ю. М.

Белорусский национальный технический университет

Для поддержания машин в технически исправном состоянии в отраслях, в которых эксплуатируется тракторная техника, до последнего времени широко применялась планово-предупредительная система технического обслуживания и ремонта (ТОР).

Плановость системы ТОР заключается в том, что все виды ТО проводятся после определенного времени работы трактора по заранее составленному плану-графику (который обычно имеется в руководстве по эксплуатации трактора). Ремонты хотя и планируются, но проводятся по потребности, определяемой после проведения ТО и диагностирования.

Предупредительный характер системы ТОР предполагает проведение мероприятий, предупреждающих возникновение неисправностей и отказов машин в период их использования.

Жесткая регламентация операций ТОР по наработке (или расходу топлива) часто не соответствует действительному техническому состоянию и особенностям конкретного трактора, не учитывает специфику его эксплуатации. Разнообразные условия эксплуатации (почвенно-климатические, технологические (по видам операций), степень загрузки трактора, квалификация персонала, уровень технического обслуживания и др.) по-разному влияют на интенсивность износа деталей тракторов. Кроме того, заложенные на стадиях проектирования и создания свойства и параметры машины в процессе ее изготовления не возможно воспроизвести с абсолютной точностью.

Вследствие этих причин при постановке тракторов на плановое обслуживание или ремонт одни машины действительно требуют сложных регулировочных и восстановительных работ, а другие, не выработав полного эксплуатационного ресурса, преждевременно разбираются, регулируются и ремонтируются. Это увеличивает расход запасных частей, нарушает их приработку и влечет за собой преждевременный выход из строя.

У тракторов, работающих в тяжелых условиях, ко времени планового обслуживания часто наблюдаются предельные изно-

сы отдельных узлов и деталей. Если своевременно не обнаруживать и не заменять изношенные узлы и детали, то это приводит к прогрессирующим износам и преждевременным поломкам в машинах. В результате снижаются выработка и межремонтная наработка тракторов, значительно увеличиваются затраты на их эксплуатацию, снижается безопасность работы.

По этим причинам в настоящее время большое внимание уделяется совершенствованию самой системы технического обслуживания, которая приобретает характер комбинированной системы, предусматривающей выполнение одной части операций в обязательном порядке, а другой – по потребности.

Система технического обслуживания машин по состоянию (а не по периодичности) заключается в плановом контроле (т.е. в диагностировании) состояния машин, в ремонте и в обслуживании их зависимости от этого состояния (т.е. по потребности).

Такая организация диагностических работ позволяет:

- более полно использовать технический ресурс агрегатов, узлов и тракторов в целом;
- исключить необоснованные разборки и регулировки узлов и тем самым уменьшить скорость изнашивания сопряжений, а также снизить трудоемкость ремонта и технического обслуживания;
- уменьшить простои МТА из-за технических неисправностей путем прогнозирования и предупреждения отказов;
- повысить экономические показатели работы тракторов.

Широкое внедрение диагностирования тракторов в различных категориях хозяйств и организаций является довольно сложной технико-экономической проблемой. Однако нынешний уровень развития науки и техники позволяет в принципе её целенаправленно решать.

По мере усложнения конструкций тракторов, повышения скоростей их движения, ужесточения требований к надежности агрегатов и к безопасности работы, актуальность вопросов диагностирования все больше возрастает.

В практике диагностирования тракторов на смену простым диагностическим приборам и средствам приходят все более сложные, в том числе электронные тестеры и системы. Они позволяют количественно оценить целый комплекс параметров рабочего процесса, износа деталей, зазоров в сопряжениях и

другие важные показатели, которые необходимы для достоверной оценки технического состояния узлов и агрегатов и для прогнозирования с высокой надежностью остаточного ресурса их работы.

В широком смысле цель диагностирования заключается в получении информации о техническом состоянии машины, в осуществлении анализа и прогноза этого состояния, в подготовке и принятии действий по управлению техническим состоянием для сохранения оптимальной надежности машины в эксплуатации.

Проблема повышения эффективности диагностирования тракторов может быть успешно решена путем:

- увеличения производительности труда при диагностировании;
- приближения средств диагностирования к объектам диагностирования (т.е. использование их в хозяйствах и организациях, эксплуатирующих тракторы);
- уменьшения затрат на диагностирование и повышения достоверности оценки технического состояния тракторов в целом и их агрегатов;
- более полного оснащения тракторов бортовыми диагностическими средствами;
- использования современных телекоммуникационных средств для дистанционной передачи информации о результатах диагностирования машин непосредственно в дилерские центры.

Реализация этих мероприятий возможна посредством:

- совершенствования методов и средств диагностирования;
- повышения приспособленности тракторов к диагностированию;
- разработки новых организационных форм проверки в системе технического обслуживания и ремонта техники (в системе ТОР);
- повышения квалификации специалистов, эксплуатирующих, диагностирующих и ремонтирующих тракторную технику.



УДК 629.114-585

## Методика синтеза различных типов планетарных механизмов коробок передач

Альгин В. Б., Шарангович А. И., Шилов В. В.  
ГНУ «Объединенный институт машиностроения  
НАН Беларуси», ПО «МТЗ»

В настоящее время в мировой практике в составе трансмиссии все чаще используют планетарные коробки передач. При проектировании планетарных механизмов сложной структуры имеет место большое количество вариантов схемных решений. В данной работе описана структура коробки передач с многозвенным планетарным механизмом, приведена методика синтеза планетарных механизмов различного типа в рамках рассматриваемой структуры, представлены результаты кинематического расчета синтезированных планетарных механизмов.

### *Структура кинематической схемы коробки передач с многозвенным планетарным механизмом*

На рисунке представлена структура коробки передач с многозвенным планетарным механизмом, имеющим различные степени свободы и количество звеньев. Переключение передач происходит при торможении одного из звеньев  $p$ -звенного механизма или его блокировки.

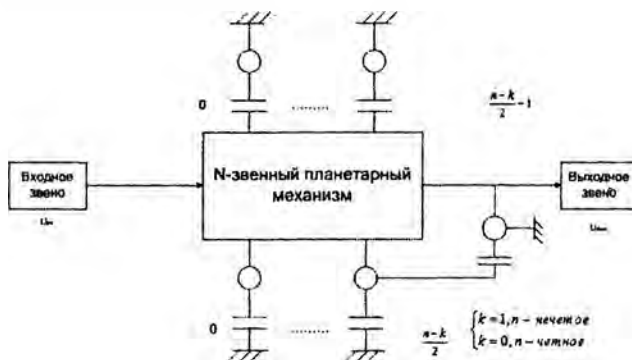


Рисунок 1 – Структурная схема коробки передач трактора

### **Методика расчета угловых скоростей механизма**

Математическая модель формируется автоматически на основании данных о структуре планетарного механизма. Для описания связей между звеньями схемы и перераспределения моментов в звеньях составляющих механизмов используется структурно-силовая матрица (ССМ) и матричные методы [2].

### **Результаты проведения синтеза**

Выбор параметров механизма сводится к оптимальному синтезу (подбору) чисел зубьев колес, удовлетворяющих целому ряду требований:

- передаточное отношение;
- условие соосности;
- условие соседства сателлитов;
- условие сборки.

На рисунке 3 представлен ход выполнения синтеза планетарной коробки передач. В качестве исходных данных для проведения синтеза механизма задаются требуемый диапазон передаточных чисел, число сателлитов и их минимальное число зубьев. Задаются ограничения по числам зубьев для солнечных шестерен (минимальное число зубьев), максимальное число зубьев короны.

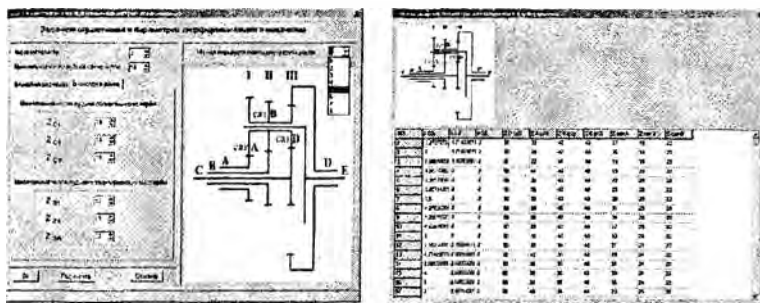


Рисунок 3 – Формы ввода/вывода результатов генерации количества зубьев колес планетарного механизма

График на рисунке 4, дает наглядное представление о изменении угловых скоростей звеньев планетарного механизма. Переключение муфт происходит при отсутствии крутящего мо-

мента и при синхронизации частот вращения переключаемых звеньев.

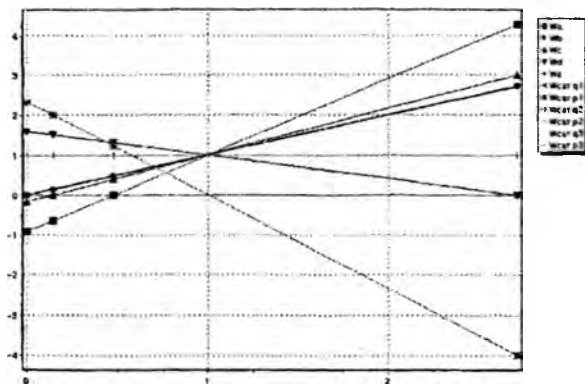


Рисунок 4 – План угловых скоростей звеньев планетарного механизма

### *Заключение*

Разработана методика синтеза различных типов планетарных механизмов коробок передач. Получены схемные решения планетарной коробки передач в составе трансмиссии трактора. На основе разработанных методик синтеза схем и параметров звеньев планетарных модулей создано программное обеспечение, которое позволяет проанализировать возможные схемные варианты, провести подбор чисел зубьев планетарного модуля и выполнить скоростной расчет трансмиссии.

### *Литература*

1. Шарангович, А. И. Структурно-кинематический синтез объемной гидромеханической коробки передач трактора / А. И. Шарангович, В. Б. Альгин, В. В. Шилов // Перспективы развития белорусского тракторостроения: междунар. научн.-техн. конф. (Минск, 29-30 мая 2006г.): Матер. докл. – Минск, 2006. – С. 169–174.
2. Альгин, В. Б. Динамика, надежность и ресурсное проектирование трансмиссий мобильных машин / В. Б. Альгин. – Минск: Наука і тэхніка, 1995. – 256 с.

# Информационно-измерительная техника и технологии

УДК 531.45:539.62270

## Метод измерения адгезионной и гистерезисной составляющих момента трения качения

Джилавдари И. З., Ризноокая Н. Н.

Белорусский национальный технический университет

В связи с разработкой микромеханических систем, весьма актуальными становятся исследования трения на малых участках поверхности материалов. Основным достоинством трения качения является щадящий режим взаимодействия индентора и поверхности. При этом широко используются свободные затухающие колебания физического маятника, опирающегося двумя шариками на исследуемую поверхность. Однако существуют проблемы в интерпретации результатов опытов.

Силу или момент силы трения качения можно разделить на следующие составляющие:

- адгезионная составляющая. Она обусловлена адгезией (или прилипанием) взаимодействующих поверхностей;
- деформационно-гистерезисная составляющая. Она обусловлена упруго-пластичными свойствами материала;
- вязкая составляющая. Она обусловлена проскальзыванием шариков относительно поверхности и упруго-вязкими свойствами материала.

На опыте, если не принято специальных мер, сила трения всегда обусловлена всеми тремя механизмами диссипации энергии. Для измерения адгезионной и вязкой составляющих момента трения качения предлагается следующий метод.

1. Предполагают, что момент силы трения качения зависит от угловой скорости шариков (или маятника) по формуле

$$M(\omega) = PR(b_0 + b_1|\omega| + b_2\omega^2), \quad (1)$$

где  $P$  – вес маятника,  $R$  – радиус шариков,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  – постоянные коэффициенты, определяемые методом аппроксимации экспериментальной зависимости амплитуды от времени уравне-

нием регрессии, полученным на основании математической модели взаимодействия шариков и поверхности.

2. Измерения свободных колебаний физического маятника проводят в интервале амплитуд  $\alpha$ , меньших половины угла статического контакта  $\beta$  шариков и поверхности. В этом случае деформационной составляющей трения качения можно пренебречь. Угол  $\beta$  рассчитывают по известным значениям модулей Юнга исследуемого материала  $E_1$  и шариков  $E_2$  и их коэффициентов Пуассона  $\nu_1$  и  $\nu_2$ , радиуса шарика  $R$  и веса маятника  $P$ :

$$\beta \approx \frac{d}{2R} \approx \frac{1}{R} \left( \frac{3PR}{4E^*} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр пятна контакта и

$$E^* = \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1}. \quad (3)$$

3. Измеряют последовательность амплитуд  $\alpha$  колебаний маятника и соответствующие им моменты времени (см. отдельные точки на рисунке 1).

4. Используя в качестве уравнения регрессии формулу

$$\alpha(t) = \frac{(\sqrt{D} - k_1)\alpha_0 - 2k_0 + \left[ (\sqrt{D} + k_1)\alpha_0 + 2k_0 \right] \exp(-\sqrt{D}t)}{\sqrt{D} + k_1 + 2k_2\alpha_0 + \left[ \sqrt{D} - k_1 - 2k_2\alpha_0 \right] \exp(-\sqrt{D}t)}, \quad (4)$$

где  $D = k_1^2 - 4k_0k_2$ ,  $\alpha_0$  – начальная амплитуда колебаний,  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  – постоянные коэффициенты, связанные с коэффициентами  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  соотношениями

$$k_0 = \frac{4R}{Tl} b_0, \quad k_1 = \frac{2\pi^2 R}{T^2 l} b_1, \quad k_2 = \frac{32\pi^2 R}{3T^3 l} b_2, \quad (5)$$

аппроксимируют экспериментальную зависимость амплитуд  $\alpha$  от времени  $t$  и находят значения коэффициентов  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  методом наименьших квадратов (см. результат аппроксимации на рисунке 1 в виде сплошной линии).

Уравнение регрессии (4) получено из решения дифференциального уравнения колебаний маятника и зависимости момента трения качения от угловой скорости колебаний маятника в виде трехчлена (1).

5. Рассчитывают значение адгезионной составляющей момента трения по формуле

$$M_{адс} = PRb_0. \quad (6)$$

6. Рассчитывают значение гистерезисной составляющей момента трения по формуле

$$M_{вязк} = PR(b_1|\omega| + b_2\omega^2). \quad (7)$$

7. Строят график зависимости этих составляющих от угловой скорости маятника (см. рисунок 2). На этом графике фиксируют наличие угловой скорости  $\omega_0$ , где эти моменты равны. Если  $\omega_0$  отсутствует, измерение необходимо повторить при меньших амплитудах колебаний. Если значение  $\omega_0$  достигнуто, то адгезионная составляющая трения превалирует в области  $\omega < \omega_0$ , а вязкая – в области  $\omega > \omega_0$ .

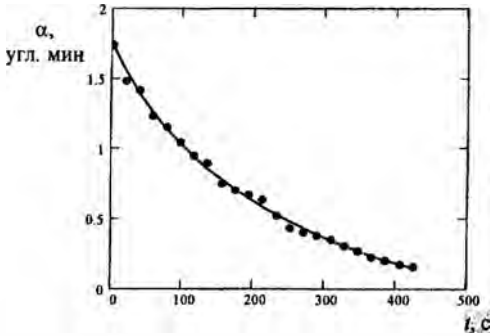


Рисунок 1 – Затухание колебаний маятника и его аппроксимация

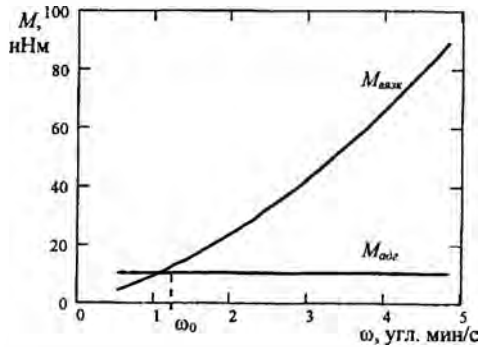


Рисунок 2 – Зависимость моментов силы трения от угловой скорости шариков

На рисунке 1 в виде отдельных точек представлена зависимость амплитуды колебаний маятника от времени, полученная из измерений на поверхности кристалла кремния КДБ 12, и в виде непрерывной кривой представлена функция, аппроксимирующая эту зависимость.

На рисунке 2 представлены составляющая момента силы трения качения, зависящая от угловой скорости маятника (сплошная кривая), и составляющая, независящая от угловой скорости маятника (горизонтальная прямая), построенные на основе результатов измерений и аппроксимации.

Проведение измерений в интервале амплитуд  $\alpha < 0,5\beta$ :

- обеспечивает отсутствие проскальзывания шариков на испытываемой поверхности, поскольку в этом случае пятно контакта практически не перемещается;

- позволяет исключить вязкую составляющую момента трения качения и увеличить точность измерения коэффициента трения качения;

- позволяет установить количественный критерий  $\omega_0$  для разделения момента силы трения качения на составляющие и вычислить эти составляющие по формулам (6) и (7). При угловых скоростях  $\omega < \omega_0$  превалирует адгезионная составляющая момента силы трения, а при угловых скоростях  $\omega > \omega_0$  превалирует гистерезисная составляющая момента силы трения.

Это объясняется тем, что гистерезисная и вязкая составляющая момента силы трения стремятся к нулю, когда скорость шарика стремится к нулю. А адгезионная составляющая остается конечной, поскольку процесс отрыва поверхности шарика от поверхности контртела стремится к обратимому изотермическому процессу, который зависит от коэффициентов поверхностного натяжения контактирующих поверхностей.

Отметим, что на рисунке 2 значение  $\omega_0 \approx 1,134$  угл.мин/с было достигнуто при  $\alpha \approx 20$  угловых секундах. При этом  $b_0 = 1,65 \cdot 10^{-7}$ ;  $b_1 = 3,83 \cdot 10^{-4}$  с;  $b_2 = 0,41$  с.

УДК 537.58+621.317

**Неразрушающий контроль параметров пространственного распределения дефектов с характерными размерами более 50 нм в полупроводниковых пластинах**

Гусев О. К., Воробей Р. И., Тявловский К. Л., Тявловский А. К.  
Белорусский национальный технический университет

Надежность и стабильность приборных структур интегральных микросхем (ИМС) во многом определяют ионные загрязнения, присутствующие в диэлектрических слоях. В технологическом процессе производства ИМС используются различные диэлектрические слои с использованием большой номенклатуры материалов:

- подзатворный диэлектрик – высокотемпературные процессы окисления кремния в различных средах (пирогенное окисление, пары воды, сухой кислород и др.);
- изолирующие и базовые диэлектрики – высокотемпературные длительные процессы окисления кремния с целью создания изоляции элементов ИМС;
- межслойные, пассивирующие диэлектрики – средне- и низкотемпературные процессы осаждения слоев (разложение сложных кремнийорганических соединений, пиролитическое осаждение и др.)

Наличие микронеоднородностей на поверхности полупроводниковых пластин, границах раздела и слоях Si-SiO<sub>2</sub> во многом определяет параметры и надежность схем, разброс параметров приборных структур. Анализ микронеоднородностей становится наиболее актуальным в связи с переходом к субмикронным проектным нормам и уменьшением толщины подзатворного диэлектрика.

Метод зонда Кельвина (КРП) характеризуется высокой чувствительностью к искажениям электрического потенциала, вызванных любыми типами дефектов, является бесконтактным, т.е. неразрушающим, не требует какой-либо подготовки поверхности или создания тестовых структур. Однако пространственная разрешающая способность метода ограничивается размерами расчетного электрода.



Разработанная методика позволяет использовать дополнительные параметры измерительного сигнала, ранее обуславливающими дополнительную случайную составляющую погрешности измерения, для контроля параметров микронеоднородности распределения дефектов вплоть до их размеров несколько десятков нанометров.

Так при повторных измерениях вдоль одной и той же линии сканирования обнаружено несовпадение измеряемых пространственных распределений электрического потенциала поверхности. Моделирование неоднородности потенциала тестовыми структурами и использовании отсчетных электродов различных размеров показало, что размах несовпадений при повторных измерениях составляет величину  $\Delta U \approx 3 \sigma$ , где  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение потенциала. При прекращении сканирования в области с несовпадающими значениями измерительного сигнала при повторных измерениях и поперечном перемещении отсчетного электрода наблюдается дистанционная зависимость измерительного сигнала. При этом, при поперечном перемещении отсчетного электрода над областью поверхности с микронеоднородным распределением потенциала дистанционная зависимость измерительного сигнала отсутствует.

Неоднородность распределения потенциала под электродом может быть смоделирована наличием под электродом участков поверхности с потенциалами  $U_1 \dots U_n$ , занимающими площади  $S_1 \dots S_n$  (Рис. 1). При этом должно выполняться условие равенства средних значений потенциала на площади под электродом  $S$  для модели и моделируемой поверхности. Наличие под электродом неоднородностей потенциала приводит к зависимости измеряемого значения потенциала от расстояния между отсчетным электродом и поверхностью. Результаты моделирования дистанционной зависимости измерительного сигнала при наличии микронеоднородностей приведены на рис. 2. Пунктирными линиями нанесены средние под отсчетным электродом значения поверхностного потенциала.

Объектом исследования служили пластины кремния марки КЭФ (n-типа проводимости), КДБ (p-проводимости) и арсенида галлия (n-типа проводимости) после химико-механической полировки. Вначале на исходных пластинах измерялось пространственное распределение потенциала (КРП), затем на них был

выявлен микрорельеф и оценено структурное совершенство по распределению декорирующих столбиков, связанных с дефектами типа агрегатов примесей. После этого на кремниевых пластинах были выращены эпитаксиальные пленки, дефектность которых оценивалась с помощью оптического и просвечивающего электронного микроскопа. Измерения выявили области поверхности с различным характером распределения дефектов и соответствие характера сигнала КРП размерам и типу пространственного распределения дефектов. Обнаружена связь зависимости измеряемого потенциала от расстояния между отсчетным электродом и исследуемой поверхностью с характером распределения структурных неоднородностей. Дефекты с характерными размерами пространственного распределения менее 50 нм при чувствительности 2 мВ в методике анализа дистанционной зависимости сигнала КРП не обнаруживаются. Это может быть объяснено взаимным перекрытием электрического поля близко расположенных дефектов.

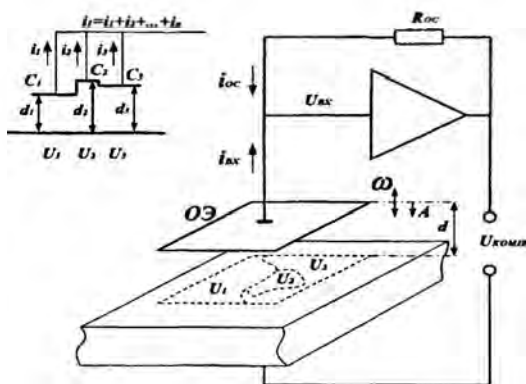


Рис. 1 – Модель реального отсчетного электрода и поверхности полупроводника с микронеоднородным распределением потенциала

Таким образом, анализ дистанционных зависимостей измеряемого сигнала в методе зонда Кельвина позволяет неразрушающим способом производить контроль параметров пространственного распределения дефектов в полупроводниковых пла-

стигах при характерных расстояниях между дефектами более 50 нм. Измерения проводятся в диэлектрическом воздушном зазоре, т.е. возможны на структурах Si-SiO<sub>2</sub>.

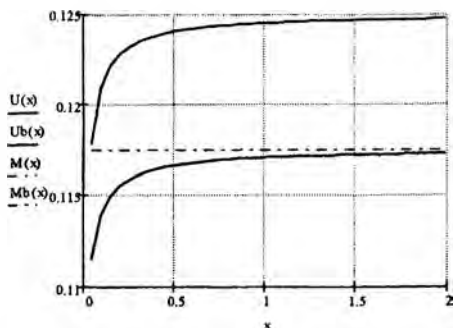


Рис. 2 – Дистанционная зависимость измеряемого значения потенциала поверхности в методе зонда Кельвина при микро неоднородном распределении потенциала

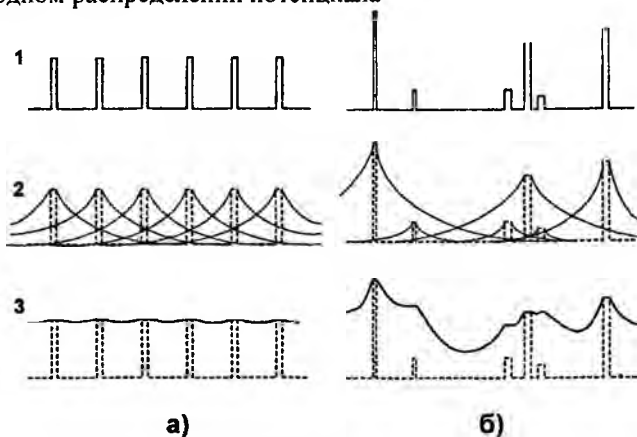


Рис. 3 – Пространственные распределения плотности дефектов и электрического потенциала на поверхности полупроводника а) микрооднородное распределение дефектов; б) микрооднородное распределение; 1- распределение искажений электрического потенциала на дефектах; 2- распределение электрического потенциала в окрестности каждого из дефектов; 3- суммарный потенциал

**Критерий применимости адаптивных методов  
для измерений параметров объектов  
в неопределенных состояниях**

Гусев О. К., Свистун А. И.

Белорусский национальный технический университет

**Постановка задачи.** В ряде случаев нестабильность свойств объектов, разнообразие технологических процессов, условий измерений, измерительных воздействий вызывает переход объектов измерений в «неопределенные» состояния, при которых нарушается соответствие модели объекта, принятой для базового метода измерений, реальному состоянию его свойств в момент измерений. Это приводит к методическим погрешностям, а в ряде случаев – к грубым погрешностям результатов базовых методов измерений.

**Методология измерений.** На рис. 1 показана структура взаимодействия объекта и средства измерений (СИ). Состоянием объекта измерений назовем качественную характеристику объекта, отражающую наличие у него связи между измерительными воздействиями  $\alpha_q$ , свойствами объекта  $x_i$  и измерительными сигналами  $Y$ . Если указанная связь определена и однозначна, состояние назовём *определенным*, а если она неизвестна или неоднозначна, то – *неопределенным*.

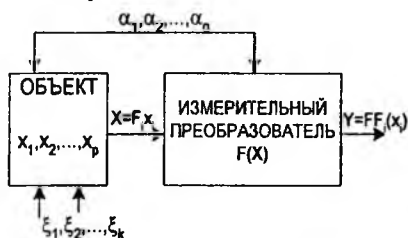


Рис. 1. Структурная схема взаимодействия объекта и СИ

Методология измерений параметров объектов измерений с неопределенными состояниями заключается в том, что в дополнение к операциям, выполняемым в рамках стандартной измерительной процедуры [1], выполняют операции, представленные схематически на рис.2.

На этапе постановки измерительной задачи осуществляют: 1) установление совокупности различных состояний, в которых может находиться объект измерений; 2) выбор параметров базовых сигналов, позволяющих идентифицировать каждое состояние объекта измерений.

Создается односигнальная адаптационная модель измерений (рис.3). Пусть объект может находиться в  $m$  различных состояниях  $\Omega^j$ , где  $1 < j < m$ . Значение  $x_i^j$  измеряемой величины  $x$ , в  $j$ -м состоянии будет определяться значениями других параметров объекта  $x_p^j$ , влияющих величин  $\xi_k$ , а также конкретным состоянием  $\Omega^j$  в соответствии с математической моделью:

$$x_i^j = f_i^{0j}(x_1^j, x_2^j, \dots, x_p^j, \Omega^j, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k). \quad (1)$$

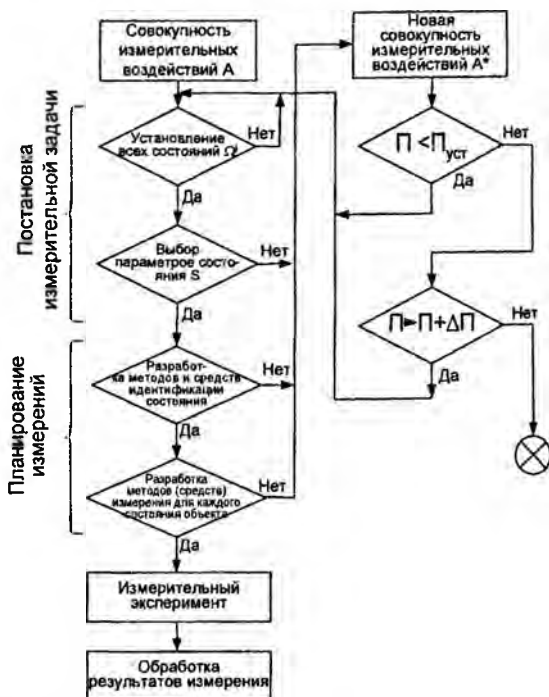


Рис.2. Структурная схема измерительной процедуры для объектов измерений в неопределенных состояниях

В измерительных задачах объект измерений может характеризоваться свойством  $x_{i \text{ INT}}$ , зависящим от значений свойств  $x_i^j$  во всех  $m$  состояниях:

$$x_{i \text{ INT}} = f_{\text{INT}}(x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^m), \quad (2)$$

где  $f_{\text{INT}}$  – функционал, описывающий определенные математические операции, производимые над величинами  $x_i^j$ .

Взаимодействие объекта и чувствительного элемента СИ характеризуется тем, что на вход первичного преобразователя средства измерений воздействует сигнал  $X^j$ , определяемый математической моделью объекта измерений:

$$X^j = F_i^j[x_i^j(t)], \quad (3)$$

где  $F_i^j$  – некоторый функционал, описывающий ряд определенных математических операций, производимых над измеряемой величиной  $x_i^j$ .

Предположим, что выходной сигнал  $Y^j$ , содержит, кроме информативного параметра  $b_0^j[X^j]$ , неинформативный параметр  $b_S[\Omega^j]$ ,

$$Y^j = Y^j\{b_0^j[X^j], b_1, b_2, \dots, b_S[\Omega^j], \dots, b_m, S_1, S_2, \dots, S_L, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_q\} = F\{X^j\} = F\{X^j\{a_0[x_i(t)], a_1, a_2, \dots, a_S(\Omega^j), \dots, a_n, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_q\}, S_1, S_2, \dots, S_L\} \quad (4)$$

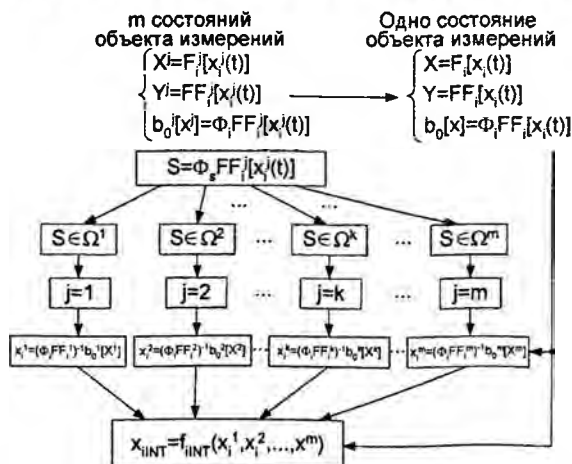


Рис.3.Обобщенная структура односигнальной адаптивной модели измерений

Параметр  $b_s[\Omega']$  назовем *параметром состояния* объекта измерений  $S$ :

$$S = b_s[\Omega']. \quad (5)$$

Пусть существуют по крайней мере два измерительных преобразования  $\Phi_i$  и  $\Phi_s$ . В результате первого преобразования

$$\Phi_i Y^j = \Phi_i F F_i' [x_i^j(t)] = b_0^j [X^j], \quad (6)$$

измеряемая физическая величина  $x_i^j(t)$  преобразуется в непосредственно измеряемый параметр  $b_0^j [X^j]$ . Посредством обратного измерительного преобразования  $(\Phi_i F F_i')^{-1}$  экспериментальное значение этого параметра преобразуется в значение измеряемой физической величины  $x_i^j(t)$ :

$$x_i^j(t) = (\Phi_i F F_i')^{-1} b_0^j [X^j]. \quad (7)$$

Для получения измерительной информации для идентификации вида градуировочной характеристики  $(\Phi F F_i')^{-1}$ , параллельно с первым измерительным преобразованием  $\Phi_i Y^j$  осуществляется второе –  $\Phi_s Y^j$ :

$$\Phi_s Y^j = \Phi_s F F_i' [x_i^j(t)] = b_s[\Omega'] = S. \quad (8)$$

Посредством обратного измерительного преобразования  $(\Phi_s F F_i')^{-1}$  измеренное значение параметра  $S$  преобразуется в значение индекса состояния объекта измерений  $j$ :

$$j = (\Phi_s F F_i')^{-1} b_s[\Omega']. \quad (9)$$

*Критерием применимости* адаптивных методов измерений является требование, чтобы математическая модель измерительного сигнала (4) допускала аддитивное разделение относительно параметров  $b_0$  и  $b_s$ .

В результате формируется структурная схема измерительного эксперимента (рис.4), использующая два измерительных канала.

В *канале идентификации* одного из  $m$  возможных состояний объекта измерений  $\Omega'$  идентификация осуществляется на основе измерительного преобразования  $\Phi_s f f_i'$ . Многозначная мера  $m[s]$  воспроизводит непосредственно измеряемую величину  $s$  заданного размера, а компаратор  $w(s - m[s])$  осуществляет сравнение однородных физических величин. Результат идентификации состояния объекта измерений достигается путем обратного преобразования  $j = (\Phi_s f f_i')^{-1} p[s]$ .

В канале измерений физической величины  $x_i^j$  объекта, осуществляется преобразования физической величины  $x_i^j$  в измеряемую  $b_0^j = \phi_{diff}^j$ . Сравнение размера измеряемой величины  $b_0^j$  с размером однородной физической величины  $n[b_0]$ , воспроизводимой мерой, осуществляется компаратором  $w(b_0^j - n[b_0])$ .

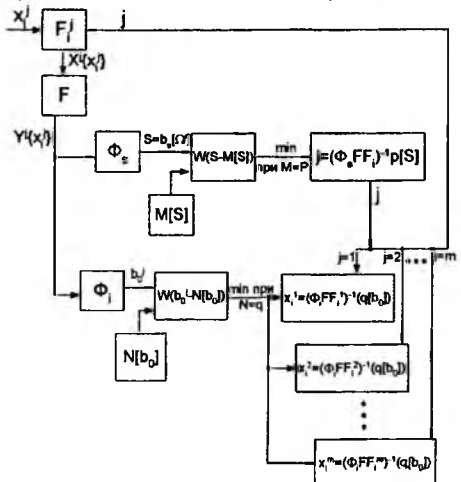


Рис.4. Обобщенная структурная схема СИ параметров объектов с неопределенными состояниями

При невозможности выбрать показатели состояния, либо разработать методы измерений в идентифицированных состояниях, либо разработать методы идентификации состояния объекта необходимо осуществить переход к новой системе метрологических состояний путем изменения совокупности измерительных воздействий на объект (в том числе и к иным принципам измерений) и организации в алгоритме процедуры циклирования.

### Литература

1. Сергеев, А. Г. Метрология: Учеб. пособие для вузов. / А. Г. Сергеев, В. В. Крохин – М.: Логос, 2001. – 408 с., ил.



УДК 681.306

### Эффективность обнаружения пожара в жилых помещениях

Зуйков И.Е.<sup>\*</sup>, Антошин А.А.<sup>\*</sup>, Есипович Д.Л.<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Белорусский национальный технический университет,

<sup>\*\*</sup>НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС РБ, г. Минск

Пожары занимают третье место по значимости среди причин смерти в результате несчастного случая в жилище [1]. Поэтому любые меры направленные на предотвращения пожаров или хотя бы своевременное их обнаружение имеют большое социальное значение. Учитывая, что более 80% всех несчастных случаев происходят в результате пожаров именно в жилых помещениях, особое значение придается системам пожарной сигнализации (СПС) специально предназначенным для установки в местах проживания людей.

Эффективность функционирования таких СПС определяется тремя основными факторами. Во-первых, это качество выполнения проекта СПС, учитывающего возможность достижения количественных критериев решения задач стоящих перед СПС. Например, обеспечение условий (необходимого времени) для безопасной эвакуации жителей. Во-вторых, технические средства обнаружения пожара должны обнаруживать загорание на самой ранней стадии и иметь низкую вероятность ложного срабатывания. Эти требования являются противоречивыми так как повышение чувствительности извещателя как правило приводит к увеличению вероятности ложных срабатываний.

В значительной степени такую зависимость можно ослабить, если применяемые пожарные извещатели, или система в целом, имеют способность разделять реальную угрозу пожара и ситуации, не представляющие опасность, а также имеют селективную чувствительность к различным типам пожаров. Степень реализации этой функции зависит от принципов работы пожарных извещателей и алгоритма обработки сигналов в извещателях или приемно-контрольных приборах.

Большие потенциальные возможности для решения названной проблемы имеют точечные дымовые оптико-электронные пожарные извещатели. Обусловлено это зависимостью характеристик рассеянного дымом оптического излучения от свойств

дисперсной фазы дыма, который образует аэрозоль. Максимально полное использование их возможностей является предметом исследований, проводимых ведущими научными центрами [2, 3]. Например, авторы работы [4] для разделения сигналов от различных тлеющих материалов предлагают использовать регистрацию оптического излучения рассеянного под разными углами.

Для существующей проблемы ложного срабатывания точечных дымовых оптико-электронных пожарных извещателей важное значение имеет методика и совершенство технических средств проведения их испытаний и, в частности, определения чувствительности. В настоящее время имеется много неоднозначности при проведении испытаний дымовых извещателей как лучевого типа, так и извещателей, использующих явление рассеяния оптического излучения [5]. В значительной степени эта неоднозначность обусловлена несовершенством действующей нормативной документации. Например, в настоящее время у испытуемых извещателей не контролируется селективная чувствительность к тестовым очагам пожара. Производители, в свою очередь, не указывают, какой тип пожара наилучшим образом обнаруживается данным типом извещателей.

Качество выполнения проектных работ при создании СПС в жилых помещениях и других местах пребывания людей определяется большим количеством факторов. Так процесс развития пожара в жилых помещениях имеет ряд особенностей в зависимости от вида помещения и его функционального назначения (спальня, жилая комната кухня, подсобное помещение). Однако существующие нормативные документы [6, 7] требуют оборудования таких объектов системами пожарной сигнализации в виде автономных пожарных извещателей независимо от функционального назначения, площади, этажности и пожарной нагрузки. Выбор пожарного извещателя ограничивается тем, что на таких объектах допускается установка как тепловых, так и дымовых извещателей.

В отличие от указанных документов, в зарубежной практике [1] требования к проектированию систем пожарной сигнализации в жилых помещениях проработаны более детально. В-первых, подобные объекты подразделяют на несколько видов, например, жилые объекты для одной и двух семей; спальни

помещения и гостиные, отдельные квартиры в многоквартирных домах, жилая площадь в жилых блоках отелей и общежитий, детские сады, и другие, в том числе вспомогательные помещения. В зависимости от цели установки пожарной сигнализации используют несколько разновидностей «домашних» пожарных систем сигнализации (одно- или многопозиционные). Такие системы пожарной сигнализации имеют контрольное устройство (панель) и формируют сигнал тревоги в жилище с целью уведомить жильцов о пожаре таким образом, чтобы они успели беспрепятственно эвакуироваться. Во-вторых, важным является какое горение, пламенное или тлеющее, должно обнаруживаться системой пожарной сигнализации и при каком значении тепловыделения это должно произойти. Цель таких уточнений – обнаружить пожар до того как он достигнет большого тепловыделения. А ее достижение требует глубокого понимания процессов обуславливающих размещение извещателей.

Пламенной пожар является быстро развивающимся и обладает большим тепловыделением. В результате он формирует факел, который перемещает дым и горячий воздух вверх. Тлеющий пожар с малым тепловыделением, часто встречающийся в жилищах, учреждениях и помещениях коммерческого назначения, может образовать значительное количество дыма до образования факела. Такой дым, обладая малой энергией, прекратит двигаться к установленному на потолке дымовому извещателю, в случае если потолок более высок, чем ожидается (явление стратификации). Именно такие пожары трудно обнаруживаются дымовыми извещателями, установленными на потолке и поэтому необходимы дополнительные извещатели, контролирующие пространство ниже потолка.

Выполненные расчеты и анализ их результатов показали высокую эффективность тепловых извещателей для обнаружения пламенного пожара. Точечные дымовые извещатели, установленные на потолке, и преследующие своей основной целью обнаружить пламенной пожар, будут его обнаруживать лишь значительно раньше теплового извещателя. Следует это из того, что точечный дымовой извещатель, работающий на принципе регистрации рассеянного света, например, при горении древесины активизируется, когда температура в месте его установки увеличится на 42°C, а при горении хлопка температура должна

увеличится на 28°C. Приведенные значения температур незначительно отличаются от значений пороговой температуры тепловых извещателей если температура окружающей среды находится вблизи 20°C [1]. Кроме того, необходимо принимать во внимание, что чувствительность точечных дымовых извещателей сильно зависит от размера частиц дыма, их формы, цвета и т.д. Огневые испытания показывают, что такие извещатели активизируются, если потери оптического излучения в задымленной среде составят 11%/м в случае сигаретного дыма, 5%/м при горении древесины и 33%/м в случае тления хлопка.

Из приведенных результатов следует, что чувствительность дымового извещателя указанная в паспорте, т.е. полученная в дымовом канале, может сильно отличаться от его чувствительности к дыму, образовавшемуся в жилом помещении. Таким образом, системы пожарной сигнализации для жилых помещений должны информировать жильцов о пожаре, обеспечивая время на беспрепятственную эвакуацию путем применения в помещениях разного функционального назначения пожарных извещателей с учетом их селективной чувствительности.

## Литература

1 National Fire Alarm Code. Handbook /Fourth edition. Edited by Lee F. Richardson, Wayne D. Moore, P.E.,FSFPE. –National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2004.–680p.

2 Weinert D. F., Cleary T. G., Mulholland G. W., Beever P. F. Light scattering characteristics and size distribution of smoke and nuisance aerosols. //Fire safety science. proceedings. seventh (7th) international symposium. International association for fire safety science (IAFSS). Jun 16–21, 2003, Worcester, MA, Intl. Assoc. for Fire Safety Science, Boston, MA, Evans D.D., Editor(s), 209–220 pp, 2003.

3 Grosshanler W.L. A review of measurements and candidate signatures for early fire detection. //NISTIR 5555, National institute of standards and technology, January, 1995, 32p.

4 Meacham B., Motevalli V., J. fire protection engineering 4, 17, 1992.

5 Schifiliti R.P. Fire detection modeling – the research-application gap. //Proceedings, 12th international conference on automatic fire detection, NIST Gaitherburg, Maryland, USA, March 2001, 33p.

6 НПБ 15-2004 Область применения автоматических систем пожарной сигнализации и установок пожаротушения: Введен в действие с 01.01.2005.– Мн., 2004.  
7 СНБ 2.02.05-04 Пожарная автоматика. – Мн., 2004.

# Конструирование и производство приборов

УДК 621.937

## Определение оптимальных режимов шаржирования распиловочных дисков по их режущей способности

Киселев М. Г., Новиков А. А.

Белорусский национальный технический университет

В алмазобрабатывающей промышленности в качестве инструмента для разделения монокристаллов алмаза на части используются тонкие распиловочные диски, изготовленные из оловянисто-фосфористой бронзы. Важнейшими эксплуатационными показателями распиловочных дисков являются: режущая способность и качество поверхности распиленных заготовок (полуфабрикатов). В алмазобработке их режущую способность принято оценивать по интенсивности распиливания  $i$ , значение которой определяется отношением площади распиленной поверхности  $S$  ко времени выполнения операции  $T_0$  ( $i=S/T_0$ ). Качество поверхности определяется высотой микронеровностей и наличием на ней глубоких рисок, для выведения которых требуется операция подшлифовки площадок распиленных полуфабрикатов, что влечет за собой возрастание безвозвратных потерь дорогостоящего сырья.

Эксперименты по оценке влияния режимов шаржирования на уровень указанных эксплуатационных показателей распиловочных дисков проводились на специальной установке, созданной на базе секции распиловочного станка ШП-2. В качестве обрабатываемого материала использовался синтетический корунд (9 единиц по шкале Мооса). Изготовленные из него образцы, имеющие в сечении форму квадрата со стороной 4,5 мм, клеивались в специальную оправку и затем распиливались при постоянной частоте вращения испытуемого инструмента ( $n_d=14000$  об/мин), постоянной статической нагрузке, равной 0,25 Н и с постоянной периодичностью подшаржирования распиловочного диска, которое составляло 5 мин.

Для проведения экспериментов по определению оптимальных

режимов шаржирования, использовались распиловочные диски с толщиной исходной заготовки 0,07 мм, которые шаржировались при различных значениях статической нагрузки ( $P_{ст} = 25 - 45$  Н) и количестве проходов ( $N = 2 - 4$  об), но при постоянной интенсивности ультразвукового возбуждения колебательной системы ( $A_0=6$  мкм) и постоянной (оптимальной) частоте вращения деформирующих инструментов ( $n_{пр}=75$  об/мин). Время начала и конца операции распиливания фиксировалось по секундомеру. Далее распиленные образцы промывались, после чего на инструментальном микроскопе исследовалась обработанная поверхность и определялась ее площадь.

На рисунке 1 приведены данные, отражающие влияние величины статической нагрузки и числа проходов при шаржировании боковых поверхностей заготовок распиловочных дисков на значение интенсивности распиливания полученных инструментов. Из них видно, что максимальную интенсивность распиливания обеспечивают распиловочные диски, боковые поверхности которых шаржируются при статической нагрузке 30 Н и числе проходов, равным трем. Изменение указанных значений этих параметров в меньшую или большую сторону сопровождается снижением интенсивности распиливания.

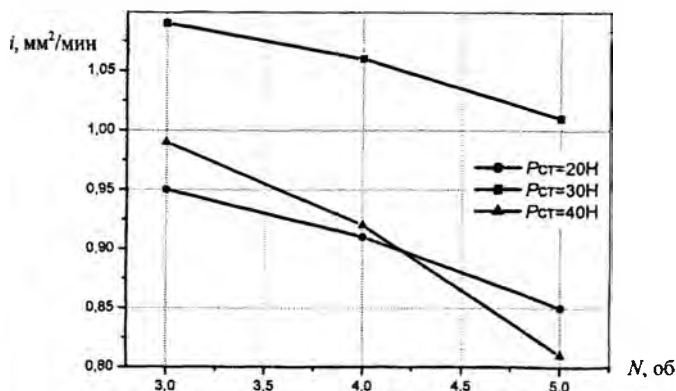


Рисунок 1 – Зависимость интенсивности распиливания образцов дисками шаржированными при различной статической нагрузке и числа проходов

Следует подчеркнуть, что установленные зависимости полностью согласуются с результатами теоретических и экспериментальных исследований, полученных при изучении условий формирования алмазосодержащего слоя на боковых сторонах заготовок распиловочных дисков при их шаржировании с ультразвуком. В частности, на количество и размер алмазных частиц, закрепленных на обрабатываемых поверхностях заготовок, на изменение их массы и толщины, на абразивную способность сформированного алмазосодержащего слоя. Из обобщенного анализа этих данных следует, что во всех случаях наилучший уровень исследуемого параметра, характеризующего качество сформированного алмазосодержащего слоя, соответствует выполнению операции шаржирования при  $P_{ст}=30$  Н и  $N=3$ .

Таким образом, полученные результаты позволяют определить оптимальные режимы шаржирования боковых поверхностей заготовок распиловочных дисков ультразвуком, при которых обеспечивается максимальная режущая способность полученных инструментов: амплитуда ультразвуковых колебаний выходного торца концентратора – 6 мкм при резонансной частоте – 18900 Гц, статическая нагрузка – 30 Н, частота вращения деформирующих инструментов – 75 об/мин и количество проходов – 3.

Для количественной оценки качества поверхности распиленных образцов использовалось значение параметра  $R_a$  ее шероховатости, которое определялось с помощью профилографа–профилометра модели 252 в направлении перпендикулярном следам обработки по всей длине диагонали образца. Полученные данные не выявили четко выраженной закономерности изменения параметра  $R_a$  при распиливании образцов дисками, шаржированными при различных значениях статической нагрузки и числе проходов. Так его значение изменялось в пределах 0,24 до 0,30 мкм, а среднее составило 0,27 мкм.

С целью определения влияния твердости обрабатываемого материала на интенсивность распиливания и качество обработанных поверхностей была проведена серия экспериментов по распиливанию образцов их стекла К8, кварца и синтетического корунда. Операция выполнялась с

применением распиловочных дисков толщиной исходной заготовки 0,07 мм, шаржированной на оптимальных режимах.

На рисунке 2 приведены полученные экспериментальные данные, отражающие влияние твердости образцов по шкале Мооса, на интенсивность их распиливания и значение параметра  $R_a$  шероховатости обработанных поверхностей. Как и следовало ожидать, с увеличением твердости обрабатываемого материала интенсивность его распиливания, а также высота микронеровностей на обработанной поверхности образца снижаются.

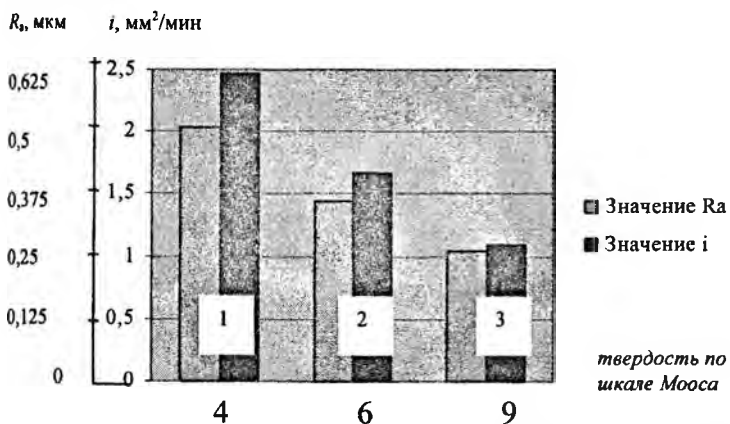


Рисунок 4.14 – Значения интенсивности распиливания и параметра шероховатости  $R_a$  обработанных поверхностей образцов с различной твердостью

Таким образом, на основании экспериментальных исследований были получены зависимости изменения режущей способности распиловочных дисков, шаржированных с ультразвуком, от статической нагрузки и количества проходов при постоянных амплитуде колебаний и частоте вращения деформирующих инструментов. На их основе определены оптимальные режимы шаржирования боковых поверхностей дисков ( $A_0=6$  мкм,  $P_{ст}=30$  Н,  $n_{пр}=75$  об/мин,  $N=3$  об), обеспечивающие наибольшее значение интенсивности распиливания заготовок из корунда ( $i=1,09$   $\text{мм}^2/\text{мин}$ ) при высоком качестве обработанных поверхностей ( $R_a=0,27$  мкм).



УДК 681.77

**Влияние параметров фокусировки при записи изображения на восприятие движения объектов**

Зайцева Е. Г., Никитин В. В.

Белорусский национальный технический университет

При рассмотрении объектов в окружающем пространстве воспринимать глубину изображения человеку помогают три основных механизма – аккомодация (фокусировка глаза на определенное расстояние), конвергенция (поворот оптических осей глаз до пересечения на рассматриваемой точке) и диспаратность (несимметричность оптических изображений объекта на сетчатках левого и правого глаз). При изменении точки зрения содержание изображений объекта на сетчатках изменяется, он воспринимается в новом ракурсе. Когда зритель рассматривает воспроизведенное на плоском экране изображение, конвергенция и аккомодация осуществляется на плоскость экрана, при изменении точки зрения эффект диспаратности не действует. Поэтому восприятие объемности изображения достигается за счет вторичных эффектов: изменение увеличения по глубине пространства, заслонения дальних объектов ближними, воздушной дымки и т.д.

Кроме нарушения восприятия объемности, используемые в настоящее время методы записи и воспроизведения изображений приводят к изменению воспринимаемых зрителем размеров изображения и скоростей перемещения изображений вдоль оптической оси по сравнению с этими параметрами для реальных объектов. Если материал снят для художественных целей, это вполне допустимо, даже иногда желательно для создания определенных эффектов. Если же запись зрительной информации осуществляется для исследовательских целей, такие искажения могут привести к ошибкам в анализе, их необходимо учитывать и по возможности компенсировать.

В настоящей работе проведен анализ искажений, вносимых системой записи и воспроизведения информации, по параметру «скорость движения объекта вдоль оптической оси».

Проанализируем восприятие объекта или его изображения на трех стадиях: наблюдателем, находящимся на определенном расстоянии от съемочной камеры сзади, оператором,

наблюдающим объект на видоискателе камеры, и зрителем, расположенным на определенном расстоянии от экрана. На рис. 1 показана схема размещения объекта, объектива камеры, оператора и наблюдателя.

В соответствии с законами геометрической оптики были получены уравнения, связывающие размер объекта съемки с размером его на сетчатке наблюдателя, оператора, и зрителя, рассматривающего изображение на плоском экране.

Дифференцированием формул по времени были получены соотношения, связавшие скорость перемещения объекта и скорость изменения размера его изображения на сетчатке трех вышеупомянутых субъектов. Значения скоростей отрицательны, т.к. при удалении объекта его размеры на матрице или пленке и сетчатке глаза уменьшаются. Результаты дифференцирования были использованы при вычислении относительных ошибок в системах «наблюдатель - оператор», «оператор – зритель», «наблюдатель – зритель».

Ошибки первой группы характеризуют искажения, вносимые объективом. Ошибки второй группы важны при съемках для научных целей, так как показывают, насколько изменяется осевая скорость объекта при восприятии на экране относительно восприятия в реальных условиях. Ошибки третьей группы интересны при художественной съемке: они характеризуют искажения, обусловленные разницей в условиях наблюдения для оператора, реализующего свой художественный замысел, и зрителем, воспринимающим результат творчества оператора.

Ошибка в системе «наблюдатель - оператор» пропорциональна ширине дисплея камеры, обратно пропорциональна расстоянию наблюдения для оператора и ширине матрицы. С увеличением фокусного расстояния объектива абсолютная величина ошибки растет. Идентичность восприятия размеров оператором и зрителем зависит от размеров наблюдаемого оператором изображения. Для цифровой камеры зритель, воспринимающий изображения как оператор, находится на пятикратном удалении от экрана, а для аппарата «Конвас-автомат» - на двукратном. В первых рядах зрительного зала зритель видит изображение большим, чем

оператор, в задних – меньшим, причем ошибка в первых рядах по абсолютной величине больше чем в задних.

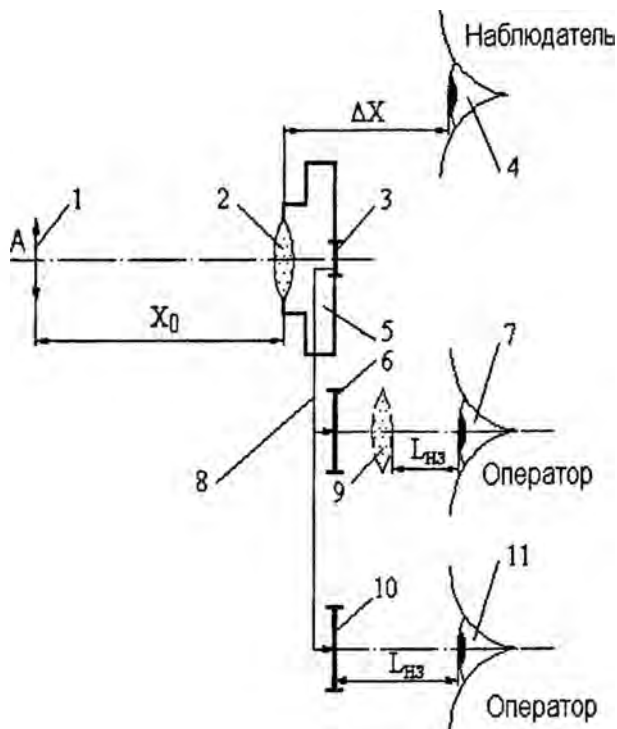


Рис.1. Схема размещения аппаратуры, наблюдателя и оператора относительно объекта: 1 – объект съемки, 2 – объектив кино- или видеокамеры, 3 – глаз наблюдателя, 4 – светочувствительная матрица или киноплёнка, 5 – кино- или видеокамера, 6 – плоскость оптического изображения в визирном устройстве, 7 – глаз оператора, 8 – электронный или оптический канал передачи изображения в визирное устройство для оператора, 9 – лупа визирного устройства, 10 – дисплей, 11 – глаз оператора

Анализ выражения для ошибки скорости в системе «наблюдатель-зритель» показывает, что при постоянном значении фокусного расстояния ошибка пропорциональна фокусному расстоянию и обратно пропорциональна ширине матрицы или пленки и относительной удаленности зрителя от экрана. Для обычных фокусных расстояний в цифровой видеокамере (менее 40-80 мм) относительная ошибка отрицательна. Это означает, что скорость изменения изображения на сетчатке зрителя по абсолютной величине меньше, чем на сетчатке наблюдателя. Этот эффект проявляется наиболее сильно для близко расположенных зрителей. Расчеты показали, что при увеличении фокусного расстояния в процессе съемки крутизна графиков уменьшается.

Ошибка по скорости в системе «оператор – зритель» определяется удаленностью зрителя от экрана для заданных расстояния наилучшего зрения и ширины дисплея камеры. Увеличение расстояния между зрителем и экраном уменьшает ошибку.

Очевидно, что при равенстве 0 ошибок можно определить оптимальные условия съемки (расположение камеры относительно объекта и наблюдателя), параметры съемки (начальное фокусное расстояние и скорость его изменения), параметры камеры (размер дисплея, и светочувствительной матрицы), оптимальное расположение зрителя относительно экрана.

Сравнение зависимостей положения зрителя от фокусного расстояния при нулевых ошибках размеров и скоростей свидетельствует, что они не идентичны, т.е. нельзя подобрать такие условия съемки и наблюдения, чтобы зритель одновременно воспринимал размер и осевую скорость объекта так же, как и наблюдатель.

Ошибка скорости в системе «оператор-зритель» вычисляется по той же формуле, что и ошибка размера, поэтому для данной системы существует возможность идентичного восприятия изображения.

УДК 621.1: 679.8

**Способы управления точностью геометрической формы  
деталей при обработке с ультразвуком**

Луговой В. П.

Белорусский национальный технический университет

Использование ультразвука при доводке в силу особенностей воздействия в зоне контакта детали и инструмента позволяет улучшить показатели точности и качества поверхности, интенсифицируя сам процесс обработки. Показатели точности обработки достигаются комплексным управлением технологическими (скорость, давление, материала и размер абразивного зерна) и акустическими (амплитуда и частота колебаний) факторами. Каждый из них может оказывать благоприятное воздействие в определенных диапазонах и сочетаниях численных значений. Особый интерес при этом, представляет возможность управления процессом обработки воздействием ультразвука на динамику и кинематику скольжения контактирующих поверхностей [1]. Были исследованы процессы обработки деталей, представляющие форму плоских, конических и сферических поверхностей. При доводке шариков характер движения изделий определяется относительным расположением изделий относительно стоячей волны, возбуждаемой в материале инструмента [2]. Различные значения действующей амплитуды колебаний над каждой из дорожек качения шариков приводят к различным величинам точности, их размеров в каждой дорожке (рис.1а). Однако смещение оси вращения нижнего диска 3 относительно оси гармонических колебаний, возбуждаемый источником колебаний 2 в верхнем диске позволяют управлять этим процессом и достигать одинаковые показатели точности и производительности во всех дорожках качения (рис.1б). Очевидно, что это достигается изменением направления вращения шариков вокруг своих осей при пересечении различных зон акустической волны.

Возможность управляющего действия ультразвука при обработке

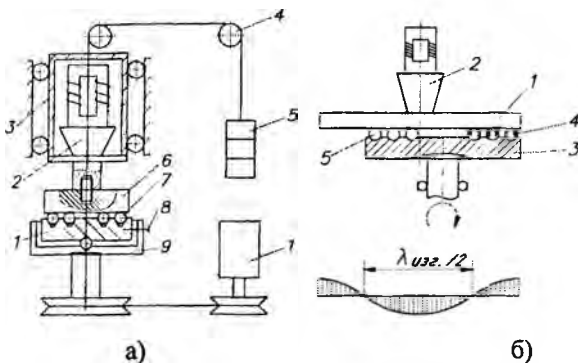


Рис. 1 Схемы обработки шариков с ультразвуком

деталей цилиндрической формы представлена на рис. 2. Один из инструментов соединен с источником колебаний 3 и возбуждает в нем акустическую изгибную волну 2. Изделия 4 уложенные в сепаратор 5, прижимаются диском 6 с усилием  $P$ . Способ позволяет устранить возникающие на предыдущих операциях отклонения формы изделий в продольном направлении: седлообразность, конусность, бочкообразность, или решить обратную задачу, т.е. образовать бочковидную форму.

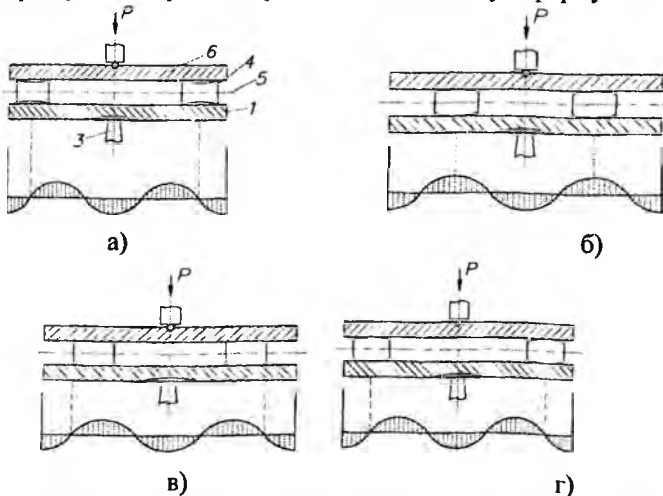


Рис.2 Схема обработки цилиндрических тел вращения

Эта цель достигается соответствующим расположением обрабатываемых изделий относительно гармонической волны ультразвуковых колебаний в материале инструмента. Детали с седлообразностью (рис.2а) ориентируются относительно ультразвуковой волны так, чтобы их середина совпадала с узлом данной волны, т.е. в сечении с минимальной амплитудой колебаний. При доводке бочкообразных деталей (рис.2б) их середина располагается против пучности волны. Образование же бочкообразности требует их смещения в зону узла колебаний упругой волны (рис.2г).

Устранение погрешностей формы отверстий в продольном направлении имеет те же закономерности взаимного расположения детали и инструмента (рис.3). В инструменте 1 возбуждается продольная звуковая волна 4 от источника колебаний 2. Седлообразные изделия 3 (рис.3а) предварительно отобранные для обработки должны быть расположены в пучности колебаний с максимальной амплитудой колебаний в среднем сечении, а бочкообразные (рис.3б) – в узле, что, в конечном счете, обеспечивает выравнивание погрешности формы.

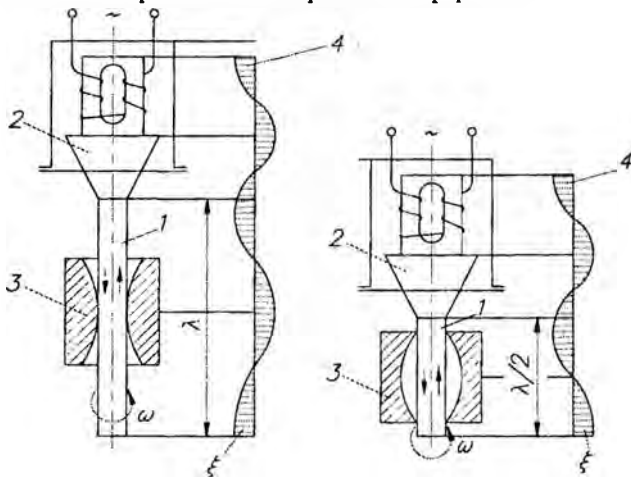


Рис. 3 Способ доводки отверстий с ультразвуком

Во всех приведенных схемах обработки используется волновой характер распространения упругой волны, как

акустический параметр, влияющий на показатели обработки, и свидетельствующий о возможности управления процессом ультразвуковой обработки для повышения точности геометрической формы обработанных поверхностей за счет оптимального выбора относительного расположения контактируемых поверхностей. Процесс абразивной обработки сопровождается одновременным улучшением качества обработанной поверхности, обусловленной высокочастотным воздействием инструмента через абразивную прослойку в зоне контакта [1,2]. При этом показатели производительности, т.е. съема материала в единицу времени, определяются совместным действием как технологических, так и акустических (частотой и амплитудой ультразвуковых колебаний) факторов.

Для проведения исследований процессов абразивной обработки цилиндрических тел и шариков был разработан настольный станок с вертикальной осью вращения. В шпинделе станка был встроены пьезокерамический преобразователь ультразвуковых колебаний с коническим волноводом, на котором закрепляется шлифовальный круг с алмазонасным слоем, диаметром 250мм. На инструменте возбуждалась резонансная изгибная волна частотой 18 кГц с одним узлом колебаний. Верхний диск выполнен в поперечном сечении по нерабочей стороне в форме гиперболы. Он закрепляется на стойке и имеет возможность эксцентричного смещения в горизонтальной плоскости.

#### Литература

1. Киселев, М. Г. Ультразвук в поверхностной обработке материалов / М. Г. Киселев, В. Т. Минченя, В. А. Ибрагимов. – Мн.: Тесей, 2001 г.
2. Луговой, В. П. Автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. П. Луговой. – Минск, 1981 г.
3. Устройство для доводки шариков: а. с. 664824 СССР, В24В,11/02. / М. Г. Киселев, М. Ю. Пикус, В. П. Луговой. Б. Д. Дисон.
4. Способ доводки тел вращения: а. с. 1794630 СССР, В24В,11/02 / В. П. Луговой.
5. Способ доводки отверстий: а. с. 1189577 СССР, В24В,11/02 / В. П. Луговой.



УДК 621.822

## Восстановление точностных параметров радиальных шарикоподшипников

Минченя Н. Т., Савченко А. Л.

Белорусский национальный технический университет

Несколько лет назад авторами был предложен способ восстановления радиально-упорного шарикоподшипника [1, 2]. Способ предназначен для восстановления прецизионных подшипников, вышедших из строя по точности вращения и не имеющих усталостных повреждений. Как показывает практика, преобладающим дефектом таких подшипников является абразивный износ деталей, в первую очередь шариков. Суть способа заключается в обкатке подшипника в среде абразива с составом, аналогичным составу для доводки шариков. Так как шарик в радиально-упорном подшипнике имеет двухосное вращение, то для управления кинематикой шариков и получения их точной сферической формы используются ультразвуковые колебания, приложенные к одному из колец.

В отличие от радиально-упорного, радиальный подшипник работает всем профилем дорожки качения, вследствие чего износ дорожек качения является более обширным по площади. При восстановлении радиального подшипника методом обкатки требуется, чтобы шарики обкатывались по всей поверхности желоба. В способе доработки подшипников в собранном виде [3] этого добиваются с помощью перекоса колец. Угол перекоса (рисунок 1) определяют по формуле:

$$\varphi = \frac{4\sqrt{(2r_{\text{ж}} - D_{\text{ш}})(e + \Delta e)}}{D + d},$$

где  $e$  – исходный радиальный зазор;  $\Delta e$  – увеличение радиального зазора в процессе приработки;  $D$  и  $d$  – посадочные диаметры подшипника;  $r_{\text{ж}}$  – радиус желоба;  $D_{\text{ш}}$  – диаметр шарика.

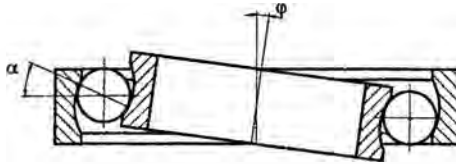


Рисунок 1 – Перекос колец в радиальном подшипнике

Вращение кольца, подвергнутого перекоосу, происходит вокруг наклоненной оси, описывающей конус с вершиной в центре симметрии подшипника. Вследствие этого шарики в процессе сферического движения обкатываются по всей поверхности дорожек качения. Сферическое движение в этом случае можно описать так же, как и в радиально-упорном подшипнике, однако угол контакта в этом случае будет непостоянным. При орбитальном движении шарика угол контакта за один оборот будет меняться от максимального до нуля, затем снова до максимального с противоположным знаком, затем снова до нуля и снова до максимума. Максимальный угол контакта  $\alpha_{\max}$  можно определить по формуле [4]:

$$\alpha_{\max} = \arccos \left( \frac{A \cos \varphi - \left( \frac{D_b}{2} + d + e - r_{\text{н}} \right)}{\sqrt{(A \sin \varphi)^2 + \left[ A \cos \varphi + \left( \frac{D_b}{2} + d + e - r_{\text{н}} \right) \right]^2}} \right),$$

где  $A = \frac{D_b}{2} + r_{\text{в}}$ ;  $D_b$  – диаметр по дну дорожки качения внутреннего кольца,  $r_{\text{в}}$ ,  $r_{\text{н}}$  – радиусы желобов внутреннего и наружного колец.

Как известно, при вращении колец подшипника шарик совершает сложное движение, состоящее из движения центра шарика по окружности, и сферического, т. е. вращения шарика вокруг собственной оси. Сферическое движение раскладывается на три составляющих:

$$\bar{\omega} = \bar{\omega}_{\text{к}} + \bar{\omega}_{\text{в}} + \bar{\omega}_{\text{кр}},$$

где  $\overline{\omega}_x$  – угловая скорость качения, вектор которой направлен перпендикулярно плоскости контакта;  $\overline{\omega}_v$  – угловая скорость вращения, вектор которой находится в плоскости контакта;  $\overline{\omega}_{кр}$  – угловая скорость кручения, вектор которой также находится в плоскости контакта [5]. В подшипнике составляющая  $\overline{\omega}_{кр}$  равна нулю, что является причиной неравномерного износа в процессе работы или неравномерного съема материала в процессе восстановления. Использование ультразвуковых колебаний позволяет добиться условий, при которых  $\overline{\omega}_{кр} \neq 0$ . Определение значения  $\overline{\omega}_{кр}$  показано в работах [1, 6].

Составляющая  $\omega_{кр}$ , т.е. угловая скорость кручения в произвольный момент времени зависит от угла контакта и для различных шариков будет различной. Для одного и того же шарика она будет изменяться в процессе орбитального движения так же, как и угол контакта, со сменой направления вращения. На величину съема материала будет влиять только скорость кручения, направление не имеет значения. Следовательно, считая закон изменения  $\omega_{кр}$  синусоидальным, можно предположить, что средняя скорость кручения шарика определяется как  $\omega_{кр}^{max} / \sqrt{2}$ . Максимальная скорость кручения рассчитывается так же, как и для радиально-упорного подшипника, т. е. по формулам, приведенным в работах [1, 6]. Все остальные показатели кинематики и контактного взаимодействия элементов подшипника определяются аналогично методикам, приведенным в работе [7]. Силу взаимодействия тел качения с сепаратором, в контакте с которым снимается основная часть припуска, можно найти из формул, приведенных в [4]:

$$P = \frac{W(EI)_{cp}}{0,126R^3},$$

где  $W$  – набегание шарика на сепаратор (разность путей, пройденных шариком и сепаратором);  $(EI)_{cp}$  – средняя жесткость колец сепаратора;  $R$  – средний радиус колец сепаратора.

Набегание шарика на сепаратор определяют по формуле:

$$W = \left( \frac{D_s}{2} + r_s + \frac{d}{2} \right) \frac{r_b \sqrt{e(2r_m - e)}}{r_m (r_m - e)} \sin \varphi,$$

где  $r_m = (r_b + r_n - d)$ .

Таким образом, зная показатели кинематики и контактного взаимодействия элементов подшипника, можно вычислить интенсивность съема припуска с шариков при восстановлении.

### Литература

1. Савченко, А. Л. Восстановление точностных параметров радиально-упорных шарикоподшипников / А. Л. Савченко, Н. Т. Минченя // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Прикладные науки. – 2005. – №6. – С. 93 – 97.
2. Способ восстановления работоспособности радиально-упорного шарикоподшипника: пат. 8942 Респ. Беларусь, МПК В 23 Р 6/00 / Минченя Н. Т., Савченко А. Л.; заявитель Бел. нац. техн. ун-т. – №а20031181; заявл. 16.12.2003; опубл. 28.02.2007 //Афіцыйны бюл. / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2007.
3. Способ доработки подшипников качения в собранном виде: заявка №2001120809/28 РФ, МПК F 16 C 1/00 / Давиденко О. Ю., Колесников М. А., Решетников М. К. – Заявл. 2001.07.24. опубл. 2003.07.10.
4. Курушин, М. И. Определение усилий и прочности сепаратора шарикоподшипника в условиях перекося колец / М. И. Курушин, А. И. Дубровкина, А. Н. Калгин // Сб. науч. тр. / Куйбышевский авиационный ин-т им. С. П. Королева. – 1969. – Вып. 40. – С. 117 – 140.
5. Филонов, И. П. Механика процессов обкатки / И. П. Филонов; под ред. П. И. Ящерицына. – Минск: Наука и техника, 1985. – 328 с.
6. Савченко, А. Л. Работа радиально-упорного подшипника в условиях осевых колебаний / А. Л. Савченко // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2005. – №1. – С. 35 – 38.
7. Савченко, А. Л. Исследование износа радиально-упорных шарикоподшипников / А. Л. Савченко, Н. Т. Минченя // Вестник БНТУ. – 2006. – №3. – С. 60 – 64.

УДК 679.87

**Установка для грубого шлифования шариков из хрупких  
неметаллических материалов**

Щетникович К. Г.

Белорусский национальный технический университет

В оптических и измерительных приборах, в ювелирных изделиях используют шарики из стекла, кварца, корунда и других минералов и синтетических камней. Заготовки, поступающие на операцию грубого шлифования, имеют значительные отклонения от сферической формы, а после ее выполнения должны иметь геометрические параметры одного уровня точности.

В оптическом производстве применяется станок для грубого шлифования шариков, который содержит два несоосных абразивных круга, вращающихся в противоположных направлениях, и эксцентрично расположенный приводной сепаратор. Станок предъявляет жесткие требования к точности исходных заготовок, так как в момент входа шариков в зазор между дисками на них действуют большие динамические нагрузки. В ювелирном производстве, обработку шариков осуществляют в неподвижном сепараторе между совершающим плоскопараллельное движение по окружности нижним диском с эластичным покрытием и верхним прижимным диском. Однако скорость кругового поступательного движения нижнего диска ограничена неуравновешенностью масс движущихся тел, поэтому невозможно применение интенсивных режимов обработки.

С учетом недостатков рассмотренных станков была разработана установка для грубого шлифования шариков между двумя несоосными дисками в приводном сепараторе. Конструкция применяемого инструмента, показана на рис. 1. Нижний диск 11, имеющий резиновое покрытие, вместе с оправкой 12 закреплен на нижнем шпинделе 13. На верхнем шпинделе 5 закреплена оправка 6 с сепаратором 9 в отверстиях которого размещены обрабатываемые шарики 15. Соосно с сепаратором на насыпном подшипнике 7 установлен верхний диск, состоящий из двух полудисков 3 и 8, скрепленных двумя планками 4,. Насыпной подшипник обеспечивает соосность сепаратора и верхнего диска и не препятствует его

самоустановке параллельно торцевой поверхности нижнего диска.

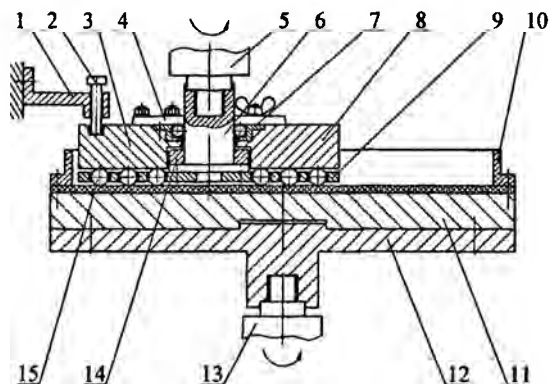


Рис. 1. Инструмент для грубого шлифования шариков

На оправке 6 установлено кольцо 14, которое дает возможность регулировать натяг между заготовками и верхним диском. Шлифование шариков можно производить при свободно вращающемся и неподвижном верхнем диске. Для фиксации верхнего диска используют съемный кронштейн 1 выдвижной палец 2 которого входит в отверстие на верхнем диске. Кольцо 10 предотвращает выход абразивной суспензии из рабочей зоны. Нагрузка на шарики определяется весом верхнего диска и может быть увеличена с помощью сменных грузов. Сборная конструкция верхнего диска облегчает загрузку заготовок.

Обработка шариков, расположенных в приводном сепараторе, происходит вследствие разности линейных скоростей нижнего диска и сепаратора. Скорость некоторой точки  $M$  нижнего диска (рис. 2) относительно вышерасположенной точки на сепараторе равна

$$\vec{V}_{отн} = \vec{V}_n - \vec{V}_c = \vec{\omega}_n \times \vec{R}_n - \vec{\omega}_c \times \vec{R}_c,$$

где  $V_n$  и  $V_c$  – линейные скорости нижнего диска и сепаратора;  $\vec{\omega}_n$  и  $\vec{\omega}_c$  – векторы угловой скорости нижнего диска и сепаратора;  $R_n$  – радиус-вектор точки  $M$ , проведенный из точки

$O_n$  на оси вращения нижнего диска;  $R_c$  - радиус-вектор, проведенный из точки  $O_c$  на оси вращения сепаратора.

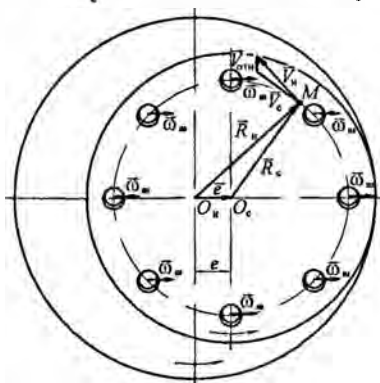


Рис. 2. Кинематика шариков в рабочей зоне

При равенстве угловых скоростей нижнего диска и сепаратора, т.е.  $\bar{\omega}_n = \bar{\omega}_c = \bar{\omega}$  относительная скорость равна

$$\vec{V}_{отн} = \bar{\omega} \times (\vec{R}_n - \vec{R}_c) = \bar{\omega} \times \vec{e},$$

где  $\vec{e}$  – вектор, соединяющий оси вращения нижнего диска  $O_n$  и сепаратора  $O_c$ .

Следовательно, нижний диск относительно сепаратора движется поступательно по окружности радиусом  $e$ . Поскольку коэффициент трения шара об эластичное покрытие нижнего диска намного больше коэффициента трения о верхний диск, то линейная скорость точки шара, контактирующей с нижним диском, в относительном движении равна относительной скорости  $V_{отн}$ . Угловая скорость вращения шара будет равна

$$\omega_{ш} = V_{отн} / r,$$

где  $r$  – радиус шара.

Вектор угловой скорости шара  $\bar{\omega}_{ш}$  перпендикулярен вектору  $\vec{V}_{отн}$  и поэтому для всех обрабатываемых шариков направлен параллельно линии  $O_n O_c$ . Относительно вращающегося сепаратора

вектор  $\vec{\omega}_ш$  равномерно поворачивается на  $360^\circ$  за каждый его оборот. Следовательно, мгновенная ось вращения шарика постоянно изменяет свое положение относительно инструмента.

В процессе обработки каждый шарик действует на верхний диск с силой трения, направленной параллельно вектору  $\vec{V}_{отн}$ . Равнодействующая этих сил проходит через ось диска, поэтому относительно сепаратора верхний диск неподвижен.

При вращательном движении нижнего диска и сепаратора с одинаковой угловой скоростью, в относительном движении реализуется поступательное движение инструмента по окружности. Такая кинематика инструмента обеспечивает одинаковые условия шлифования для всех шариков в обрабатываемой партии. Допустимая скорость вращательного движения значительно выше скорости плоскопараллельного движения и, следовательно, интенсивность обработки может быть повышена.

Торможение верхнего диска позволяет увеличить скорость проскальзывания шариков в зоне обработки. Скорость съема припуска возрастает, однако величина скорости проскальзывания зависит от расположения шарика в сепараторе, что вызывает неравномерность обработки заготовок.

Экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность применения рассмотренной установки при обработке шариков из минерального сырья. Например, при шлифовании шариков из кварца, имеющих отклонения от сферической формы 1,4 – 1,7 мм при среднем диаметре 11 мм, через три часа обработки разноразмерность шариков составила 0,3 мм, а отклонение от сферической формы не превышало 0,2 мм. При обработке использовалась абразивная суспензия порошка карбида кремния зеленого зернистостью 12.

#### Выводы

1. В разработанной установке используется вращательное движение инструмента, что упрощает ее конструкцию и позволяет вести обработку на повышенных скоростях по сравнению со станками с плоскопараллельным движением инструмента.

2. Установка дает возможность обрабатывать заготовки со значительными отклонениями от сферической формы.



# Оптико-электронные и лазерные приборы и системы

УДК 681.7.023.72

Исследование процесса двусторонней обработки линз

Зайцев М. В., Козерук А. С., Кузнецик В. О.

Белорусский национальный технический университет

Для реализации технологии одновременной двусторонней обработки линз разработано устройство, которое монтируется на серийные шлифовально-полировальные или полировально-доводочные станки моделей ШП или ПД.

Обработка на устройстве происходит в условиях свободного притирания, поэтому величину таких наладочных параметров, как амплитуд  $A_1$  и  $A_2$  возвратно-вращательных перемещений инструментов, а также скоростей вращения детали  $\omega_0$  и входного звена исполнительного механизма базового станка  $\omega_2$  в каждом конкретном случае определяет рабочий-оптик методом подбора, исходя из своего опыта и интуиции. С целью уменьшения затрат времени на поиск наиболее выгодных режимов работы технологического оборудования выполнено математическое моделирование процесса обработки, которое позволяет с помощью ЭВМ рассчитать характер распределения путей трения (резания)  $l$  точек детали относительно инструмента в зависимости от величины наладочных параметров.

Используя разработанную математическую модель и выполнив соответствующие расчеты, получим матрицу путей трения  $l_{ij}$  опорной точки  $M_{ij}$  на поверхности линзы за время обработки  $t$ . Тогда вычисленный по формуле

$$\Delta l_{\text{отн}} = \frac{l_{\text{max}} - l_{\text{min}}}{l_{\text{max}}} \cdot 100.$$

Параметр  $\Delta l_{\text{отн}}$  можно применить для оценки качества детали по локальным погрешностям, а время  $t$ , в течение которого среднее значение пути трения  $l_{\text{cp}} = \Sigma l_{ij} / K^2$  опорной точки достигает заданной величины, будет характеризовать производительность процесса.

На стадии проведения теоретических исследований использовались следующие исходные данные: диаметр детали 90 мм, радиусы кривизны  $R_1 = 71,26$  мм и  $R_2 = 149,58$  мм, диаметр инструментов 80 мм, а  $\omega_{и,2} = 0,83 \omega_б$ .

Значение параметров  $\Delta l_{отн}$  и  $t$ , рассчитанные для первой поверхности линзы при  $A_1 = 70$  мм и изменениях  $\omega_б$  в пределах от 30 до 95 об/мин и  $\omega_2$  от 5 до 70 об/мин, приведены на рис.1 и 2 соответственно.

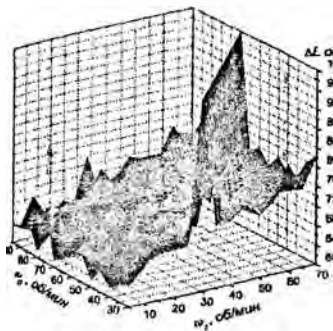


Рис.1

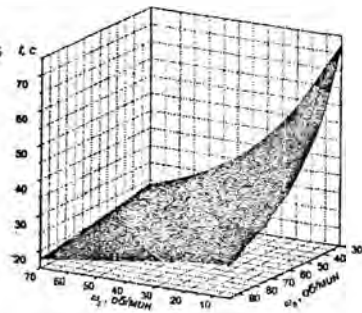


Рис.2

Из рис.1 следует, что распределение  $\Delta l_{отн}$  представляет собой наклонную в сторону малых величин  $\omega_2$  рельефную поверхность с преимущественно хаотичным расположением экстремальных значений. Закономерным является наличие максимумов при  $\omega_б = 75$  об/мин для всего исследуемого диапазона  $\omega_2$ , а также 100 %-е значение  $\Delta l_{отн}$  в случаях, когда  $\omega_2 = \omega_б$ . Последнее свидетельствует о том, что имеются точки детали, которые за время обработки не попадают в контакт с инструментом и для них  $l_{min} = 0$ . Это значит, что во избежание снижения качества формообразования устанавливать одинаковые скорости вращения детали и входного звена исполнительного механизма станка, а также  $\omega_б = 75$  об/мин, нежелательно.

Что касается времени обработки, то его значения, как видно из рис. 2, составляют гладкую поверхность с резким углом наклона в сторону больших величин скоростей  $\omega_б$  и  $\omega_2$ . Как видно

из сравнительного анализа рисунков 1 и 2, следует применять максимально возможные значения  $\omega_0$  и минимальные  $\omega_2$ .

Анализ теоретических исследований зависимости производительности обработки от амплитуды возвратно-вращательного движения инструмента показывает, что уменьшение  $A_1$  от 70 до 30 мм приводит к увеличению времени обработки в 1,8 раза. Снижается, как показали расчеты, и качество детали. Поэтому на практике следует стремиться работать на максимально возможных значениях амплитуды  $A$ .

Для проверки степени адекватности созданной математической модели результатам реальной обработки проведены экспериментальные исследования процесса шлифования и полирования линзы из оптического стекла марки Ф101 с теми же геометрическими параметрами, что и в вышеприведенных теоретических расчетах. При этом обработке подвергалась поверхность детали с  $R_f = 71,26$  мм.

Шлифование выполняли при неограниченной подаче абразивной суспензии микропорошка М10 на основе электрокорунда белого, удельном давлении  $100 \text{ г/см}^2$  и  $\omega_0 = 50$  об/мин, изменяя  $\omega_2$  в пределах от 5 до 70 об/мин, а амплитуду  $A_1$  – в диапазоне  $30 \pm 70$  мм.

На стадии полирования удельное давление составляло  $40 \text{ г/см}^2$ ,  $\omega_0 = 40$  об/мин, подача полирующей суспензии – ручная. Скорость  $\omega_2$  изменяли от 5 до 70 об/мин.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис.3. Анализ полученных закономерностей показывает, что на стадии шлифования при  $A_1 = 70$  мм,  $\omega_0 = 50$  об/мин и изменении скорости  $\omega_2$  от 5 до 70 об/мин величина съема припуска увеличивается более чем в два раза (кривая 1). Если же шлифование выполнять при  $\omega_0 = 80$  об/мин и  $\omega_2 = 30$  об/мин, а изменять амплитуду возвратно-вращательного перемещения инструмента, то с увеличением последней от 30 до 70 мм производительность возрастает в два раза (кривая 2).

Полирование детали при  $\omega_0 = 40$  об/мин,  $A_1 = 70$  мм и изменении  $\omega_2$  показало, что с повышением последней до 40 об/мин происходит увеличение  $\Delta N$  (кривая 3), т.е. качество обработки ухудшается. При  $\omega_2 = \omega_0 = 40$  об/мин  $\Delta N$  достигает максимального значения, а затем уменьшается.

Экспериментально установленные закономерности изменения производительности процесса и качества детали в зависимости от режимов обработки, представленные на рис.3 в виде кривых 1, 2 и 3, согласуются с теоретическими расчетами, приведенными соответственно на рис.1 и на рис.2.

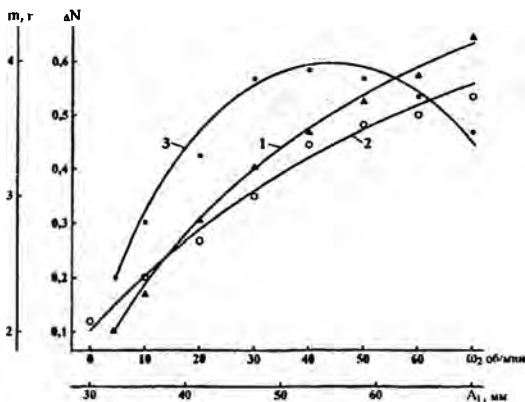


Рис. 3

На основе изложенного можно сделать вывод о том, что разработанная математическая модель позволяет с помощью ЭВМ выявить наиболее выгодные параметры процесса одновременной двусторонней обработки прецизионных двояковыпуклых линз с точки зрения достижения высокой производительности формообразования и минимальных значений кинематической составляющей локальных погрешностей на исполнительных поверхностях детали.

### Литература

1. Козерук, А. С. и др. Заявка № а20041220 от 23.12.04 г. на выдачу патента РБ на изобретение «Устройство для одновременной двусторонней обработки оптических деталей с выпуклыми поверхностями».
2. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 368 с.
3. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. – Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. – 176 с.

**Анализ критериев качества в растровых системах  
объемного изображения**

Артюхина Н. К., Зайцева Е. Г., Михаленок Е. В.  
Белорусский национальный технический университет

Получение объемного изображения хорошего качества всегда являлось одной из наиболее сложных задач растровой фотографии и проекции. По поводу факторов, влияющих на качество изображения в течение многих лет высказывались самые разнообразные точки зрения, в том числе и абсолютно полярные. Основным фактором, определяющим качество ИИ, является разрешающая способность фотослоя или, точнее, системы ЛЭ-фотослой. Оказалось, что разрешающую способность  $R$  в ИИ можно непосредственно связать с легко определяемой величиной фотографической разрешающей способности  $R_\Phi$  системы ЛЭ-фотослой на стадии съемки простой зависимостью

$$R = K_B K_H V R_\Phi, \quad (1)$$

где  $K_B$  – коэффициент, учитывающий влияние схемы восстановления ИИ;  $K_H$  – коэффициент, учитывающий влияние наложения элементарных изображений при восстановлении ИИ;  $V$  – увеличение линз раstra для данного сечения ИИ.

Данная формула проста и удобна для предварительных расчетов, однако недостатком её является то, что в ней слишком большой вес придается коэффициентам  $K_B$  и  $K_H$  экспериментальное определение которых трудоемко.

Последние работы в этой области показали, что хорошее совпадение результатов расчетных и экспериментальных оценок качества ИИ как места пересечения пучков лучей, идущих от различных линзовых элементов и изображающих эту точку. Исследования последних лет позволили предположить, что наиболее важным параметром многозвенного процесса ИФ (интегральной фотографии) является фотографическая разрешающая способность системы элемент раstra-фотослой, а также ряд величин, определяемых расстоянием от плоскости наводки раstra до анализируемой плоскости объекта съемки. Важно то, что фотографическая разрешающая способность системы элемент раstra-фотослой является комплексным критерием, зависящим от многих параметров ПФС, таких, как дифракция и аберрации

ЛЭ растра, технология изготовления последнего, характеристики фотослоя и точность расположения его относительно растра.

Определим поперечный размер  $\delta_x(z)$  пятна нерезкости, являющегося ИИ точечного объекта  $A$  (рис.1). Пусть РФС (растровая фокусирующая система) фотографируется точечный объект  $A'$ . При этом растр сфокусирован на плоскость наводки  $H'$ , а объект лежит в произвольной плоскости. Величину  $\delta_x(z)$  можно определить пересечением двух пучков и для идеальной РФС она не зависит от их числа.

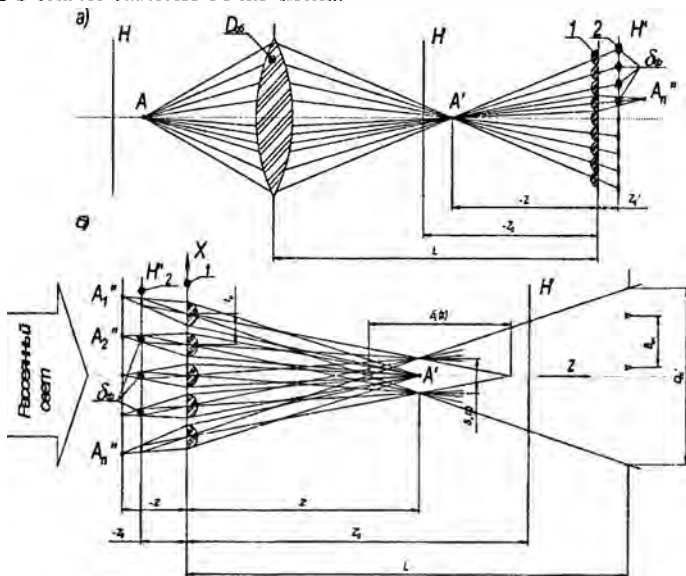


Рисунок 1 – Формирование точечного объекта:

а – этап съемки; б – этап восстановления;

1 – растр; 2 – фотослой;  $H, H', H''$  – сопряженные плоскости;

$D_{об}$  – объектив;  $D'_{об}$  – ИИ выходного зрчка объектива

На стадии восстановления каждое микроизображение проецируется в плоскость наводки  $H'$  (рис.1, б). При этом оказывается, что в плоскости, где при съемке находился точечный объект  $A'$ , локализуется наиболее узкое место пересечений пучков, идущих от разных ЛЭ, которое глаз принимает за ИИ точки  $A$ .

Тогда размер кружка нерезкости  $\delta_x(z)$  в ИИ можно вычислить по формуле

$$\delta_x(z) = \delta_\phi V = \delta_2 V + VK_1 K_2 / R_D = \delta_2 \gamma + \gamma Z', \quad (2)$$

где  $V = Z' / (-Z_0)$  – увеличение растра для данного сечения ИИ, причем  $Z_0$  – расстояние между плоскостью растра и фотослоем,  $Z'$  – расстояние между плоскостью растра и анализируемой плоскостью.

При этом суммарная угловая разрешающая способность съемочной и проекционной растровых систем определяется из выражения:

$$\gamma = K_1 K_2 / [R_D (-Z_0)]. \quad (3)$$

Поскольку при восстановлении происходит дополнительное размытие ИИ связанное как с расширением каждого отдельного пучка, так и с неточностями суммирования этих пучков, то слабое  $VK_1 / R_D$  следует умножить на коэффициент  $K_2$ , учитывающий эти явления, т.е. оно будет равно  $VK_1 K_2 / R_D$ .

Важной особенностью формул (2) и (3) является то, что все входящие в них переменные легко вычисляются или определяются экспериментально в отличие от выражений аналогичного типа, предлагавшихся другими авторами. Зная величину  $\delta_x(z)$ , можно приступить к нахождению разрешающей способности в сечениях ИИ. Назовем такую зависимость распределением разрешающей способности по пространству ИИ. В результате окажется, что границы наиболее узких мест пересечений этих пучков, т.е. поперечные размеры  $\delta_x(z)$  кружков нерезкости, лежат на поверхности пространственной фигуры, образованной вращением ломаной  $BCDE$  (рис.2, а) вокруг оси  $z$ . Ломаная будет состоять из прямых  $BC$ ,  $CD$  и  $DE$ , описываемых соответствующими уравнениями, из которых следуют зависимости, определяющие распределение разрешающей способности по пространству ИИ:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0.5[d - z'(0.5\gamma + d/z'_0)]^{-1} & \text{при } z' < 0; \\ R_2 &= 0.5[d + z'(0.5\gamma + d/z'_0)]^{-1} & \text{при } 0 < z' < z'_0; \\ R_3 &= 0.5[-d + z'(0.5\gamma - d/z'_0)]^{-1} & \text{при } z' > z'_0. \end{aligned} \quad (4)$$

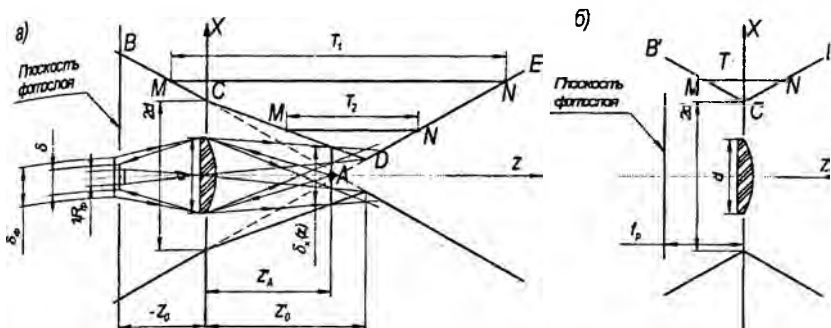


Рисунок 2 – Определение величины кружка нерезкости и глубины резко изображаемого пространства в ИФ:  
 а – случай фокусировки ЛЭ на конечное расстояние;  
 б – случай фокусировки ЛЭ на бесконечность

Следует подчеркнуть, что описанный анализ проводился для наиболее общего случая фокусировки ЛЭ раstra на конечное расстояние. Для частного случая расположения фотослоя в фокальной плоскости раstra выражение для вычисления  $R_{\infty}$  принимает вид

$$R_{\infty} = [z'\gamma + 2d]^{-1}. \quad (5)$$

Поскольку для достижения предельной величины  $R$  необходимо производить фокусировку раstra на объект съемки (а это возможно только при реализации метода ИФ), то из вышеизложенного следует, что качество растрового объемного изображения, формируемого методом ИФ, всегда выше, чем при применении других методов растровой фотографии. Зная уравнение ломаной  $BCDE$  и задаваясь величиной разрешения  $R$  в сечении объемного изображения плоскостью, перпендикулярной оси  $z$  (см. рис.2, а), нетрудно определить зону пространства объемного изображения с гарантированным разрешением  $R$  в любом сечении. Если данное разрешение  $R$  будет соответствовать допустимому, то эта зона будет представлять собой глубину резко изображаемого пространства (ГРИП). Решая уравнения (5) совместно с уравнением прямой  $MN$   $x - 1/(2R) = 0$ , можно определить координаты точек пересечения этой прямой с пря-



мыми  $BC$  и  $DE$  [если  $d \leq 1/(2R)$ ] или  $CD$  и  $DE$  [если  $d \geq 1/(2R)$ ].

Расстояние между этими точками и будет представлять собой ГРИП. В случае, если растр сфокусирован на бесконечность, ГРИПП будет определяться пересечением прямой  $MN$  с прямыми  $B'C'$  и  $C'D'$  (см. рис.2, б).

В итоге были получены следующие зависимости:

$$T_1 = \frac{2z'_0}{R(2d + \gamma z'_0)} \quad \text{при } d \leq 1/(2R); \quad (6)$$

$$T_2 = \frac{4dz'_0(1 - \gamma Rz'_0)}{R(4d^2 - z_0'^2 \gamma^2)} \quad \text{при } d \geq 1/(2R); \quad (7)$$

$$T_\infty = \frac{2(1 - 2Rd)}{R\gamma} \quad \text{при } d \leq 1/(2R), \quad (8)$$

где  $T_1$  – ГРИП в случае наводки растра на конечное расстояние при  $d \leq 1/(2R)$ ;  $T_2$  – ГРИП в случае наводки растра на конечное расстояние при  $d \geq 1/(2R)$ ;  $T_\infty$  – ГРИП при наводке растра на бесконечность.

Из зависимостей (6–8) можно сделать выводы:

1. В интегральной фотографии ГРИП зависит от диаметра линзового элемента, углового разрешения системы растр-фотослой, расстояния от растра до плоскости наводки и допустимого разрешения в сечениях объемного изображения, т.е. способность к воспроизведению малых деталей в определенной ГРИП в изображении является функцией самой РФС.

2. Границы ГРИП располагаются сравнительно симметрично по обе стороны плоскости наводки. Таким образом, для максимального охвата изображения объекта резко изображаемым пространством следует располагать плоскость наводки растра приблизительно в середине пространства предметов или его промежуточного изображения, а именно в той плоскости, которую следует передать наиболее резко.

3. При наводке растра на конечное расстояние ГРИП при тех же параметрах растра превышает ГРИП при паводке растра на бесконечность, т.е. для получения предельно возможных величин разрешений и ГРИП в объемном изображении необходимо осуществлять фокусировку растра на конечное расстояние.

4. В случае фокусировки растра на бесконечность для увеличения  $T_{\infty}$  следует уменьшить диаметр ЛЭ или увеличивать  $\gamma$ , что, однако, не всегда возможно по технологическим причи-

УДК 681.7.023.72

**Исследование показателей качества и производительности  
формообразования прецизионных сферических  
поверхностей**

Таболина Е. С., Козерук А. С., Кузнецик В. О.  
Белорусский национальный технический университет

В традиционной технологии приборостроения формообразование линз с прецизионными исполнительными поверхностями происходит на шлифовально-полировальных и полировально-доводочных станках мод. ШП и ПД в условиях свободного притирания инструмента и заготовки через слой абразивной суспензии определенного состава. На данном технологическом оборудовании движениями резания являются вращение шпинделя станка и возвратно-вращательное перемещение выходного звена его исполнительного механизма (штанги), в качестве которого служит шарнирный четырехзвенник. При этом интенсивность съема припуска определяется формулой Ф. Престона

$$I = kpl,$$

где  $k$  – технологический коэффициент, зависящий от марки стекла, состава и зернистости абразивной суспензии, материала инструмента, температуры и других факторов;  $p$  – давление в зоне соприкосновения инструмента и детали;  $l$  – путь трения (резания), который проходит произвольно выбранная опорная точка на поверхности детали относительно инструмента за время обработки.

Для прогнозирования общей и локальной погрешностей, а также производительности процесса рассчитывали характер распределения пути трения и давления в непрерывно изменяющейся по величине зоне контакта инструмента и детали. С этой целью на обрабатываемой поверхности выделяли  $M_j$  опорных точек, представляющих собой пересечение  $i$ -й концентрической

окружности с  $j$ -м лучом (радиальным сечением), причем  $i, j = \overline{1, K}$ .

Расчет выполняли по формулам, полученным в процессе математического моделирования обработки линз.

Рассчитывали параметр  $Q = p \cdot l$  для сферической поверхности радиусом кривизны  $R_l = 78,26$  мм линзы диаметром 90 мм. Относительное значение  $\Delta Q_{OTH}$ , вычисленное по формуле

$$\Delta Q_{OTH} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} \cdot 100,$$

где  $Q_{max}$  и  $Q_{min}$  – максимальное и минимальное значения параметра  $Q$  для точки  $M_{ij}$ , использовали для оценки локальной погрешности, а время  $t$ , в течение которого среднее значение  $Q_{cp} = \sum Q_{ij} / K^2$  для выбранной опорной точки достигает заданной величины – для характеристики производительности процесса.

Результаты расчёта представлены на рис. 1.

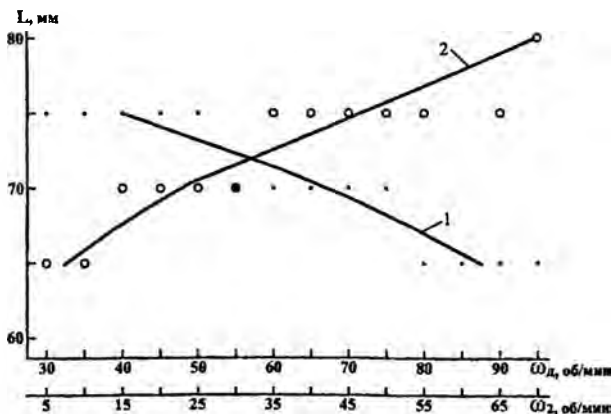


Рисунок 1 – Зависимость амплитуды  $L$ , при которой обеспечивается минимум относительного параметра  $Q$  от скоростей  $\omega_1$  и  $\omega_2$

Из анализа рисунка видно, что с увеличением скорости вращения  $\omega_0$  от 30 до 95 об/мин значение амплитуды  $L$ , уменьшается с 75 до 65 мм (кривая 1 на рис.1), а при возрастании скорости вращения инструмента  $\omega_2$  от 5 до 70 об/мин происходит обратное – экстремальная амплитуда  $L$  увеличивается с 65 до 80 мм (кривая 2 на рис.1).

Для проверки соответствия теоретических расчетов реальному процессу формообразования проведены экспериментальные исследования зависимости  $\Delta N$  от наладочных параметров станка. Измерения данной погрешности выполняли на универсальном интерферометре KUI-35/RME-500 Kugler (ФРГ).

Полированию подвергалась поверхность линзы с  $R_1 = 71,26$  мм, изготовленной из оптического стекла марки К8. Полирование выполняли на станке мод. 6ПД-100. Удельное давление составляло  $40 \text{ г/см}^2$ , подача полирующей суспензии – ручная, полировальник – полиуретановый.

Результаты приведены на рис.2.

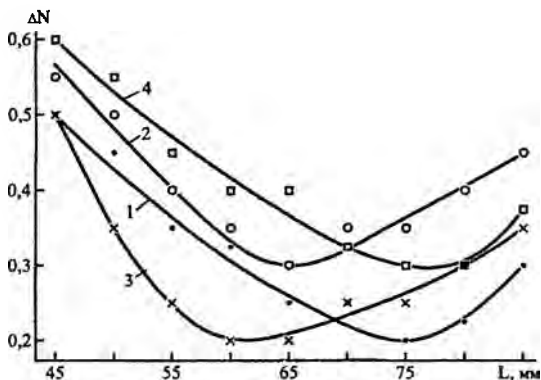


Рисунок 2 – Зависимость локальных погрешностей  $\Delta N$  от величины амплитуды  $L$  при фиксированных значениях  $\omega_0$  и  $\omega_2$

Анализ показывает, что при скоростях вращения детали 45 и 85 об/мин и  $\omega_2 = 30$  об/мин (кривые 1 и 2 на рис.2) минимальное значение локальной погрешности достигается в случае, когда амплитуда составляет соответственно 75 и 65 мм. Если назначить скорость вращения инструмента 10 и 70 об/мин и  $\omega_0 = 60$  об/мин (кривые 3 и 4), то минимум  $\Delta N$  наблюдается при амплитуде 63 и 78 мм.

Полученные значения амплитуды, при которых локальная погрешность достигает минимума, согласуется с теоретическими расчетами, приведенными на рис.1.

На основе выполненных теоретико-экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для уменьшения кинематической составляющей локальной погрешности на обрабатываемой выпуклой сферической поверхности переносную угловую скорость инструмента  $\omega_2$  и скорость вращения детали следует назначать неравными между собой, нечетными и не попадающими в соотношение  $\omega_2 / \omega_0 = 1/3$ .

2. С целью минимизации динамической и температурной составляющих локальной погрешности скорость вращения детали и переносную скорость инструмента необходимо назначать минимальными, а амплитуду возвратно-вращательного перемещения последнего – максимальной. Такое сочетание отмеченных наладочных параметров станка обеспечивает сравнительно высокую производительность обработки на стадии доводки.

### Литература

1. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 368 с.
2. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. – Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. – 176 с.

# Инженерное обеспечение строительства

УДК 539.3

Анализ деформирования материала методами  
термодинамики обратимых процессов

Мойсейчик Е. А.

Белорусский национальный технический университет

При деформировании материалов в упругой, упруго-пластической и пластических стадиях происходит превращение энергии деформации в тепловую и соответственно повышается температура деформируемого объема материала [2].

Целью данной работы является сопоставление методов анализа процессов деформирования материалов приемами термодинамики обратимых процессов.

Процессы деформирования металлов и других материалов с указанных позиций рассматриваются в работах [3–7].

Л.И.Седов в работе [3] получает универсальные термодинамические соотношения, справедливые при деформировании любых материальных сред. Термодинамические функции при построении теорий конкретных тел Л.И.Седов [3] рекомендует определять с помощью статистической физики, из опытных данных, посредством некоторых дополнительных гипотез, либо комбинаций этих трех способов. Конкретные подходы реализованы в ряде работ [4–8].

Г. Циглер [4] вводит представление о макроскопической силе  $X_k$  в виде суммы обратимой  $X_k^{(r)}$  и необратимой  $X_k^{(i)}$  сил. В деформируемых средах в качестве термодинамической силы предложено [4] рассматривать тензор напряжений. Зная функцию диссипации можно получить определяющие уравнения, связывающие скорости деформации в сплошных средах с необратимой частью тензора напряжений [4].

М. А. Зайковым [5] термодинамический анализ процесса пластического деформирования использован для описания в общем виде зависимостей сопротивления деформации металлов от степени ( $\varepsilon$ ), температуры ( $T$ ) и скорости деформации ( $u$ ).

При выводе зависимости  $\sigma = f(\varepsilon)$ , описывающие кривые упругости металлов, автор [5] воспользовался уравнениями термодинамики обратимых процессов и получил соотношение:

$$\frac{\partial \sigma}{\sigma} = \frac{\left( \frac{\partial \Phi}{\partial \varepsilon} \right)_{u, T} d\varepsilon}{\Phi - F}, \text{ где} \quad (1)$$

$F$  – свободная энергия. Из выражения (1) можно получить зависимости  $\sigma = f_1(\varepsilon)$ ,  $\sigma = f_2(T)$  [5]. Зависимость сопротивления металла деформированию от температуры при постоянных степени и скорости деформации устанавливается М. А. Зайковым [5] подобным путем.

Развернутый анализ процессов пластического деформирования с рассмотрением ряда конкретных процессов дан В. Ф. Радзивончиком [6]. Выразив закон сохранения энергии, с одной стороны через характеристики деформируемой среды (плотность,  $\rho$  теплопроводность  $\alpha$ ) и параметры процесса (скорость движения частиц  $u$ , составляющие внешних сил  $\sigma_{ab}$  и перемещений  $u_i$ , градиент температуры  $dT/dq_i$ ), а с другой стороны, через закономерности движения самой энергии, и сопоставляя полученные уравнения, В. Ф. Радзивончик получает для монотонного пластического деформирования изотропной среды при отсутствии конвективной теплопередачи потоком внутренней энергии и адиабатическом и стационарном (скорость постоянная) процессе деформирования основные зависимости. Однако для практического использования полученных выражений необходимо еще знать связь внутренней энергии с параметрами процесса. С использованием законов термодинамики, пластического деформирования, экспериментальных данных автор [6] получает зависимость сопротивления деформации материала от ряда параметров.

Н. С. Фастовым [7] в основу термодинамического анализа процесса деформирования твердых тел положена свободная энергия и релаксационные явления. Термодинамическое состояние деформируемого тела характеризуется в состоянии равновесия температурой  $T$  и тензором деформации  $\varepsilon_{ik}$ , являющимися термодинамическими внешними параметрами, а для неравновесного состояния еще и совокупностью внутренних тер-

модинамических параметров. Для исследования конкретных деформируемых тел, кроме предложенных автором зависимостей нужно найти выражение для свободной энергии, а также уравнение для определения тензоров релаксации [7].

В работе [8], исходя из допущений малости линейных и угловых деформаций, постоянства плотности деформируемого объема, излагается подход к построению реологических зависимостей в сплошной деформируемой среде при учете только механических и тепловых процессов и дается постановка такой задачи для деформируемого тела.

Таким образом, изложенные термодинамические подходы используют упрощения, которые могут привести к недопустимым погрешностям при анализе процессов деформирования. Основными из таких погрешностей являются представление деформирования с конечной скоростью как термодинамически обратимого процесса, что действительно только при бесконечно малых скоростях приложения нагрузки; неучет особенностей реального строения материалов, изменений в материалах, происходящих при технологических и эксплуатационных воздействиях и др.

### Литература

1. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел: Пер. с англ./ А. Надаи; Под ред. Г. С. Шапиро. – М.: ИЛ, 1954. – 648 с.
2. Maugin, G.A. The thermomechanics of plasticity and fracture / G. A. Maugin. – Cambridge^Cambridge University press. – 1992. – 350 p.
3. Седов, Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1973. – Т. 1. – 536 с.
4. Циглер, Г. Экспериментальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды / Г. Циглер; пер. с англ. – М.: Мир, 1966. – 135 с.
5. Зайков, М. А. Режимы деформации и усилия при горячей прокатке / М. А. Зайков. – Свердловск: Metallurgizdat, 1960. – 302 с.
6. Радзивончик, В. Ф. Скоростное пластическое деформирование металлов / В. Ф. Радзивончик. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1967 – 211 с.



7. Фастов, Н. С. К термодинамике необратимых процессов в упруго-деформированных средах / Н. С. Фастов // Проблемы металлостроения и физики металлов. – М.: Металлургиздат, 1958. – № 5.
8. Хорошун, Л. П. К термодинамике механических и тепловых процессов в сплошных средах / Л. П. Хорошун // Вопросы механики реального твердого тела. – Киев: Наукова думка, 1964. – Вып. 2. – С.107–113.

УДК 528.48

**Модификация геодезических методов выноса  
разбивочных осей сооружений культурно-  
спортивного комплекса «МИНСК-АРЕНА»**

Нестеренок М. С., Щербин И. И.

Белорусский национальный технический университет

Электронный тахеометр служит современным измерительно-вычислительным средством автоматизации и модернизации геодезических разбивочных работ при возведении сооружений. Во внутренней памяти процессора электронного тахеометра имеются прикладные программы, например «Вынос в натуру» (Setting out), «Связующие расстояния» (Tie Distant) и др.

Первый шаг программы: вычисление координат предварительной точки  $I'$  по формулам

$$x' = x_{\text{СТ}} + d \cos \alpha; \quad y' = y_{\text{СТ}} + d \sin \alpha.$$

Второй шаг программы: вычисление величин редуционных перемещений светоотражателя из предварительной точки  $I'$  в проектную точку  $I$

$$\Delta x_R = x_{\text{пр}} - x'; \quad \Delta y_R = y_{\text{пр}} - y'; \quad \arctg \alpha_R = \Delta y_R / \Delta x_R;$$

$$R = \sqrt{(\Delta y_R)^2 + (\Delta x_R)^2}; \quad \gamma = \alpha_R - \alpha; \quad dT = R \sin \gamma; \quad dL = R \cos \gamma.$$

На дисплее индицируются величины  $dU$  и  $dL$  поперечного и продольного смещения отражателя в проектное положение. Отражатель соответственно перемещают и затем измерения повторяют. Если новые значения  $dU \leq 3$  мм и  $dL \leq 3$  мм, принимается решение о завершении выноса точки  $I$ .

Погрешность выноса точки полярным способом

$$m_{xy} = \sqrt{(D/\rho'')^2 m_{\alpha}^2 + m_D^2 + m_{\text{фикс}}^2},$$

где  $D$  – дальность;  $\rho'' = 206265$ ;  $m_{\alpha}$  – погрешность измерения дирекционного проектного угла;  $m_D$  – погрешность дальности по светодальномеру;  $m_{\text{фикс}}$  – погрешность фиксации искомой точки.

Для тахеометра 3-секундной точности TCR/303 при  $D \leq 100$  м;  $m_{\alpha} = 3''$ ;  $m_D = 3$  мм;  $m_{\text{фикс}} = 1$  мм для точки 1 расчетная погрешность выноса  $m_1 \leq 3,5$  мм.

Для тахеометра 1-секундной точности TCR 1201 (применяется для контроля геодезических данных на том же объекте) при  $D \leq 100$  м;  $m_{\alpha} = 1''$ ;  $m_D = 2$  мм;  $m_{\text{фикс}} = 1$  мм расчетная погрешность выноса  $m_1 \leq 2,7$  мм. Следовательно, оба тахеометра удовлетворяют расчетной точности разбивок осей и проектных центров для монтажа несущих колонн объектов «Минск-Арена».

Общие выводы:

1. Развитие пунктов внутренней разбивочной сети спортивных сооружений комплекса «Минск-Арена» с помощью электронных тахеометров выполняется с необходимой точностью при минимальных затратах труда и времени.

2. Электронные тахеометры обеспечивают разбивочные работы относительно опорных точек, выбранных в местах, где в данное время отсутствуют помехи от строительных процессов.

3. Применение временных опорных пунктов внутренней разбивочной основы взамен постоянных отменяет необходимость осуществления неэффективных мер по защите постоянных опорных пунктов от уничтожения.

4. Условно отрицательная характеристика электронных тахеометров для многих пользователей в современных условиях состоит в том, что расчеты координат опорных и разбиваемых точек, технология работ с электронным тахеометром доступны лишь подготовленным специалистам.

5. Результаты данной работы внедрены в практику путем включения в Проект производства геодезических работ (ППГР) на объекты комплекса «Минск-Арена», подготовленный кафедрой инженерной геодезии БНТУ в течение апреля-мая 2007 г.

### Оптимизация прямоугольной плиты кусочно- постоянной толщины с отверстием

Вербицкая О. Л., Шевчук Л. И.

Белорусский национальный технический институт

Решена задача оптимизации поперечно изогнутой железобетонной прямоугольной плиты с отверстием, подкрепленной ребрами жесткости. Статический расчет плиты выполнен методом конечных элементов (МКЭ) с помощью авторской программы *STURM*. Для построения численной модели использованы прямоугольные плитные конечные элементы с четырьмя узлами и двенадцатью степенями свободы. Для определения жесткости конечных элементов, ширины раскрытия трещин и предельного изгибающего момента использована методика СНБ 5.03.01-02. В связи с этим плиту следует рассматривать как нелинейно-деформируемую.

Для поиска оптимального решения используются результаты анализа целевой функции в окрестности точки поиска. Пусть конструктивные и геометрические особенности плиты описаны  $n$  параметрами оптимизации, образующими  $n$ -мерное пространство  $R_n$ . В качестве целевой функции взята стоимость материала плиты – бетона и арматуры

$$C(\bar{X}_0) = \min C(\bar{X}), \quad \bar{X} \in R_n, \quad \bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T. \quad (1)$$

Поставлены конструктивные ограничения и ограничения по прочности

$$x_k \geq x_{lim}, \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad M_{rd} - M_{sd} \geq 0, \quad (2)$$

где  $M_{rd}$  – предельный изгибающий момент для сечения плиты, определяемый по СНБ 5.03.01-02;  $M_{sd}$  – расчетный изгибающий момент в сечении плиты вычисляемый с учетом нелинейности деформирования железобетона.

Пусть для сформулированной оптимизационной задачи некоторая точка  $(\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_n)^T$  многомерного пространства  $R_n$  находится вблизи границы, заданной ограничением по условию прочности. В некоторой малой окрестности эту границу представим как гиперплоскость, описанную линейным уравнением.

Около этой точки построим эллипсоид с полуосями  $s_1, s_2, \dots, s_n$  и центром в точке  $\{\dot{x}_n\}$ .

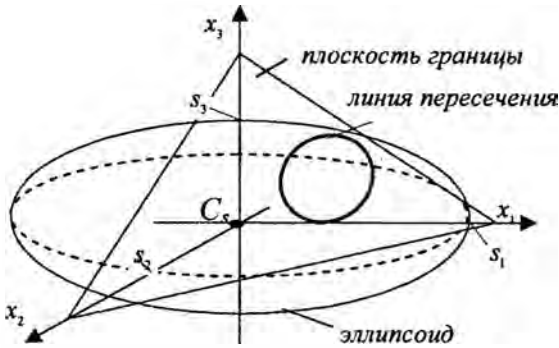


Рисунок 1 – Линия пересечения гиперплоскости и эллипсоида

Линия пересечения гиперплоскости и эллипсоида определяется решением системы уравнений (3)

$$k_1 x_1 + k_2 x_2 + \dots + k_n x_n = k_0; \quad \left( \frac{x_1 - \dot{x}_1}{s_1} \right)^2 + \left( \frac{x_2 - \dot{x}_2}{s_2} \right)^2 + \left( \frac{x_n - \dot{x}_n}{s_n} \right)^2 = 1. \quad (3)$$

Используя уравнения (3), выразим параметры  $x_n$  и  $x_{n-1}$  через другие параметры оптимизации  $x_1, x_2, \dots, x_{n-2}$  и получим систему двух уравнений с двумя неизвестными (4)

$$k_{n-1} x_{n-1} + k_n x_n = K; \quad \left( \frac{x_{n-1} - \dot{x}_{n-1}}{s_{n-1}} \right)^2 + \left( \frac{x_n - \dot{x}_n}{s_n} \right)^2 = D, \quad (4)$$

где  $K = k_0 - (k_1 x_1 + k_2 x_2 + \dots + k_{n-2} x_{n-2})$ ;

$$D = 1 - \left[ \left( \frac{x_1 - \dot{x}_1}{s_1} \right)^2 + \left( \frac{x_2 - \dot{x}_2}{s_2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{x_{n-2} - \dot{x}_{n-2}}{s_{n-2}} \right)^2 \right].$$

Решив систему уравнений (4) относительно неизвестных  $x_{n-1}$  и  $x_n$ , получим функции (5), выражающие эти оба неизвестные через другие параметры оптимизации.

$$x_n = \frac{-b. \pm \sqrt{b.^2 - 4ac.}}{2a}; \quad x_n = \frac{-b.. \pm \sqrt{b..^2 - 4ac..}}{2a}, \quad (5)$$

где  $a = s_n^2 k_n^2 + s_{n-1}^2 k_{n-1}^2$ ;

$$b. = -2(s_n^2 k_n K - s_n^2 \dot{x}_{n-1} k_{n-1} k_n + s_{n-1}^2 k_{n-1}^2 \dot{x}_n);$$

$$b.. = -2(s_{n-1}^2 k_{n-1} K - s_{n-1}^2 \dot{x}_n k_{n-1} k_n + s_n^2 k_n^2 \dot{x}_{n-1});$$

$$c. = s_n^2 K^2 - 2s_n^2 \dot{x}_{n-1} k_{n-1} K + s_n^2 \dot{x}_{n-1}^2 k_{n-1}^2 + s_{n-1}^2 \dot{x}_n^2 k_n^2 - k_{n-1}^2 s_n^2 s_{n-1}^2 D;$$

$$c.. = s_{n-1}^2 K^2 - 2s_{n-1}^2 \dot{x}_n k_n K + s_{n-1}^2 \dot{x}_n^2 k_n^2 + s_n^2 \dot{x}_{n-1}^2 k_n^2 - k_n^2 s_n^2 s_{n-1}^2 D.$$

Выполняя полученные условия (5), мы можем задавать произвольную комбинацию параметров  $x_1, x_2, \dots, x_{n-2}$  и всегда при этом оставаться на границе определенной условием прочности. Это обеспечивает при поиске оптимального решения движение только по границе. Для повышения эффективности поиска оптимального решения следует использовать метод градиентного спуска [1] в пространстве  $R_{n-2}$ .

После выполнения изложенных выше действий в первом приближении следует повторить их во втором приближении, приняв в качестве центра эллипсоида найденную точку пространства  $R_n$ . Расчет должен продолжаться до тех пор, пока результаты следующих друг за другом приближений не станут меньше некоторой наперед заданной величины.

Используя предложенный нами метод, рассмотрен пример оптимизации прямоугольной железобетонной плиты ( $5,6 \times 5,6$  м) с отверстием, подкрепленной ребрами жесткости ( $b_r = 0,5$  м) и шарнирно опертой по краю. Нагрузка представлена в виде четырех сил, приложенных в местах пересечения ребер. Были приняты следующие данные: класс бетона – С<sub>25</sub>; класс арматуры – S400; нагрузка – четыре силы по 150 кН; количество приближений при решении нелинейной задачи – 30; множитель релаксации – 0,3; цена бетона – 120 тыс.руб/м<sup>3</sup>; цена арматуры – 1200 тыс.руб/т. В качестве параметров оптимизации приняты три величины:  $x_1$  – высота ребра;  $x_2$  – толщина полки;  $x_3$  – площадь сечения арматуры в ребрах. Поэтому поиск оптимального решения происходит в трехмерном пространстве  $R_3$ .

Для определения оптимального решения при заданной погрешности 6% достаточно было выполнить три приближения. В результате расчета и в соответствии с принятыми исходными данными получена рациональная конструкция монолитной ребристой плиты с отверстием при следующих параметрах –  $x_1 = 90$  мм;  $x_2 = 60$  мм;  $x_3 = 6,5$  см<sup>2</sup>. На рисунке 2 показан характер распределения изгибающих моментов в этой плите.

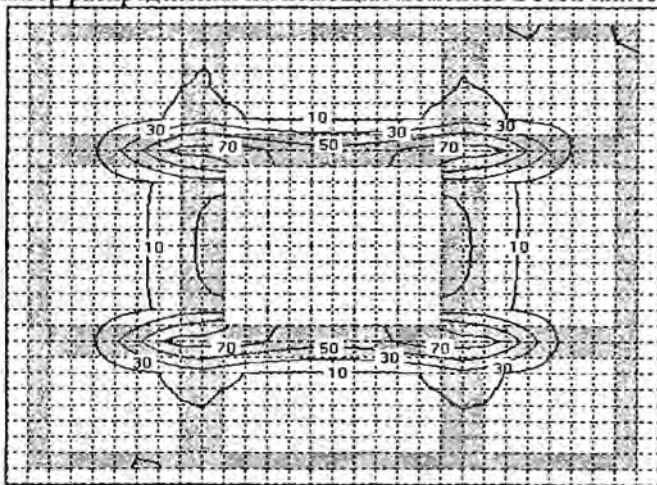


Рисунок 2 – Карта изолиний изгибающих моментов  $M_x$

### Выводы

1. В соответствии с принятыми исходными данными найдена оптимальная конструкция железобетонной плиты с отверстием, подкрепленной ребрами жесткости.
2. По характеру расположения изолиний изгибающих моментов  $M_x$  очевидно, что моменты сосредоточены в ребрах плиты. Полка плиты служит в большей степени для связи ребер и для передачи местных нагрузок на ребра.

### Литература

1. Оптимизация прямоугольных железобетонных плит кусочно-постоянного сечения методом градиентного спуска по границе // Материалы Третьей международной научно-технической конференции: в 2 т. – Минск, 2006. – Том 1. – С. 400–402.

УДК 528.48

## Применение фильтра Колмогорова-Винера для оценки точности архивных материалов

Рак И. Е.

Белорусский национальный технический университет

Сегодня многие организации в Республике Беларусь занимаются созданием и внедрением своих банков пространственно-распределенных данных на интересующие их участки территорий. Поэтому в настоящее время очень актуальна проблема создания цифровых карт.

Один из путей решения данной проблемы – создание цифровой карты на основе архивных данных, т.е. векторизация уже имеющегося топографического материала. Необходимый этап при решении этой задачи – исследование соответствия содержания исходного картографического материала к современному состоянию. Исследование соответствия контуров удобно проводить, используя математический аппарат среднеквадратического прогноза Колмагорова-Винера.

Сущность этого метода заключается в следующем.

Имеем два множества случайных величин: множество  $l$  точек контура, полученных при обновлении территории:

$$l = [l_1 l_2 \dots l_q]^T \quad (1)$$

и множество тех же точек, обозначенные  $s$ , которые считаны с растрового изображения:

$$s = [s_1 s_2 \dots s_m]^T. \quad (2)$$

Тогда линейная оценка вектора  $s$  имеет вид:

$$\hat{s} = H l, \quad (3)$$

где  $H$  – некоторая матрица линейного преобразования вектора  $s$  в вектор  $l$ . А вектор ошибок будет иметь вид:

$$\varepsilon = \hat{s} - s. \quad (4)$$

Ковариационная матрица вектора  $\varepsilon$

$$C_{\varepsilon\varepsilon} = (\hat{s} - s) (\hat{s} - s)^T, \quad (5)$$

есть ковариационной матрицей ошибок, а ее диагональные элементы – дисперсия ошибок  $\sigma^2$ .

Матрица  $C_{\varepsilon\varepsilon}$  есть сумма двух матриц  $A$  и  $B$ .

$$C_{\varepsilon\varepsilon} = A + B; \quad (6)$$

$$A = C_{ss} - C_{sl}C_{ll}^{-1}C_{ls}, \quad (7)$$

где  $A$  – мера несоответствия анализируемых массивов друг другу. По главной диагонали этой матрицы расположены суммы квадратов рассогласований соответственно по оси  $X$  и по оси  $Y$ .

Составляющая  $B$  описана следующим соотношением:

$$B = (H - C_{sl}C_{ll}^{-1})C_{ll}(H - C_{sl}C_{ll}^{-1})^T. \quad (8)$$

Для того чтобы матрица  $C_{\varepsilon\varepsilon} = A + B = \min$ , необходимо чтобы  $B = 0$ . Тогда

$$H = C_{sl}C_{ll}^{-1}. \quad (9)$$

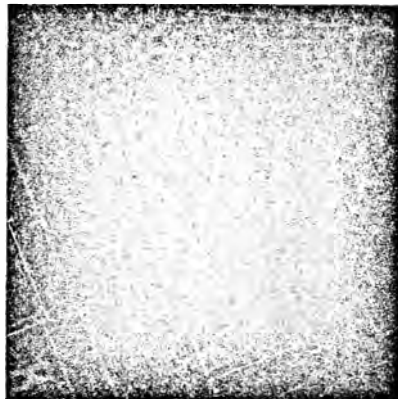
Подставив формулу (9) в формулу (3), будем иметь:

$$\hat{s} = C_{sl}C_{ll}^{-1}l. \quad (10)$$

Это выражение есть формула среднего квадратического прогноза, поскольку она – точный аналог формулы прогноза Колмагорова-Винера.

Сравнив  $s$  и  $\hat{s}$ , можно вычислить смещение пунктов  $\Delta s$ .

Пример использования фильтра Колмагорова-Винера для оценки соответствия контуров применительно к зданию 2КЖ



Совместив начало счёта для обоих векторов с геометрическими центрами тяжести будем иметь два массива:



$$l := \begin{pmatrix} -13.47 & -2.96 & 5.94 & 1.74 & 9.29 & 5.88 & -1.42 & -5.01 \\ 9.10 & -17.06 & -13.44 & -3.51 & -0.69 & 7.73 & 4.92 & 12.94 \end{pmatrix};$$

$$\delta_k := \begin{pmatrix} -14.36 & -3.24 & 4.91 & 1.43 & 10.97 & 7.42 & -1.80 & -5.34 \\ 9.07 & -16.96 & -13.69 & -4.00 & -0.22 & 8.26 & 4.92 & 12.60 \end{pmatrix}.$$

Тогда матрицы  $A$  будут иметь вид:

$$A = \begin{vmatrix} 3.08 & 1.24 \\ 1.24 & 0.75 \end{vmatrix}.$$

Сравнив  $s$  и  $\delta$ , вычислим смещение пунктов  $\Delta_s$ ,

$$\Delta_s = \begin{vmatrix} -0.19 & -0.83 & 1.07 & 0.34 & -0.68 & -0.54 & 0.45 & 0.36 \\ -0.20 & -0.31 & 0.27 & 0.50 & -0.26 & -0.33 & -0.01 & 0.33 \end{vmatrix}.$$

Нахождение  $\Delta_s$  позволит получить оценку  $f$ , которая регламентирована в методических указаниях [2]. Там указано, что допустимое значение для земель поселений составляет  $f_{\text{доп}} = 0,3\text{м}$ .

Итак,  $f = 0.28; 0.89; 1.10; 0.60; 0.73; 0.63; 0.45; 0.48$ .

Полученные результаты показывают, что координаты точек содержат грубые ошибки. В этом случае можно отбраковать точки, дающую максимальную ошибку, и повторить анализ. Удалив из анализа координаты точек 2, 3, 5 будем иметь:

$$\Delta_s = \begin{vmatrix} -0.32 & 0.34 & -0.40 & 0.46 & 0.38 \\ -0.20 & 0.48 & -0.25 & 0.04 & 0.40 \end{vmatrix};$$

$$f_1 = 0.24; 0.58; 0.47; 0.46; 0.55.$$

Полученные значения  $f_1$  не существенно отличаются от  $f$  и отличается от допусков, оговоренных в Методических указания [2]. Это говорит о том, что несоответствие контура здания на растре и на плане, полученном в результате обновления, обусловлено ошибками составления архивного плана.

Следовательно, участок этого плана нельзя принимать в обработку.

### Литература

1. Мориц, Г. Современная физическая геодезия / Г. Мориц. – М.: Недра, 1983 г.
2. Методические рекомендации по проведению межеванию объектов землеустройства. – М.: Федеральная служба земельного кадастра России, 2003.

УДК 528.48

**К вопросу оценки методом статистических испытаний  
результатов измерений при нетрадиционных  
способах уравнивания**

Гармаза О. Е.

Белорусский национальный технический университет

В работе [1] проанализирован вопрос применения расширенной псевдообратной матрицы

$$F = (A^T C A)^{-1} A^T C, \quad (1)$$

для реализации оценки точности положения пунктов методом статических испытаний при нетрадиционных способах уравнивания. Здесь  $A$ - матрица коэффициентов параметрических уравнений поправок;  $C$ - матрица весов измерений. Матрицу  $F$  можно получить аналитически и получением коэффициентов по формуле Ю.П. Андреева [2].

Используя вычисленную матрицу  $F$ , можно не только выполнить оценку точности функций уравненных и измеренных величин, но и вычислить вероятность попадания определяемого пункта в круг ошибок методом статистических испытаний.

Анализ вычисления названной вероятности показал целесообразность выполнять при большом количестве опытов (10 000 опытов) следующим образом:

Пусть из уравнивания известны погрешности положения определяемых пунктов  $M_j$ . По величинам средних квадратических погрешностей результатов геодезических измерений, полученным после уравнивания, генерируем вектор свободных членов параметрических уравнений поправок  $L$ . Вычисляем вектор приращений координат:

$$\delta X = -FL, \quad (2)$$

Для каждого определяемого пункта вычисляем статистическое уклонение

$$R_j = \sqrt{\delta_{x_i}^2 + \delta_{x_{i+1}}^2}, \quad (3)$$

где  $\delta x_i, \delta x_{i+1}$ - компоненты вектора  $\delta X$ .

Если  $R_j \leq M_j$ , то пункт  $j$  попал в круг ошибок. Вероятность попадания определяемого пункта в круг ошибок рассчитаем по формуле [3]:

$$P = \frac{K}{10000}, \quad (4)$$

где  $K$ - число попаданий определяемого пункта в круг ошибок при 10000 испытаний. Расчеты на *IBM PC/AT-486* показали, что, благодаря применению матрицы  $F$ , для геодезических сетей, состоящих из 5 пунктов, представленные выше результаты вычисления на Pentiums занимают 1с машинного времени.

Практическая значимость данного предложения заключается в возможности вычисления вероятности  $P$  при нетрадиционных методах уравнивания. Ранее  $P$  рассчитывалось при уравнивании по методу наименьших квадратов (МНК), для которого  $P=0,632$  независимо от величин  $M_j$  [4].

Для иллюстрации эффективности рассмотрим пример применения предложенного метода многокритериальной оптимизации, когда уравненные координаты пунктов и уравненные измерения получают путем минимизации двух целевых функций.

$$\Phi_1(X) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{C_i}{\sigma_i} \right)^n |L_i(X)|^n. \quad (5)$$

$$\Phi_2(X) = \min(\max M_j). \quad (6)$$

Соответствующие расчеты представлены в таблице.

Результаты вычислений

№ примера	1	2	3	4	5	6
Обработка по методу наименьших квадратов						
$\mu$	0,608	1,139	0,833	1,053	1,098	1,121
$M_1$	0,0523	0,0475	0,0424	0,0595	0,0373	0,0077
$M_2$	0,0536	0,0292	0,0439	0,0766	0,0406	0,0141
$M_3$	0,0245	0,0387	0,0206	0,0392	-	0,0125
$M_4$	-	-	-	0,0589	-	-
$P_1$	0,634	0,635	0,638	0,659	0,640	0,644
$P_2$	0,635	0,632	0,649	0,673	0,622	0,645
$P_3$	0,667	0,631	0,637	0,630	-	0,641
$P_4$	-	-	-	0,658	-	-

Обработка по методу многокритериальной оптимизации						
$\mu$	0,471	1,084	0,803	0,515	0,989	0,331
$M_1$	0,0467	0,0436	0,0409	0,0437	0,0381	0,0061
$M_2$	0,0435	0,0325	0,0430	0,0549	0,0377	0,0110
$M_3$	0,0196	0,0436	0,0208	0,0239	-	0,0111
$M_4$	-	-	-	0,0459	-	-
$P_1$	0,643	0,639	0,640	0,679	0,642	0,636
$P_2$	0,640	0,632	0,648	0,659	0,624	0,651
$P_3$	0,668	0,626	0,634	0,619	-	0,641
$P_4$	-	-	-	0,679	-	-

1,2,3 – обработка триангуляции;

4,5 - обработка трилатерации;

6 – обработка линейно-угловой сети.

По результатам таблицы можно сделать следующие выводы:

1. При уравнивании по МНК величина  $P$  близка к 0,32, что является надежным контролем при отладке программы;

2. Благодаря многокритериальной оптимизации, величины  $M_j$  уменьшились в 1,5-2 раза по сравнению с МНК, что и предусматривалось критерием (6);

3. Несмотря на уменьшение погрешностей  $M_j$ , количество попаданий пунктов в круг ошибок увеличилось. В результате величина  $P$ , вычисленная для многокритериальной оптимизации, практически во всех случаях больше величины  $P$ , вычисленной для МНК.

## Литература

1. Гармаза, О. Е. Об оценке точности положения пунктов плановых геодезических сетей методом статических испытаний при уравнивании по алгоритму Lp-оценок / О. Е. Гармаза // Вестник БНТУ. – 2004. – № 3. – С.7–8.

2. Андреев, Ю. П. Вычисление оценок точности методом моделирования ошибок / Ю. П. Андреев // Геодезия и картография. – 1971. – № 11. – С.20–24.

3. Сорокин, А. И. О вероятности средней квадратической погрешности положения точки / А. И. Сорокин, И. А. Сорокин // Геодезия и картография. – 1981. – № 12. – С.31–34.

4. Ганьшин, В. Н. Оценка точности определения местоположения пункта одним числом / В. Н. Ганьшин, В. М. Лазарев // Геодезия и картография. – 1985. – №8. – С.43–45.

# Технология бетона и строительные материалы

УДК 666.97.01

**Совершенствование технологии  
изготовления крупных стеновых блоков  
за счет замены жёсткой консистенции  
мелкозернистобетонной смеси на подвижную**

Лихачевский А. Я., Богдан В. А., Римашевский А. Ю.,  
Николаев В. А.

Белорусский национальный технический университет

На XIV международном научно-практическом семинаре нами была предложена оригинальная технология получения эффективных мелких и крупных стеновых блоков из мелкозернистого бетона [1]. При этом оказалось, что наиболее перспективным представляется изготовление крупных стеновых блоков. Даже при значительной толщине оболочки равной 80 мм, позволяющей получить прочность до 15 МПа при активности цемента 40 МПа, термическое сопротивление при плотности теплоизоляционного материала до 20 кг/м<sup>3</sup> составит 4 м<sup>2</sup>·°К/Вт, при плотности теплоизоляционного материала до 100 кг/м<sup>3</sup> – 2,7 м<sup>2</sup>·°К/Вт и при плотности теплоизоляционного материала 200 кг/м<sup>3</sup> – 2,1 м<sup>2</sup>·°К/Вт.

В связи с тем, что толщина оболочки может достигать значительной толщины (до 80 мм), представляется возможным формировать её не из мелкозернистобетонной смеси жесткой консистенции, а из бетонной смеси с крупным заполнителем (фракции 10-20 мм) с осадкой конуса 1 – 4 см.

Для осуществления такой технологии предлагается использовать специальный вкладыш – пустотообразователь, изготовленный из стальных листов толщиной до 3 мм, представленный на рис. 1. металлические стержни по углам вкладыша обеспечивают жёсткость вкладыша и фиксируют его положение внутри формы блока.

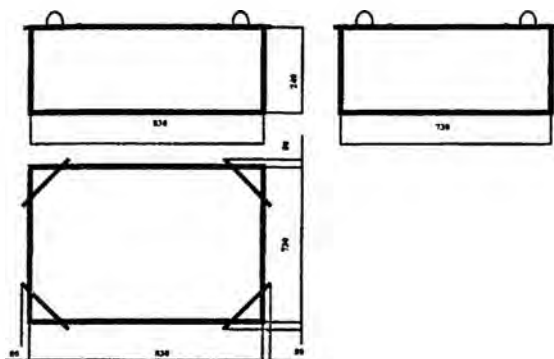


Рисунок 1. Вкладыш-пустотообразователь

Для предотвращения погружения вкладыша в бетонную смесь при вибрировании перед формовкой нижнего слоя на дно формы следует установить бетонные фиксаторы, на которые будет опираться вкладыш. Фиксаторы изготавливают заранее (предлагаемая форма фиксатора приведена на рис.2).

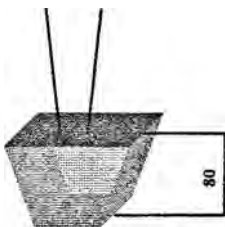


Рисунок 2. Бетонный фиксатор

Внутренняя полость вкладыша заполняется теплоизоляционным материалом, а пространство между стенками формы и вкладыша заполняется бетонной смесью, которая достигает верхних кромок вкладыша. Теплоизоляционный материал виброуплотняется и в процессе уплотнения

добавляется до полного заполнения внутренней полости вкладыша, после чего вкладыш извлекается из формы и формовка блока завершается формованием последней грани блока, находящейся сверху в процессе изготовления блока. Такая технология изготовления блоков позволяет в одной форме размещать 1, 4 или 6 блоков.

Пример формы на четыре изделия приведен на рис. 3.

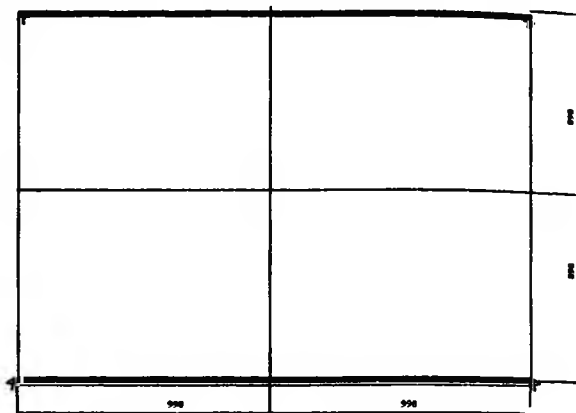


Рисунок 3. Форма на четыре блока

Для обеспечения возможности извлечения блоков после термообработки без разрушения граней следует предусмотреть минимальное армирование с установкой на одной из граней монтажных устройств (петель), для обеспечения возможности проведения работ по распалубке готовых изделий, транспортировки и монтажа блоков при помощи грузоподъемных механизмов (рис. 4).

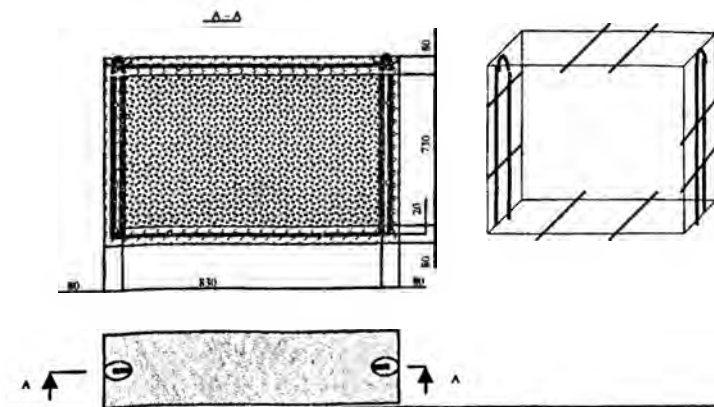


Рисунок 4. Схема пространственного каркаса

## Литература

1. Богдан, В.А. Оригинальная технология получения эффективных мелких и крупных стеновых блоков из мелкозернистого бетона / В. А. Богдан, А. Я. Лихачевский, А. Ю. Римашевский // Сборник статей XIV международного практического семинара: в 2 т. – Минск, 2006. – Т. 1. – С 37–41.

УДК 691.311

### **Физико-технические свойства материала из термопласткомпозитов для подземных рельсовых путей**

Галузо О. Г., Галузо Г. С., Данилевич А. Ю., Костюкевич А. П.  
Белорусский национальный технический университет

Термопласткомпозиты представляют собой композиционный материал, получаемый при отверждении спрессованной смеси, состоящей из термопластичного полимера – полиэтилена или его отходов, природного кварцевого песка и добавок. Это химически стойкий и долговечный материал, устойчив к воздействию воды, щелочей и кислот. Применяют его для изготовления плиток пола и кровельной черепицы.

Целью выполненной работы являлось исследование структурных, гидрофизических, механических и деформативных свойств термопласткомпозитов, предназначенных для изготовления полушпал метрополитена.

Образцы для определения физико-технических свойств изготовлены в заводских условиях путем формования смеси компонентов в металлических пресс-формах при давлении 5-6 МПа и температуре смеси 130-150 °С.

Среднюю плотность, предел прочности при сжатии и водопоглощение определяли на образцах кубах с ребром 70,7 мм. Морозостойкость термопласткомпозита определяли ускоренным методом при многократном замораживании и оттаивании на образцах- кубах с ребром 70,7 мм. Предел прочности при изгибе, модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент Пуассона определяли на образцах-призмах размерами 70x70x280 мм.

Установлено, что плотность испытанных термопласткомпозитов составляет 1580-1650 кг/м<sup>3</sup> и зависит от величины прес-сующего давления при формовании. Этот показатель в среднем



в два раза выше, чем для пропитанной древесины – сосны, применяемой для изготовления полушпал метрополитена.

Водопоглощение по массе термопласткомпозита составляет небольшую величину и находится в пределах от 0,5-0,7 % и как следствие обеспечивает высокую его морозостойкость. После 500 циклов попеременного замораживания и оттаивания по ускоренной методике снижение прочности составляло 4,8 % по сравнению с контрольными образцами.

Предел прочности при сжатии составляет 19,9 МПа, что соответствует классу бетона на сжатие В15. Предел прочности при изгибе достаточно высокий и составляет 15,9 МПа. Для сравнения следует отметить, что предел прочности при сжатии древесины поперек волокон в 4-5 раз меньше, чем этот показатель для термопласткомпозита.

Деформативные свойства испытанного термопласткомпозита определяли при статическом кратковременном нагружении сжимающей нагрузкой. Продольные и поперечные деформации измеряли с помощью тензометрических датчиков на базе измерения 50 мм. Модуль упругости определяли при напряжениях, равных 0,3 от призмной прочности. Численное значение этой характеристики составляет в среднем 1640 МПа, что значительно выше, чем для древесины (сосны) в поперечном направлении.

Модуль сдвига определяли неразрушающим методом. Значение этого показателя составляет 0,42 от величины модуля упругости.

Коэффициент Пуассона для термопласткомпозита соответствует значению 0,39, что в 2,3 раза выше, чем для тяжелого бетона и в 2,5 раза меньше, чем для древесины поперек волокон.

Полученные физико-технические термопласткомпозита позволили произвести расчет полушпал из термопласткомпозитного материала. Опытная партия этих изделий после испытания на трещиностойкость будет уложена на одном из участков метрополитена для проверки их в эксплуатационных условиях.

## Влияние статической нагрузки на прочность бетона

Бондарович А. И., Батяновский Э. И.  
Белорусский национальный технический университет

Поведение бетона под сжимающей статической нагрузкой, проявляющиеся при этом упругие и пластические деформации, развивающиеся в процессе загрузки и при длительном воздействии нагрузки, достаточно детально изучены для конструктивных бетонов различной прочности, составов и видов (О.Я. Берг, работы его научной школы). Влияние же возникающих под действием нагрузки необратимых деформаций, проявляющихся в образовании дефектов в объеме цементного камня в бетоне, на его эксплуатационные свойства по существу не изучено. Отсутствуют данные об уровнях нагрузки, превышение которых вызывает появление необратимых нарушений структуры в виде микротрещин, развивающихся со временем в существенные дефекты, провоцирующие снижение сопротивляемости бетона агрессивному воздействию эксплуатационной среды. По существу нет системных данных о влиянии многократно приложенной нагрузки различного уровня на возможные изменения, например, морозостойкости, водонепроницаемости, изменений в количестве поглощаемой бетоном воды. В результате не представляется возможным на основании имеющейся в технической литературе информации обосновать роль и степень влияния механических нагрузок на эксплуатационные свойства бетона.

Циклически или многократно повторяющаяся статическая механическая нагрузка приводит со временем к снижению прочности бетона. Этот отрицательный эффект прямо зависит от уровня нагрузки и числа циклов ее воздействия. Так, примерно равное снижение прочности образцов бетона естественного твердения (как цементно-песчаного, так и содержащего крупный заполнитель) наблюдается при нагрузке ~ 50 % от проектной прочности бетона (соответственно: 23 МПа и 27 МПа) к 70 циклам; при нагрузке ~ 70 % от  $f_{c28}$  (соответственно: 32 МПа и 37 МПа) к 40...50 циклам; при нагрузке ~ 90 % от  $f_{c28}$  (соответственно: 41 МПа и 48 МПа) к 4...5 циклам "сжатия-отпуска" (сброс нагрузки). Очевидно «лавинοобразное» нарастание дест-

рукции бетона при переходе нагрузки за предел в 70 % от проектной прочности бетона. Одновременно с тем, налицо способность бетона к длительному сопротивлению сжимающей статической периодически прикладываемой нагрузки в пределах 30...40 % от ее проектных значений (соответственно равной 14...18 МПа и 16...21 МПа). Снижение прочности бетона к 70 циклам испытаний составило менее 10 %, а (по данным, не вошедшим в табл. 1) снижение на  $\geq 20$  % соответствовало более чем 120 циклам «сжатия-отпуска».

Полученные экспериментальные данные согласуются с теоретическими представлениями о поведении тяжелого бетона под механической нагрузкой, сформировавшимся в 60-70-ых годах прошлого века, и наиболее детально рассмотренных в исследованиях О.Я. Берга.

Согласно этой теории при нагружении бетона механической нагрузкой его состояние и способность сохранять «целостность» структуры и несущую способность связано с двумя параметрическими точками:  $f_T^o$ , или нижней границей трещинообразования, и  $f_T^V$ , или верхней границей трещинообразования. Напряжения, не превышающие уровень нижней границы трещинообразования  $f_T^o$ , не опасны для бетона при многократном приложении нагрузки или ее постоянном действии. В случае, если многократно повторяющаяся нагрузка находится в пределах  $f_T^o < f_c < f_T^V$ , то имеет место накопление «усталости» бетона и образец со временем разрушается. Естественно, что при уровне нагрузки и, соответственно, напряжений в бетоне для случая, если  $f_c > f_T^V$ , разрушение происходит ускоренно. Причины постоянного (или ускоренного) разрушения бетона видят в образовании микротрещин, за пределами напряжений, превышающих  $f_T^o$ , которые под действием повторяющейся нагрузки «развиваются» в макродефекты структуры, приводящие к необратимым деструктивным явлениям и потере прочности бетона.

Уровень статической нагрузки, %от $f_{c28}$	Прочность бетона, МПа, после числа циклов «сжатие-отпуск», циклы:											
	0*	1	2	3	4	5	10	20	30	40	50	
<i>Естественные условия твердения (под пленкой)</i>												
30	45**	-	-	-	-	45	46	45	44	44	43	
	53***	-	-	-	-	53	53	54	52	52	53	
50	45	-	-	-	-	45	45	43	43	43	40	
	53	-	-	-	-	53	53	52	51	50	49	
50****	43	-	-	-	-	43	42	40	38	37	35	
	52	-	-	-	-	52	52	50	48	47	45	
70	45	-	-	-	-	45	45	42	39	36	-	
	53	-	-	-	-	53	53	51	49	45	40	
70****	43	-	-	-	-	43	41	37	33	-	-	
	52	-	-	-	-	52	51	48	44	39	-	
90	45	44	42	40	38	35	-	-	-	-	-	
	53	52	50	48	45	42	-	-	-	-	-	

в возрасте 28 сут.; \*\* мелкозернистый бетон; \*\*\* бетон со щебнем; \*\*\*\* в водонасыщенном состоянии.

Таблица 1 Влияние статистической нагрузки на прочность бетона при циклическом нагружении

Согласно имеющимся в технической литературе данным о действии долговременной нагрузки на бетон, заметные изменения в его структуре и несущей способности отсутствуют примерно до ее уровня: до 65 % от значения призмочной прочности бетона. Учитывая, что по данным О.Я. Берга  $f_{c.np.} \sim 0,783 f_{c.cube}$  (кубиковая прочность бетона), то уровень безопасных для бетона напряжений будет примерно соответствовать:  $0,65 \times 0,783 f_{c.cube} \sim 50\% f_{c.cube}$ . В то же время нижняя граница трещинообразования по данным О.Я. Берга соответствует:  $f_T^o \sim 0,46 f_{c.np.}$ , или в пересчете на кубиковую прочность бетона:  $0,45 \times 0,783 f_{c.cube} \approx 36\% f_{c.cube}$ , то есть, 30...40 % от уровня «кубиковой» прочности бетона. Верхняя граница трещинообразования  $f_T^V$  характеризует уровень напряжений, при которых имеет место необратимое развитие и «раскрытие» трещин в объеме бетона. По разным данным их значения соответствуют 60...70 % от уровня прочности бетона на сжатие.

Таким образом, полученные нами экспериментальные данные соответствуют важнейшим теоретическим представлениям, связывающим процессы трещинообразования в бетоне под действием статической механической нагрузки с изменением его прочности. То есть, они с полным основанием могут служить базой и для оценки соответствующих изменений эксплуатационных свойств бетона.

Из полученных данных следует важный вывод: циклически действующая статическая механическая нагрузка, превышающая уровень 40...50 % от проектной прочности бетона и вызывающая соответствующие знакопеременные деформации материала, воздействует на его структуру практически так же, как и попеременное замораживание-оттаивание или циклическое насыщение-высушивание. Во всех этих случаях со временем образуются микротрещины, которые постепенно развиваются в макронарушения структуры бетона, приводящие к снижению его прочности.

## Графитные наноматериалы и процесс диспергации песка

Рябчиков П. В., Батяновский Э. И.

Белорусский национальный технический университет

Углеродные наноматериалы (УНМ) обладают целым рядом уникальных физических свойств и сегодня все активнее используются в мировой практике как добавки для создания новых композиционных материалов.

УНМ – углеродный наноматериал, представляющий собой каркасные структуры в виде трубочек диаметром 20-100 нм ( $10^{-9}$  м), состоящие из атомов углерода. История открытия углеродных нанотрубок в 1991г. тесно связана с историей открытия фуллеренов. Фуллерены — молекулярные соединения, принадлежащие классу аллотропных форм углерода другие — алмаз, карбин и графит) и представляющие собой выпуклые замкнутые многогранники, составленные из четного числа трехкоординированных атомов углерода. Фуллерены в значительном количестве содержатся в саже, образующейся в дуговом разряде на графитовых электродах. Было обнаружено, что в результате термического распыления графитного анода в электрической дуге, наряду с молекулами фуллеренов, образуются также протяженные структуры, представляющие собой свернутые в однослойную или многослойную трубку графитовые слои. Как показали наблюдения большинство трубок состоит из нескольких графитовых слоев, вложенных один в другой, либо навитых на общую ось. Однослойные нанотрубки - не образуют швов при сворачивании и заканчиваются полусферическими вершинами, содержащими, наряду с правильными шестиугольниками, также по шесть правильных пятиугольников. Многослойные трубки отличаются более широким разнообразием форм. Различают следующие виды нанотрубок: а) русская матрешка- совокупность вложенных друг в друга однослойных цилиндрических трубок; б) шестигранная призма; в) свиток.

Они представлены на рис.1.



Рис. 1. Модели поперечных структур многослойных нанотрубок : а - "русская матрешка"; б - шестигранная призма; в - свиток

Для всех приведенных структур характерно значение расстояния м/д соседними графитными слоями всегда составляет 0,34 нм, что соответствует расстоянию м/д слоями в кристаллическом графите. Углеродные нанотрубки сочетают в себе свойства молекул и твердого тела и могут рассматриваться как промежуточное состояние вещества. Диапазон применения УНМ чрезвычайно широк. Это медицина, химическая промышленность и в наибольшей степени электроника. В последнее время УНМ стали применять и в строительной отрасли. В качестве добавок к пластмассам, резинам, стеклу, полиэтилену, краскам и т.д. Также есть перспектива применения УНМ и в различных видах бетонов. По результатам российских исследователей прочность пено- и газобетона увеличивалась в несколько раз. Однако не приводилось конкретных данных о применяемых материалах, составах бетона, условиях твердения, способов ввода добавок УНМ в бетон и т.п. поэтому проверить эти данные не представляется возможным. В настоящее время в лаборатории НИИЛ МБ СП совместно со специалистами ИТМО НАН РФ ведутся эксперименты о возможности и эффективности применения в бетоны добавок УНМ, с целью повышения их эксплуатационных свойств (прочность, морозостойкость, водонепроницаемость и т.д.).

Также рассматривается возможность применения углеродных нанодобавок для интенсификации помола различных материалов. В частности клинкера или песка (для производства поризованных легких бетонов) что позволит сократить время помола и снизить энергозатраты при производстве.

В лаборатории НИИЛ МБ СП были проведены эксперименты о возможном влиянии различных типов УНМ на интенсифи-

кацию помола, в частности песка. Для эксперимента были использованы 3 типа УНМ: №1 - не очищенный порошок с большого реактора, производительностью 100 гр/ч.; №2 - порошок с очисткой. После выделения УНМ содержит многостенные трубки, сажу, графит и небольшое количество металлов. Для удаления металла УНМ помещают в HCL, затем многократно промывают водой и высушивают. Для уменьшения количества аморфного углерода производят отжиг при 500 °С в течении 0,5ч.; №3 - не очищенный порошок с реактора, производительностью 10 гр/ч. Все они имели разный состав (разное количество трубок, графита и аморфного углерода). Дозировка УНМ составляла для всех 3 добавок – 0,5% от массы песка. В эксперименте использовался песок Заславльского карьера с модулем крупности -2,8. Помол осуществлялся в шаровой мельнице. Отбор проб и измерение удельной поверхности проводилось каждые 0,5 ч.

Измерение удельной поверхности проводилось на приборе для измерения удельной поверхности цемента и аналогичных порошкообразных материалов, тип Т-3 (время прососа воздуха через слой материала).

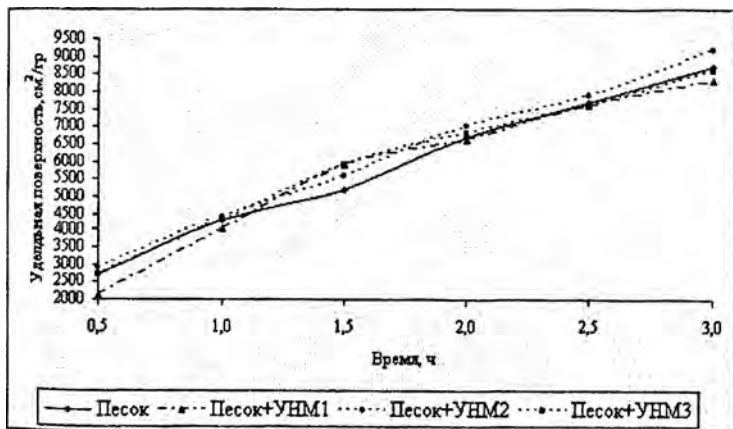


Рис.2.Изменение удельной поверхности песка при совместном помоле с нанодобавками



Из анализа приведенных на рис. 2 данных видно, что применение добавок УНМ 1 и УНМ 3 в целом не оказывает существенного влияния на интенсификацию помола. На протяжении всего времени помола они показывали результаты либо меньшие либо сопоставимые с контрольными, за исключением точки 1,5ч, где отмечается рост удельной поверхности на 13,5% у обоих образцов с углеродными нанодобавками по сравнению с обычным песком. Однако после 1,5 ч отмечается спад удельной поверхности до контрольных значений и ниже.

В тоже время при применении добавки УНМ 2 наблюдается стабильный, хотя и не очень существенный, рост удельной поверхности, по сравнению с контрольными значениями, на протяжении всего времени помола. Максимальные прирост отмечается в 0,5ч (7,4%) и 1,5ч (7,7%).

Эти данные могут свидетельствовать о принципиальной возможности применения УНМ в качестве добавок интенсификации помола различных материалов.

Например, ускорение темпов помола в начальный период времени (0,5ч), что мы видим на примере добавки УНМ 2, можно будет использовать при помолу кремнеземного компонента в ячеистом бетоне.

Увеличение удельной поверхности в более длительный промежуток времени (1,5ч), при положительных дальнейших экспериментах, возможно, будет способствовать интенсификации помола цементного клинкера.

В заключение необходимо отметить, что исследования в данной области находятся еще в начальной стадии. И мы, и специалисты ИТМО находимся в поиске оптимальных способов получения УНМ и их разновидностей и дозировок. Для получения более объективных результатов необходимо провести дополнительные эксперименты по помолу, как с другими типами углеродных добавок, так и с материалами, такими как клинкер или отсеvy дробления гранитного щебня.

**Оптимизация применения противогололедных материалов  
на автомобильных дорогах общего пользования**

Вольский Е. В. Бусел А. В.

Белорусский национальный технический университет

На зимнее содержание автомобильных дорог общего пользования расходуется около 50% финансовых средств, выделяемых на круглогодичное содержание дорог. Поэтому их рациональное использование является актуальной задачей отрасли.

Продолжительность зимнего периода, а также интенсивность снежных заносов и образования зимней скользкости на автомобильных дорогах зависят от многих природно-климатических факторов (наличия снежного покрова, продолжительности и направления ветра со скоростью более 5 м/с, интенсивности и частоты выпадения осадков, переходов температуры через 0 °С, рельефа местности, высоты насыпи и т.д.) и могут отличаться в 2-3 раза от предыдущих зим. Поэтому объективная оценка зимнего содержания автомобильных дорог (или их участков) может быть дана только на основании многолетних наблюдений за работой дороги в зимний период. С этой целью разработан паспорт зимнего содержания автомобильных дорог, в котором в течение 10-летнего периода учитываются и анализируются данные как о погодных условиях, так и о своевременности, качестве, объеме и стоимости работ по ликвидации зимней скользкости и снежных заносов. На основании паспортных данных и данных метеопрогноза планируется осуществить оптимизацию мероприятий по зимнему содержанию дорог и разработать автоматизированную систему управления, в задачи которой входит:

- определение состояния и условий дорожного движения (температура воздуха, туман, снегопад, гололед, интенсивность движения и т.п.);
- разработка схем организации движения;
- обоснование необходимости и норм инженерного оборудования и обустройства дорог, устройства связи при зимнем содержании автомобильных дорог);
- разработка и внедрение новых современных методов управления дорожным движением;

- обеспечение нормальных условий движения в сложных погодных условиях.

- постановка приборного учета и контроля выполняемых работ по объему и соблюдению директивных сроков установленных действующему ТНПА.

Схема автоматизированной системы управления приведена на рисунке 1.



Рисунок 1.Схема автоматизированной системы управления

Учитывая тот факт, что протяженность только республиканских дорог составляет 15,4 тыс. км, площадь дорожных покрытий 25 млн. м<sup>2</sup> данная задача требует привлечения серьезных программных средств для ее решения.

Рассмотрим вопрос оптимизации использования противогололедных материалов.

За три зимних периода 2003-2006 гг. среднее количество распределений противогололедных материалов составило от 66 до 112 раз при количестве выпадения осадков и переходов температуры воздуха через 0 °С от 88 до 126. Расход противогололедных материалов составил от 500 до 767 тыс.т. при этом израсходовано соли в чистом виде от 24 до 45 тыс.т и для приготовления песко-соляной смеси от 153 до 192 тыс.т.

В разрезе автодорог фактический расход соли (кг/м<sup>3</sup>) составил по РУП «Минскавтодор-Центр» - 4,6; РУП «Белавтострада» - 2,7; РУП «Бреставтодор» - 2,4; РУП «Витебскавтодор» – 2,5; по РУП «Гомельавтодор» и РУП «Могилеавтодор» – 1,4; по РУП «Гродноавтодор» – 1,9. С учетом ограничений расхода соли 2,0 кг/м<sup>2</sup> перерасход соли составил 10520 т или превысил на 4%. Поэтому в перспективе увеличение количества соли не предусматривается и должно соответствовать достигнутому уровню – около 200 тыс.т. Расчеты по оптимизации расхода противогололедных материалов показали, что использование чистой технической соли необходимо увеличить за ближайшие 10 лет с 34 тыс.т (2006 г) до 123 тыс.т (2016 г.), а расход песка для приготовления песко-соляной смеси уменьшить с 628 до 200 тыс.т или в 3 раза (за счет применения 123 тыс.т чистой соли и более концентрированной смеси ПСС от 1:2,6 (2007 г.) до 1:1,5 (2016 г.). Общий расход противогололедных материалов планируется сократить от 662 тыс.т до 325 тыс.т за счет применения в 60% случаев посыпок чистой солью, в 30% - песко-соляной смесью и 10% - песком с содержанием соли 5%.

## **Литература**

1. РД 0219.1.18-2000 «Зимнее содержание автомобильных дорог общего пользования».

# Архитектура

УДК 725.4.03(476)

**Объемно-планировочные и конструктивные решения  
построек производственного назначения в Беларуси  
конца XVIII – начала XX века**

Залесская Г. Л.

Белорусский национальный технический университет

Постройки производственного назначения в конце XVIII в. начали формировать новую отрасль в отечественном зодчестве. Их объемно-планировочные характеристики и конструктивные решения отражали уровень развития техники строительства и технологии производства и их функционально-технологическая составляющая с ходом времени стала играть большую роль во внешнем облике зданий и сооружений.

Для процессов производства создавались новые материально-пространственные условия: увеличивались высота помещений, их освещенность, прочностные характеристики построек, а главное – изменялся масштаб, соразмерный более машине, а не человеку. Пристальное внимание к функциональным качествам архитектуры, к конструктивным и техническим новшествам сопрягалось с поисками оптимальных объемно-планировочных решений, приспособленных к новым требованиям.

С конца XVIII в. увеличивалось различие в объемно-планировочной структуре и архитектуре зданий разных функциональных групп (склады, кузницы, мельницы, стекольные гуты, литейные, винокуренные и сахарные заводы).

Так, в постройках чугунолитейного завода в имении графа Хрептовича функционально-технологическая определенность объемно-пространственного решения выражена в контрасте двух высоких объемов литейных участков и вытянутых построек сопутствующих процессов. Кладка стен башен из камней на извести с битым камнем, конструкция стен одноэтажных построек трехслойная с засыпкой золой между каменными стенами.

Склады пороха представляли собой каменные постройки, основу которых составлял кирпичный цилиндрический свод (ширина арки до 1,25 м), покоящийся на толстых стенах и мощном фундаменте [1].

Архитектура рядовых заводских построек была проста и определялась исключительно утилитарными требованиями.

На кирпичном заводе при Бобруйской крепости печь для обжига кирпича находилась в центре прямоугольного в плане сооружения, окруженного низким деревянным навесом, в кровле над печью возмещался аэрационный фонарь [2].

Усовершенствование оборудования и ввод паровых двигателей трансформировали пространственное строение заводов: вычленились помещения для отдельных технологических процессов и для паровой машины, складывалась ярусная организация технологии, стали строиться двух– четырехэтажные здания с каменным первым этажом для размещения паровой машины – винокуренные и сахарные заводы.

В строительстве объектов производства до середины XIX в. в основном применялись две конструктивные системы: срубная из бревен или брусьев и сводчато-стенная с использованием «дикого» камня, позднее кирпича и металлических деталей. Постепенно увеличивалось капитальное строительство из кирпича и камня, что было вызвано угрозой возгорания.

С распространением паровых двигателей и сменой социально-экономических условий с 1870-х годов в архитектуре построек производственного назначения происходит сначала количественный, а затем и качественный скачок, отразившийся на утилитарных характеристиках зданий: функциональной планировке и конструктивном решении.

Среди множества отраслей производства, получивших распространение на Беларуси в конце XIX в., можно выделить те, постройки которых отличаются от производственных зданий других отраслей. В первую очередь это винокурение и пивоварение, деревообработка, стекольное и кирпичное производства, а также металлообработка и постройки железнодорожного хозяйства.

В результате были выявлены наиболее распространенные объемно-планировочные схемы промышленных корпусов.

Для винокуренных предприятий выявлено две схемы: деревянное двухэтажное здание с вытянутым прямоугольным планом и двускатной крышей и каменное здание, объемная композиция которого состояла из двух-трехэтажного доминирующего вертикального объема, к которому примыкали одно-двухэтажные протяженные постройки с планом Т-образной формы.

Существовали две разновидности решения пивоваренных заводов. Первая – корпус завода, в который входили все производственные и вспомогательные помещения, представлял собой одно-, реже двухэтажную вытянутую прямоугольную в плане постройку из дерева срубной или каркасной конструкции. Вторая – кирпичное здание из нескольких разноэтажных объемов с вертикальным акцентом в виде многоуровневого заторного отделения.

Конструктивная система кирпичных зданий картонно-бумажных, обойных фабрик, винокуренных, пивоваренных, дрожжевых заводов выполнялась как каркасно-стенная с кирпичными или чугунными внутренними опорами, подвальная часть сильно заглублялась. В конструкциях перекрытия использовались кирпичные арки по рельсам с опиранием на металлические колонны разного сечения.

Производства с технологической схемой в одном уровне – стекольные, металлообрабатывающие, лесопильные, – имели от 2 до 7 объемов, т.к. структура предприятия усложнялась за счет размещения разных производственных процессов в отдельном объеме.

Основные процессы стекольного предприятия размещались в одноэтажном производственном корпусе с печами для плавки, в плане прямоугольном или восьмиугольном площадью от 800 до 1400 кв.м. Его высота изменялась от 3-4 метров у наружных ограждающих конструкций до пятнадцати метров в центре, где над печами плавки возводилась надстройка со световыми проемами. Конструктивной системой корпуса была сложная деревянная каркасная структура со множеством промежуточных опор и подкосов, которая поддерживала центральный разновысотный объем. Вспомогательные производственные помещения либо пристраивались к основному зданию, либо группировались в отдельный блок.

На предприятиях металлообработки самыми крупными помещениями являлись литейное с центральным или мостовым краном и слесарное со станками. Применялась конструктивная система со стеновым или каркасно-стеновым несущим остовом, высота производственных помещений до низа стропильных конструкций колебалась от 4 до 5 метров. Некоторые производственные корпуса решены в виде трехнефной базилики с мостовым краном (Кошарский завод) [3].

Здания лесопильных заводов строились одноэтажными и имели два объема: деревянный каркасный производственный корпус и кирпичное строение для парового двигателя. Уровень пола производственного цеха поднимался до 2,86 метра (1 1/3 саж) из-за необходимости установки тяжелых станков на специальном основании в подпольном пространстве, внутрь вели длинные пандусы с ограждением.

В строительстве объектов железной дороги наиболее характерными для Беларуси были веерные депо с поворотным кругом и многопролетные ремонтные мастерские. Здесь использовались металлические стропильные конструкции, мостовые краны, впервые стали применяться плоские часторебристые покрытия с продольным расположением главных балок и поперечным – световых фонарей. Таково, например, паровозное здание на ст. Минск, построенное в 1908–1909 гг. [4]

Государственное строительство производственных построек военного ведомства на западных рубежах страны конца XIX – начала XX века было связано с возведением совершенно новых объектов и инженерных сооружений: ангаров, эллингов для дирижаблей, складов новых систем, что привело к широкому применению каркасных конструкций, металлических ферм и рам, монолитных бетонных сводчатых конструкций.

### **Литература**

1. РГВИА, ф. 349, оп. 3, ед. хран. 5915.
2. РГВИА, ф. 349, оп. 3, ед. хран. 5967, 6045.
3. НИАБ РБ, ф. 299, оп.5, ед. хран 1795.
4. Очерки истории строительной техники России XIX – начала XX веков. – М., 1964. – С. 352



**Экономика и эстетика в реконструкции  
исторических городов**

Волович О. А.

Белорусский национальный технический университет

Рост численности населения в Могилёве, а также прогнозируемое увеличение количества туристов в связи с регенерацией исторической части города обуславливают преобразования фонда торгово-бытового обслуживания.

Необходимость увеличения объёма таких предприятий очевидна, хотя бы для того, чтобы сохранить 0,3 м<sup>2</sup> торговой площади на каждого горожанина или гостя города. Но самое важное – адаптировать их фасады и, по возможности, интерьеры к исторической застройке Могилёва.

Исторического центр города формируется улицами Первомайская, Пионерская, Ленинская, Челюскинцев, Лазаренко, К. Маркса, Болдина, Комсомольская, К. Либнехта, Лепешинского, Карпинского, Мигая и переулками Коммунистический, Коммисариатский, Крутой. На существующую планировочную структуру основополагающее влияние оказал сложный рельеф, поэтому на протяжении многих лет она не подвергалась значительным изменениям.

Особенностью исторического центра Могилёва является то, что после прокладки проспекта Мира в начале XX в. он полностью теряет административную и деловую функции. Поэтому в проекте регенерации предложено подчеркнуть культурную сторону ядра города, сделав его тем самым более привлекательным для туристов.

Ещё одной особенностью является то, что некоторые постройки 2 половины XX в. резко контрастирует не только с исторической архитектурой, но и с застройкой 50-ых годов XX в. Здания по ул. Первомайская 16, 31, 31а и др. разрушают целостность веками сложившейся городской ткани.

Таким образом, историческое ядро города частично утерюло аромат времени и сейчас представляет собой пёструю смесь зданий различных направлений и стилей.

В таких условиях при реконструкции, реновации, реставрации зданий очень важно, на мой взгляд, подчеркнуть

культурную и историческую ценность города, сделать её более очевидной. При этом кроме принципов реконструкции, изложенных мною ранее, необходимо найти приёмы и средства для внесения в диссонирующую застройку элементов, которые могли бы ввести в это инородное образование образные ассоциации с исторической застройкой.

Параллельно с регенерацией исторической ткани важно проводить реновацию и увеличивать объём сети предприятий торгово-бытового обслуживания. Экономическая целесообразность таких мероприятий очевидна.

Для предпринимателей, конечно, работы так называемого нулевого цикла будут значительно дороже, чем в периферийных районах. Но. В то же время, предприятия торгово-бытового обслуживания в историческом центре города значительно быстрее окупаются за счёт развитости инфраструктуры и наплыва туристов.

С другой стороны, для города это важно и выгодно, потому что появляется возможность «навязать» те эстетические решения, которые соответствуют целостности архитектурной концепции (если она есть).

Для жителей близлежащих домов, несмотря на некоторые неудобства, связанные с технологическим процессом предприятий торговли, также есть определённые преимущества. Как правило, такие предприятия имеют значительную охрану, что поднимает уровень безопасности не только самого предприятия, но и прилегающих зданий.

В предприятиях торговли значимую, а иногда и основополагающую роль играет технологический процесс. Но, часто в таких объектах невозможно применить технические новшества, необходимые для успешного функционирования, не нарушив идеи автора здания. Например, набившие уже оскомину, кондиционеры. Поэтому, в историческом центре города важно найти компромисс между архитектурным образом и технологией, сохраняя при этом сложившуюся веками ткань города.

Исходя из этого, хотелось бы разделить предприятия торгово-бытового обслуживания, расположенные в исторической части по тем мерам, которые необходимо

предпринять, чтобы оно было максимально рентабельным, сохраняя при этом историческое звучание.

Во-первых, встроенные предприятия обслуживания населения, в которых невозможно увеличить его объём. В этом случае реновация сводится к реконструкции интерьеров, в которых желательно ввести элементы исторической архитектуры и даже торговой технологии. Однако элементы механизации трудоёмких работ и современного комфорта должны при этом обязательно присутствовать.

Во-вторых, встроенные в исторические здания предприятия торговли, где возможно за счёт присоединения к ним соседних помещений произвести улучшение технологических и санитарно-гигиенических условий. При этом остаются актуальными архитектурно-эстетические требования

В-третьих. Наибольшие возможности для модернизации объектов обслуживания возникают в том случае, когда имеется возможность пристройки новых объёмов к зданию, которые не нарушают сложившегося образа здания.

В первую очередь, как показывает имеющаяся практика, это пристройка торговых залов со стороны дворовых фасадов, сложившихся торговых предприятий. Это даёт возможность, наряду с сохранением существующего исторического интерьера добавить объём с современной технологией и удобствами, кардинально решить вопросы организации погрузочно-разгрузочных и других трудоёмких работ.

Реновацию предприятий торговли, встроенных в здания второй половины XX в., возможно производить, пристраивая дополнительные объёмы перед строением, корректируя тем самым фасад, диссонирующий с окружающей застройкой, одновременно создавая дополнительные торговые площади, так необходимые в центре города.

В-четвёртых. Предприятия торгово-бытового обслуживания в отдельно стоящих исторических зданиях.

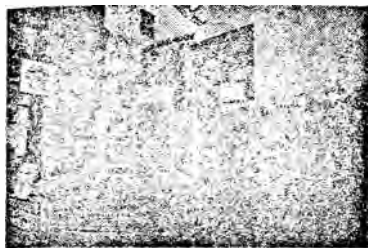
В первую очередь проблема касается крупных на определённое историческое время универсальных магазинов, которые сегодня утратили своё значение как центральные предприятия торговли в силу того, что они были созданы для определённых условий. В этом случае необходимо изыскивать возможности радикального расширения торговых площадей.

Первый путь – присоединение дополнительных объёмов существующих окружающих зданий и вынесение складов с использованием их площадей для расширения торговой площади.

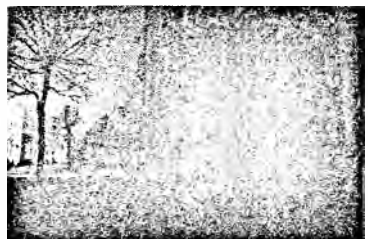
Второй путь – пристройка новых объёмов либо за счёт нерационально используемых соседних территорий либо, в случае необходимости, сноса малоценной застройки.

Основная задача в этом случае – сохранение исторического облика здания и деликатная стилизация новых объёмов. Однако и в этих случаях возникает довольно сложная задача – обязательное внесение современной технологии обслуживания посетителей и торговли.

В-пятых. Отдельная проблема – адаптация чуждых по архитектуре, выбивающихся из общей ткани застройки, зданий, построенных во времена ликвидации «архитектурных излишеств». В зависимости от особенностей каждого такого здания необходимо искать индивидуальное решение.



Пример не совсем корректного уплотнения исторической застройки. Такой образ резко контрастирует с окружающей архитектурой.



Пример удачного сочетания стиля входной группы в предприятие торговли и образа здания. Такое решение деликатно подчёркивает историческое звучание застройки

УДК 711.553.2

**Градостроительные аспекты организации мест хранения  
автотранспорта в крупных городах Республики Беларусь**

Демьянович Н. С.

Белорусский национальный технический университет

Стремительно растущий с каждым годом в нашей стране уровень автомобилизации диктует настоятельную необходимость принятия проектных и правовых решений по организации мест хранения автотранспорта в городах, планировочная организация которых складывалась на протяжении длительного времени, и на сегодняшний день уже не в состоянии решить возникающие в этом плане проблемы.

В последние годы для крупных и крупнейших городов экономически развитых стран актуальной является проблема обеспечения стоянками все увеличивающееся количество автомобилей. Быстрый рост индивидуального автомобильного транспорта прослеживается и в Республике Беларусь, затрагивая многие сферы развития городов в целом, и порождая большое число взаимосвязанных между собой архитектурно-планировочных, социальных, технико-экономических, экологических, санитарно-гигиенических и других вопросов.

Отправным рубежом возникновения проблемы хранения личного автотранспорта в нашей стране можно считать 1960-е годы, когда личный автомобиль был у 3-5% населения [1], а общественный транспорт являлся основным средством связи. В советские годы, в социально-экономических условиях тех лет, города Беларуси развивались в соответствии с генеральными планами, улично-дорожная сеть которых не была рассчитана на сегодняшний, сильно возросший уровень автомобилизации. Проблем организации мест хранения автотранспорта в те годы практически не возникало - население само занималось строительством гаражных кооперативов. С течением времени, развитием и застройкой городов, уровень автомобилизации долгое время практически не менялся, созданием комплексной системы парковок легковых автомобилей просто не занимались, в силу неактуальности проблемы.

Над решением проблем организации транспортной инфраструктуры в градостроительной науке работали многие

специалисты. Однако вопрос организации парковки легковых автомобилей в масштабе города в целом все же изучен недостаточно.

Специальная литература по развитию систем автостоянок и гаражей легковых автомобилей, в основном, была написана в 1960г., что не способствует ее эффективному использованию в силу давности написания, изменившихся социально-экономических условий жизни общества, сильно возросшему уровню автомобилизации и уже сложившейся градостроительной ситуации в городах.

Для разработки единой системы мест хранения автотранспорта в городах Беларуси, были проанализированы уже сложившиеся градостроительные ситуации в крупных городах республики (Минск, Могилев, Витебск, Гродно, Брест, Гомель). В процессе анализа учитывалось, что каждому индивидуальному автомобилю необходимо два вида стоянок – постоянное (ночное), у пунктов отправления, у мест постоянного жительства автовладельцев и временное - в различных зонах города, у всех пунктов его временного пребывания.

В градостроительной науке существует четыре основных принципа размещения автостоянок в планах городов: локальное (в непосредственной близости от обслуживаемых объектов), центральное (крупные автостоянки в центре городов), разгрузка центра (вокруг центра, вокруг зоны тяготения, радиальное, периферийное), комбинированное (одновременное применение нескольких принципов) [2].

Использование картографического анализа генеральных планов городов республики позволило определить, что существующая схема размещения автостоянок во всех городах комбинированная. Для постоянного хранения автотранспорта в основном используются гаражи боксового типа, размещенные массивами в периферийных зонах: в Минске это 60% всех мест хранения, в Могилеве, Витебске, Гродно, Бресте, Гомеле –75-90%, а также открытые охраняемые автостоянки (в Минске 37%, в городах республики – 10-25%) [3]. Временное хранение автотранспорта, в большинстве случаев, осуществляется на открытых (приобъектных) стоянках, на проезжих частях улиц,

на тротуарах, во дворах жилых домов, а также в многоэтажных паркингах (центральная часть города Минска).

За 20 лет, с 1985 года, количество автомобилей индивидуальных владельцев в Беларуси выросло более чем в 8 раз [4], и на сегодняшний день прослеживается стабильная тенденция роста автомобильного парка от 4 до 13% в год. Количество личного автотранспорта сегодня в два раза превышает число мест, специально оборудованных для стоянки и хранения транспортных средств.

Динамика развития индивидуального легкового автомобильного транспорта в городах Беларуси примерно одинакова, как и уровень автомобилизации населения. В центральных, наиболее плотно застроенных зонах городов, практически нет свободных от застройки территорий, для размещения крупных наземных транспортных сооружений.

Исторически развиваясь в одинаковых социально-экономических условиях, города республики сегодня имеют не только схожие радиально-кольцевые структуры, схожее размещение мест хранения автотранспорта в планах, но и сильно возросшее количество автомобилей, требующее решений по размещению их мест хранения.

Можно заключить, что анализируемые города «похожи», это дает возможность разработать общую методику оценки и организации мест размещения и хранения автотранспорта.

При создании концептуальной схемы размещения мест хранения автотранспорта, следует учитывать два уровня градостроительной организации жизненного пространства: макроуровень, рассматривающий город и его окрестности в целом, учитывая зональное деление (центральная, переходная, периферийная, пригородная зоны), и микроуровень, включающий в себя отдельные районы, микрорайоны и кварталы. Такая система, оцененная на различных градостроительных уровнях, с соблюдением оптимальных условий доступности и санитарно-гигиенических норм, должна обеспечивать высокие функциональные качества сети транспортных средств, удобство пользования и максимальную экономию городских территорий.

Кроме градостроительного аспекта, в исследование организации мест хранения автотранспорта, необходимо

включить анализ объемно-планировочных решений автостоянок. Уже только то, что разные зоны городов характеризуются различной плотностью застройки, доказывает необходимость выработки совместных, архитектурно – планировочных, вариантов решений в различных ситуациях.

Обзор всего вышеперечисленного в непосредственной совокупности, с учетом многокритериального анализа, даст возможность получить серию наиболее подходящих вариантов автостоянок различных типологических решений, с привязкой к определенным градостроительным ситуациям.

Система сооружений для паркирования должна являться составной частью общегородской транспортной системы, координирующей в соответствии с современными градостроительными требованиями работу различных видов транспорта – городского и пригородного, рельсового и безрельсового, массового и индивидуального.

В системе должны быть задействованы различные способы хранения индивидуального автотранспорта, основанные на развращенной типологии их объема – планировочных решений. В результате совместного анализа градостроительных и объемно – планировочных решений, необходимо создание сводной, архитектурно-планировочной типологии и методики выбора проектных решений в каждом конкретном случае.

#### **Литература**

1. Семенова, О. С. Формирование системы хранения индивидуального автотранспорта в микрорайонах крупных городов на примере Москвы: дис. ... канд. техн. наук / О. С. Семенова. – М, 2004 г.
2. Боровик, Е. Н. Принципы и системы размещения автомобильных стоянок в больших городах / Е. Н. Боровик. – ГОСИНТИ, ПБГ. – № 4–76, 1976 г.
3. Концепция развития автостоянок и парковок в г. Минске на 2004-2006 годы.
4. Голубев, Г. Е. Автомобильные стоянки и гаражи в застройке городов / Г. Е. Голубев. – М.: Стройиздат, 1988 г.



Колосовская А.Н.

Белорусский национальный технический университет

В настоящее время широко востребованы фасадные чертежи, а лучше 3D модели зданий целиком, необходимые для реконструкции и реставрации. Для выполнения восстановительных работ необходимо сделать фиксацию современного состояния объекта архитектуры – провести обмерные работы. Сегодня трудоемкую задачу обмера зданий, требующую много времени и затрат, может значительно упростить применение лазерного оборудования. При проведении обмерных работ на смену оптическому нивелиру, пузырьковому или водяному уровню, отвесу и рулетке основными измерительными приборами становятся инструменты нового поколения – лазерные: *кросслайнер, дальномер, лазерные уровень и нивелир.*

Многие исторические объекты, памятники архитектуры находятся в неудовлетворительном состоянии. Они сильно повреждены, полуразрушены или претерпели ряд перестроек и наслоений. Проведение обмерных работ на таких объектах вызывает ряд сложностей. Кроме того, современные ускоренные темпы восстановительных и реставрационных работ, новые требования к качеству проектной документации, сжатые сроки предпроектных исследований выявили недостатки традиционных измерительных инструментов. Среди них: большой расход времени при тщательной установке инструментов, снижение точности измерений при быстром темпе работ, большая зависимость качества работ от квалификации исполнителя и, как правило, участие в замерах двух человек. Изобретение лазерных диодов и использование луча видимого глазу и безопасного для человека (мощность – 1-2 милливатта), способствовало решению ряда перечисленных выше проблем, связанных с традиционными измерительными инструментами.

Следует выделить несколько типов приборов нового поколения.

Прежде всего – это *лазерный уровень*. Как правило, так называют пузырьковый уровень, но со встроенным светодиодом в торце прибора. Бывают одно- и двухлучевые лазерные уровни, в последнем два луча находятся под углом  $90^\circ$  друг к другу. Дальность работы таких приборов при хорошем освещении 20–30 м, точность обычно  $\pm 3$  мм на 10 м. Инструмент используется при горизонтальных замерах. Приборы такого типа могут иметь жестко закрепленный в корпусе однолучевой светодиод и автоматическую нивелировку, что приводит к минимуму ошибок при измерении и быстрой переустановке.

*Ручные, полуавтоматические и автоматические лазерные нивелиры* можно определить в одну группу. У этих приборов светодиод жестко закреплен в корпусе и идеально отъюстирован (выверен) относительно его основания, что делает его точнее, чем лазерный уровень.

*Ручной лазерный нивелир* настраивается вручную с помощью пузырькового уровня, установленного соосно к лазерному диоду. Дальность измерения прибором 20–30 м. Для улучшения видимости используют специальные красные очки со светофильтрами, повышающие контрастность луча и специальные светоотражающие пластины, усиливающие сигнал. Однако использование светоотражающих пластин сопряжено с привлечением к работам еще одного человека. Используется для определения перепада высот, продления линии. Вращение на нивелировочной тарелке позволяет сканировать (проводить) горизонтальные линии. Это особенно ценно при обмерах строений с утраченными фрагментами. В комплект к прибору идет призма, отклоняющая луч на  $90^\circ$ , которую можно вращать и проводить разметку по вертикали. Бывают двухлучевые призмы, где один луч направлен прямо, а второй – перпендикулярно ему вверх или вбок, что позволяет задавать угол  $90^\circ$ .

*Полуавтоматический лазерный нивелир* (иначе – лазерная плоскость, ротационный лазер), отличается от ручного наличием вращающейся призмы, направляющей один или два луча (вверх и вбок). При круговом вращении призмы образуется видимая плоскость, а при сканировании сектора – видимая прямая линия. При замерах на большие расстояния (до 100 м) используются специальные детекторы со встроенным

пузырьковым уровнем, при попадании луча на которые загораются светодиоды, подаются звуковые сигналы.

*Автоматический лазерный нивелир* (иначе – лазерная плоскость, ротационный лазер) отличается автоматическим способом настройки и точностью ( $\pm 1$  мм на 10 м). В приборе автоматически (за 3–5 секунд) устанавливается уровень в горизонтальной и вертикальной плоскостях и автоматически призмой компенсируется отклонение нивелира от линии горизонта на 8–9°. При отключении функции автоматической установки возможна установка большего наклона. Призма автоматического нивелира, при вращении формирует плоскость или линию. Дальность измерения прибором с применением детектора 100 м, в некоторых моделях до 150–200 м. Диапазон температур – от -20 до +50 °С. Прибор может управляться дистанционно.

Разработаны и *многолучевые лазерные нивелиры*, направляющие три и пять лучей. В трехлучевых нивелирах в одном варианте лучи могут быть направлены по горизонтали, вертикали и вбок (под углом 90° к остальным), в другом – два луча по вертикали (через центр призмы, т.е. фактически создается «сквозная» вертикаль), третий по горизонтали (под углом 90° к остальным). Пятилучевые нивелиры имеют «сквозную» вертикаль (два луча) и «сквозную» горизонталь (два луча), горизонтальный луч (под углом 90° к остальным), что позволяет быстро выполнять 90-градусную разбивку площадей и контролировать геометрию уже построенного объекта любой сложности. Дальность измерений пятилучевого лазерного нивелира до 50–80 м в зависимости от условий освещения, точность – обычно  $\pm 1$  мм на 10 м, автоматическая установка уровня – с отклонением в 9°.

*Кросслайнер* относится к особому типу измерительных приборов. Прибор автоматически устанавливает в пространстве две плоскости – горизонтальную и вертикальную, в проекции – это две линии, пересекающиеся под углом 90°. Прибор удобен при соотношении элементов по горизонтали и вертикали. Дальность измерений прибора – 10–20 м, точность –  $\pm 3$  мм на 10 м по горизонтали,  $\pm 4$  мм на 10 м по вертикали, автоматическая установка уровня – в пределах  $\pm 4^\circ$ .

*Дистанционный лазерный измеритель* (иначе – дальномер, лазерная рулетка) позволяет бесконтактно мерить расстояние от основания до точки попадания луча. Прибор замеряет разницу между прямым и отраженным сигналом. Точность –  $\pm 3$  мм, дальность – 100–150 м, с использованием светоотражающей пластины – 200 м, скорость измерения у разных производителей от 0,5 до нескольких секунд. Результаты замеров можно заносить в память прибора и, используя встроенный калькулятор, определять периметр здания, рассчитывать площадь, объем, высоту.

В соответствии с вышеуказанными техническими возможностями применение лазерных технологий в обмерных работах имеет ряд преимуществ: возможность работы с труднодоступными и опасными объектами, в том числе из-за возможности обрушения ветхих конструкций; участие в замерах одного человека; высокая производительность, позволяющая получать десятки замеров в течение одного рабочего дня; высокая точность полученных данных. Полученные при обмерных работах данные проходят обработку с помощью самых современных компьютерных программ и превращаются в необходимую заказчику документацию для проведения реконструкции и реставрации.

#### **Литература**

1. Бугаева, Н. И. Архитектурные обмеры и особенности их графической основы / Н. И. Бугаева. – Екатеринбург: Архитектон, 2004. – 146 с.
2. Геодезические технологии архитектурных обмеров и определения геометрических параметров зданий [Электрон. ресурс] / НПП «Фотограмметрия», 2006. – Режим доступа: [http://www.photogrammetria.ru/services/services\\_b.html](http://www.photogrammetria.ru/services/services_b.html). – Дата доступа: 09.06.2007.
3. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов / Ю. Б. Баранов [и др.]. – Москва: ГИС-Ассоциация, 1999 [Электронный ресурс] / Словарь по геоинформатике, 2002–2007. – Режим доступа: <http://www.gisa.ru/geoinfoslovar.html>. – Дата доступа: 09.06.2007.
4. Левенко, А. Под лазерным прицелом. Лазерный измерительный инструмент / А. Левенко // Элит дом. Коттедж от фундамента до интерьера. – 2003. – № 7(26). – С. 53–56.

УДК 711.454

**Влияние конструктивных схем на формообразование моста  
(польский опыт)**

Лапко А. А.

Политехника Белостокска, БНТУ

*В статье рассматриваются особенности загородных мостов северо-восточного региона Польши, анализируется сложившаяся типология мостов на основании существующих конструктивных схем. Прослеживается влияние материалов на художественную выразительность мостовых сооружений в рамках различных типологических групп, специфика этого влияния для данного региона.*

**Введение**

Типологические особенности мостовых сооружений могут быть рассмотрены с учетом признаков, влияющих на архитектурный образ моста. Важнейшим признаком является конструктивная система, поскольку в отличие от большинства других архитектурных объектов, она открытая и видимая.

**Основная часть**

Как показывает история мостостроения и современный опыт, архитектурная типология мостов включает следующие основные типы: а. балочные, б. арочные, в. на основе ферм (ферменные), г. висячие, д. вантовые мосты.

Представленная классификация основных типов мостов является условной и в некоторой мере упрощенной, потому что в каждой группе можно найти довольно большой диапазон своеобразных конструктивных решений (за основу принята классификация А. Мадая и В. Воловицкого [1]). Балочные мосты строились уже в древние времена. Балки, первоначально в виде деревянных бревен, проложенных рядом, служили конструктивной основой простого моста. В этом случае, несущее устройство – это упругие горизонтальные конструктивные элементы продольной формы, воспринимающие поперечную нагрузку. В итоге развития балочных мостов появились разные конструктивные типы, которые, исходя из простой схемы, дают своеобразные формы. Примерами являются конструкции панельные и коробчатого

сечения. Признаком, позволяющим объединить упомянутые конструкции в одном классификационном типе, является визуальная схожесть боковых видов мостов. Балочные (панельные) мосты характеризуются линейностью, простой горизонтальной формой. Поэтому современные конструкции коробчатого сечения изменяющейся высоты, находясь в группе балочных мостов, на основе принятой классификации должны быть причислены к группе арочных мостов (имея в виду боковые виды таких объектов).

Группа арочных мостов достаточно разнообразна благодаря многообразию форм арок. Существенным признаком, влияющим на визуальное восприятие арочных мостов, является (кроме разных видов арок) расположение проезжей части моста относительно главных арочных балок, что дает три типа ситуаций: а) проезжая часть находится над аркой, б) проезжая часть находится под аркой, в) проезжая часть находится в середине арочных балок.

В ферменных мостах главным конструктивным элементом являются фермы – тип прогонов, образованный из меньших сжимаемых или растягиваемых брусевых элементов. Формы ферм могут быть разнообразными, но, благодаря схожести своих визуальных характеристик, ферменные мосты являются группой с довольно ярко выраженным своеобразием.

Висячие мосты – грандиозные объекты, пролеты которых подвешены при помощи вертикальных элементов (тросов) к главным, несущим вантам (или цепям), прикрепленным к верхушкам пилонов, высота которых значительно превышает ширину проезжей части моста.

В отличие от висячих, вантовые мосты характеризуются тем, что пролеты подвешены к пилонам непосредственно при помощи тросов.

Представленные типы конструктивных схем касаются решений пролетов моста. Нередко, когда многопролетный мост имеет большую протяженность, его пролеты имеют разные конструктивные решения. Например, мост состоит из балочных пролетов одинаковой (или приближенной) длины и самого длинного пролета арочной, висячей или вантовой конструкции.

Эволюция развития мостостроения показывает, что основные конструктивные схемы трансформировались, в итоге

чего появились новые типы смешанных конструктивных схем:  
 е. арочный ферменный мост; ж. арочный подвесной мост;  
 и. висячий ферменный мост; к. вантовый ферменный мост;  
 л. арочный ферменный вантовый мост.

Представленная типология свидетельствует о достаточно большом наборе разных типов мостов. Разнообразие материалов, используемых в конструкции мостов, дополнительно расширяет сложившуюся типологию, поскольку разные материалы, применяемые при одной и той же конструктивной схеме, приводят к появлению новых типов объектов, повышают их художественную выразительность. Использование материалов в сочетании с разными конструктивными решениями мостов показано в таб. 1.

Таблица 1. Взаимосвязь материалов и конструктивных решений мостов

	Использованные материалы				
	Камень	Дерево+ др. мат.	Сталь+ др. мат.	Бетон+ ж/б	Сталь+ ж/б
Балочный	*	■	■	■	■
Арочный	■	■	■	■	■
Ферменный		■	■	*	■
Висячий		*	■	*	■
Вантовый		*	■	■	■
Арочный ферменный		■	■		■
Арочный вантовый		■	■	■	■
Висячий ферменный			■		■
Вантовый ферменный			■		■
Арочный ферменный вантовый			■		■

Условные обозначения таблиц 1-2: ■ - использование данного материала в данном типе конструкций; \* - данный материал использовался в мостостроении в истории, но не

применяется для построек в настоящее время или применение данного материала выступало в единичных случаях и не является характерным для данной конструктивной схемы.

Используемые материалы собраны в группы, которые могут дать обобщенное представление об их характере. В действительности их состав используемых материалов обширнее и разнообразнее. Выбор материалов, указанных в таблице, осуществлялся согласно критериям преимущественного использования данного материала при строительстве мостов. Практика современного мостостроения показывает, что редко используется только один материал. Развитие новых технологий приносит все новые материалы (полимеры, упрочненные волокнами, алюминий, композитные материалы, эластомеры и др.). Принятый состав материалов довольно полно характеризует современную ситуацию в мостостроении. Наиболее редким материалом, в настоящее время используемым в конструкциях мостов, является камень. Хотя в прошлом материал был очень часто применяемым, в нынешнее время используется довольно редко. В свою очередь, наиболее распространенным материалом является сталь в сочетании с другими материалами (камнем, деревом, бетоном, железобетоном). Сочетание стали и железобетона принято как отдельная группа материалов. В конструкциях такого типа материалы используются для строительства моста по законам логики данной конструктивной схемы, и, одновременно, визуально выделяются как отдельные материалы. Широкое использование стали в мостовых конструкциях является следствием конструктивных свойств этого материала (обладает похожими параметрами прочности на сжатие и растяжение). Бетон и железобетон из-за своих конструктивных ограничений (низкая прочность на растяжение) используется только для определенных типов конструктивных схем. Дерево еще недавно считалось архаичным материалом. В нынешнее время для этого материала характерно своего типа «возрождение» в виде клееных деревянных конструкций. Поэтому этот материал все чаще выступает в современных мостовых сооружениях.

Разные конструктивные приемы в сочетании с разными материалами в архитектуре мостовых сооружений характерны для разных стран, климатических и топологических условий.



Архитектурное оформление объектов является также отражением локальных традиций, культурных особенностей стран и регионов.

Польский опыт мостостроения показывает, что висячие мостовые конструкции не являются характерными для этого региона (хотя имеются единичные примеры).

Хотя разнообразие мостовых сооружений в Польше меньше в сравнении с мировым опытом, можно заметить значительный прогресс в польском мостостроении в течение последнего десятилетия. Это особенно касается вантовых конструкций и конструкций смешанного типа (за последние годы появились мосты со смелыми конструктивными решениями, использующими ванты [3]). В Подляском воеводстве количество применяемых конструктивных схем мостов значительно меньше – четыре.

#### **Заключение**

Все вышесказанное позволяет сделать следующие выводы:

1. Анализ развития мостостроения показывает наличие эволюции в развитии конструктивных схем в связи с появлением новых материалов и технологий.

2. Один и тот же конструктивный тип моста дает различные архитектурные решения при использовании разных материалов.

3. Анализ общепольской практики показывает, что из десяти существующих типов (основных и смешанных) конструктивных схем в Польше используются только семь типов, в Подляском воеводстве количество применяемых типов конструктивных схем сводится к четырем.

#### **Литература**

1. Madaj, A. Podstawy projektowania budowli mostowych / A. Madaj, W. Wołowicki. – Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2003. – С. 195.
2. Graf, B. Bridges that changed the world / B. Graf. – Prestel – Munich, 2005.
3. Flaga, K. Estetyka konstrukcji mostowych / K. Flaga, K. Januszkiewicz, A. Hrabiec, E. Cichy-Pazder. – Kraków: Politechnika Krakowska, 2005. – С. 165.
4. Манкевич, С. В. Вопросы взаимосвязи архитектурной формы мостов с материалами и конструкциями / С. В. Манкевич // Арх. тетради. – Вып. 2. – Минск, 2006.

# Диагностика технического и транспортно-эксплуатационного состояния дорог

УДК 625.7

Диагностика как основа менеджмента качества  
автомобильных дорог

Кашевская Е. В.

## Введение

Как правило, основной проблемой обеспечения высокого уровня качества автомобильных дорог все специалисты дружно называют недостаточное финансирование.

Перед подобной проблемой в 70-80 годах XX века оказались многие страны. Для оптимального распределения имеющихся средств на ремонт дорог в развитых странах Западной Европы, США, Канаде и др. начали развиваться системы управления состоянием покрытий - PMS (Pavement Management Systems). В бывшем СССР также проводились работы по созданию систем управления дорожным хозяйством на стадии эксплуатации автомобильных дорог. Специалисты дорожной отрасли Белоруссии достигли при этом больших успехов[1].

**1. Задачи управления состоянием дорожных покрытий.** «В широком смысле система управления состоянием дорожных покрытий - это координированная совокупность всех видов деятельности связанных с планированием, проектированием, строительством, текущим содержанием и оценкой состояния дорог, а также с научными исследованиями в области дорожных одежд. Часто термин применяют в более узком смысле, понимая под ним взаимосвязанную совокупность процедур и моделей сбора и обработки данных о состоянии покрытия, а также разработанное на их основе программное обеспечение.»[2].

Система позволяет обеспечить поступление информации для ответа на вопрос об очередности ремонта дорог и принятия наилучших решений. Инструментом получения информации является мониторинг. Красиков О.А. полагает, что

«...применительно к автомобильным дорогам, под мониторингом (monitoring) следует понимать систему наблюдений и контроля за состоянием объекта, состоящую из трех основных этапов: наблюдения, оценки состояния и прогноза возможных изменений» [3]. Конечной целью мониторинга является возможность оптимального управления транспортно-эксплуатационным состоянием автомобильных дорог посредством выбора стратегии решения задач ремонта и содержания.

О.А. Красиков предлагает выделять следующие задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели:

«- диагностика автодорог, формирование и постоянное обновление банка данных об их транспортно-эксплуатационном состоянии, интенсивности и составе движения транспорта, о дорожно-строительных материалах и их характеристиках, о нормативных требованиях к дорогам и т.п.,

- планирование очередности ремонтных мероприятий на текущий момент с учетом ограниченных ресурсов,

- прогнозирование состояния дорог и планирование очередности ремонтных мероприятий на перспективу с обоснованием стоимости их выполнения,

- регулирование и организация дорожного движения транспорта,

- реализация планов дорожно-ремонтных работ с выбором оптимальных технологий,

- обеспечение качества дорожно-ремонтных работ» [3].

**2. Системы мониторинга автомобильных дорог с выходом на решение задач по управлению их состоянием.** В настоящее время в мире имеется множество систем управления, среди которых можно отметить RoSy PMS, BMS (Дания, Швеция, Норвегия и др.), ROMAPS (Великобритания), AASHTO (США), Dighton (Канада), Davasema (Литва), Visage, Argus, (Франция).

Большое внимание проблеме содержания и ремонта дорог уделяют мировые финансовые институты, - в первую очередь, Мировой Банк. При его поддержке разработана инженерно-экономическая Модель Стандартов Проектирования и Содержания Автодорог (HDM (Highway Development and Management Tools)). В HDM отсутствует только полноценный банк данных,

в остальном система обладает всеми качествами хорошо разработанной PMS. И настоящее время разработана уже четвертая версия HDM - IV. Область применения этой версии значительно расширилась по сравнению с традиционной оценкой проектов, в настоящее время эта мощная система анализа управления автомобильными дорогами и инвестициями используется многими странами для управления сетью национальных дорог. С использованием HDM – IV можно решать следующие задачи:

- анализ и уточнение проектных решений на основе вариантного проектирования;
- оценка эффективности вложений инвестиций по вариантам проектных решений, в т.ч. по вариантам развития сети дорог;
- планирование и прогнозирование инвестиций на ремонт и содержание сети дорог (текущее и долговременное планирование);
- оценка эффективности технических решений и технологий ремонта дорог;
- анализ деятельности дорожных предприятий и др.

Экономические выгоды от дорожных инвестиций определяются сравнением общих затратных потоков на различные варианты дорожных и строительных работ с базовым вариантом («ничего не делать»), который обычно предусматривает минимальные затраты на текущий ремонт и содержание. HDM-IV позволяет проводить сравнительные оценки затрат и экономического анализ различных инвестиционных предложений. Она оценивает затраты на большое количество вариантов на любой заданный пользователем период времени.

Система управления состоянием дорог и мостов, используемая в Дании, Швеции, Чехии, Норвегии и др. RoSy PMS, BMS (Road Systems Pavement, Bridg Management System) состоит из следующих основных модулей (рисунок 3) [4]:

- RoSy BASE – формирование базы данных по дорогам и их электронная обработка;
- RoSy BMS – формирование базы данных по мостам, обоснование и назначение ремонтных работ;
- RoSy Plan – выработка возможных оптимальных способов содержания и обслуживания дорожной сети;

- RoSy Design – проектирование усиления дорожных конструкций.

Данная система позволяет учитывать влияние холодного климата и основные особенности HDM-IV.

«В системе RoSy PMS также учтен процесс прогнозирования развития указанных повреждений покрытия во времени В отличие от HDM. в системе RoSy более детально проработан вопрос вариантного назначения конструктивных слоев усиления дорожной одежды. Вместе с тем, экономическая сторона вопроса при обосновании оптимальной стратегии выполнения дорожно-ремонтных работ уступает модели HDM. Следует отметить, что при вариантной проработке усиления дорожных одежд используется европейская методика расчета усиления, которая отличается от методики СНГ, что сказывается на толщинах слоев усиления» [3].

Оптимизационные решения в системе RoSy выполняются путем расчета по различным схемам назначения ремонтных работ с использованием критерия дисконтированных затрат за период 30 лет.

В Германии в настоящее время используется собственная система менеджмента сохранения дорог [4], унифицирующая разные системы федеральных земель. Основными элементами немецкого менеджмента сохранения автомобильных дорог являются:

- концепция сохранения дорог с учетом транспортной политики и экономических целей;
- системный порядок действий и функции управления в основе планирования работ по содержанию дорог;
- требования к дорогам и дорожным сооружениям;
- методы планирования и оптимизации;
- информационные связи в системном рассмотрении, с учетом контроля за мероприятиями по содержанию.

Разработанная в Германии система PMS базируется на четырех показателях, которые определяются инструментально:

- продольная ровность дорожного покрытия;
- поперечная ровность (колея);
- сцепные качества;
- наличие трещин и других деформаций на покрытии.

Каждый из перечисленных параметров контролируется специализированной передвижной лабораторией. Продольная ров-

ность, в отличие от общепринятой практики, оценивается не по международному показателю ровности IRI, а по спектральной плотности распределения неровностей по длине дороги. Колея также оценивается с использованием лазерного прибора. Сцепные качества определяются прицепной установкой типа ПКРС. Трещины и другие повреждения фиксируются на видео. При проведении исследований скорость передвижных лабораторий устанавливается не менее 80 км/ч, чтобы не создавать помех движению транспортного потока на обследуемой дороге.

По результатам выполненных измерений формируется база данных. Состояние дорог оценивается по каждому показателю по четырехбалльной шкале в соответствии с графиком, представленном на рисунке 1.



Рисунок 1 – Оценка состояния дорог в зависимости от значения показателя по измерениям

**Американская система управления состоянием дорог и мостов AASHTO [5]** является аналогом HDM и включает значительный перечень решаемых инженерных задач, в том числе транспортных, таких как проезд большегрузных автомобилей с пересечением границ других государств, экономических - выбор оптимальных проектных решений, а также экологических и социальных. Функционирование системы осуществляется на основе анализа значительного объема информации и требований стандартов. Система предусматривает постоянный мониторинг дорог и мостов.

**Английская система управления состоянием дорог RO-MAPS (Roughton International's Maintenance Planning System)** используется в 12 странах [6]. Она является также аналогом HDM и PMS. В методологическом плане она включает в себя две основные подсистемы MMM (Maintenance Management Methodology) и DBMS (Database Management System), которые в качестве функционирующих компонентов содержат RAdb (Road Asset inventory and condition database) и MPdb (Maintenance Planning application). Система не только совместима с HDM, но и включает отдельные ее подпрограммы. Существование этой системы, так же как, впрочем, и PMS, свидетельствует о том, что каждая страна стремится создать свою систему, которая бы учитывала новейшие достижения и специфические экономические, климатические, технологические и др. особенности исследуемого региона.

**Система мониторинга и планирования ремонтных работ МАДИ** разработана под руководством профессора Васильева А. П. [7] В основу методики положены элементы системы диагностики автодорог [8]. Выходным параметром системы является обеспечиваемая дорогой скорость движения автомобиля с учетом влияния на нее состояния покрытия, обочин, интенсивности движения, прочности одежды и др. Существенным отличием системы являются показатели обеспечения расчетной скорости по наиболее важным параметрам дорог с использованием их при определении транспортных расходов. Значения этих показателей были пронормированы, что обеспечило возможность на предварительной стадии ранжировать участки дорог по степени их соответствия требованиям движения транспорта.

**В Республике Беларусь** для республиканских автомобильных дорог используется система управления транспортно-

эксплуатационным состоянием автомобильных дорог "Ремонт", разработанная в РУП "Белорусский дорожный инженерно-технический центр". Система собирает данные в автоматизированный банк данных, на основании инженерного анализа производит оценку и прогнозирование состояния, позволяет обосновать выбор стратегии ремонта, а также рассчитать экономическую эффективность и оптимизировать затраты на ремонт.

**3. Прогнозирование состояния и управление состоянием автомобильных дорог.** При всем многообразии имеющихся систем все они объединены общими принципами построения и функционирования. Схема системы управления состоянием автомобильных дорог, предлагаемая Г.М. Гасановым приведена на рисунке 2 [9].

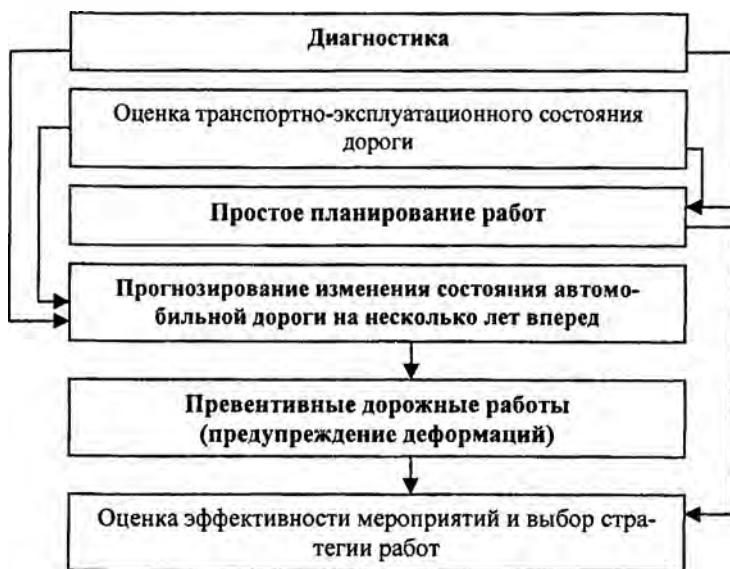


Рисунок 2 - Система управления состоянием автомобильных дорог

При значительной протяженности дорожной сети хранение и обработку собранных данных можно осуществлять только с использованием средств вычислительной техники. Основным



инструментом для этих операций является банк дорожных данных, являющийся важной составной частью любой системы управления.

В соответствии с установленными приоритетами современную систему мониторинга дорожно-транспортного комплекса следует развивать по трем основным направлениям:

- мониторинг технических параметров автомобильных дорог и состояния покрытия;
- мониторинг транспортного потока;
- мониторинг состояния окружающей среды.

Установление геометрических характеристик и идентификация функционального класса автомобильных дорог осуществляется на стадии инвентаризации.

Большое значение с точки зрения эффективности управления системами имеет достоверность прогнозирования состояния системы в будущем на основании анализа состояния в настоящее время.

Для прогнозирования состояния принято использовать разные методы моделирования. Вместе с тем, как считает Курганов В.А.: «... процедура прогнозирования должна сочетать в себе все положительные качества различных методов получения информации. Необходим расчет математической модели прогнозирования, ..., проверка ее адекватности на основе имеющихся результатов натуральных наблюдений, а само прогнозирование должно осуществляться в интерактивном режиме с участием экспертов, которые вносят поправки в результаты расчета, исходя из содержательного анализа причинно-следственных факторов...» [10].

## **Литература**

1. Комплексная система управления качеством в Миндорстрое БССР. – Минск, 1977.
2. Красиков, О. А. Мониторинг и стратегия ремонта автомобильных дорог/ О. А. Красиков. – Алматы: КазгосИНТИ, 2004.– 263 с.
3. Автомобильные дороги Германии. Федеральное министерство транспорта Германии. Bundesministerium fur Verkehr (BMV), Bonn, 1995.

4. Bergman-Syren, J. Anwendung von Pavement-Management-System für die Planung der Straßenerhaltung durch die Straßenbauverwaltung der Länder-Beispiel Hessen / J. Bergman – Syren // Deutscher Straßen- und Verkehrskongreß, Düsseldorf 1996; Kongreßbericht der FGSV, S. 91
5. Anthony, R. United States Vision, for Total Highway Asset Management./ R. Anthony R., L. Jose , A. Aldayui.// American Association of State Transportation Officials (AASHTO) – 444 N. Capitol St. NW, Suite 249 Washington. DC 20001. For presentation and publication an the 2<sup>nd</sup> International Conference on Bridge Maintenance/ Safety and Management, Kyoto Japan, October 19-22, 2004.
6. ROMAPS-PS. Rough ton Internationals Maintenance Planning System. Installation and Operations Manual. Volume 1 and 2/ 1998. Page 72 and 149
7. Васильев, А. П. Комплексный метод оценки качества и состояния автомобильных дорог/ А. П. Васильев // Автомобильные дороги, 1989 – № 7. – С.10–11; № 8. – С. 7–10.
8. Диагностика и управление качеством автомобильных дорог: учеб. пособие / И. И. Леонович, С. В. Богданович, В. В. Голубев [и др.]; под ред. И. И. Леоновича. – Минск: БНТУ, 2002. – 357 с.
9. Гасанов, Г. М. Управление транспортно-эксплуатационным состоянием автомобильных дорог / Г. М. Гасанов. – М.: МАДИ (ГТУ), 2005. – 172 с.
10. Курганов, В. М. Управление автомобильными перевозками на основе ситуационного подхода: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.08 / В. М. Курганов. – Москва, 2004. – 323 с.

УДК 625.7

**Проблемы и перспективы системного управления состоянием автомобильных дорог**

**Леонович И. И., Богданович С. В.  
Белорусский национальный технический университет**

В настоящее время автомобильный транспорт приобрел особое значение для экономики большинства стран. Это во многом объясняется его высокой мобильностью, широким диапазоном

грузоподъемности автомобилей, позволяющей оперативно реагировать практически на любые потребности в перевозках.

По этой причине наличие эффективной системы автомобильного транспорта в большинстве стран мира рассматривается как одно из важнейших условий для дальнейшего развития экономики. Развитые страны вкладывают огромные ресурсы в строительство и улучшения состояния автомобильных дорог. Сеть автомобильных дорог при этом приобретает ценность национального актива, составляющего значительную долю национального богатства, а дорожный сектор дает большой вклад в валовой национальный продукт. В связи с этим важно и необходимо, чтобы этот актив управлялся с использованием наиболее современных и обоснованных принципов [1].

Сеть автомобильных дорог любой страны имеет сложную пространственную форму, участки дорог имеют самый разный возраст, конструктивные особенности, транспортно-эксплуатационное состояние. Управлять таким активом чрезвычайно сложно, а с сокращением выделяемого на дороги финансирования сложность процессов управления возрастает.

Ответом на все увеличивающуюся сложность процесса принятия решения при управлении состоянием дорог стало появление и развитие систем управления состоянием покрытия (pavement management systems, PMS). Сейчас невозможно со всей определенностью сказать, где и когда появилась первая PMS, принято только считать, что это произошло на переломе 60-70 годов 20 века. [2]. За это время системы управления состоянием покрытий прошли путь от простейших наборов инструкций до сложнейших компьютеризированных систем, а их разработка и развитие выделились в отдельную отрасль дорожной науки. Многие западные фирмы свой бизнес полностью строят на разработке и внедрении PMS в развивающихся странах и на консультациях в этой области. Большую роль придает использованию PMS Мировой Банк, финансировавший разработку четырех поколений системы HDM, которую можно назвать самой известной PMS в мире.

В то же время, изучение многочисленных информационных и исследовательских материалов по PMS, имеющихся в сети Интернет, ознакомление с материалами международных конфе-

ренций по данному вопросу, позволяет сделать несколько неожиданные, на первый взгляд, выводы.

Разработчики систем управления абсолютно не заинтересованы в распространении реальных знаний о PMS. Их единственной целью является продажа своего продукта, поскольку покупатель при этом становится почти абсолютно зависимым от поставщика не только в части методики, но и в использовании измерительного оборудования. По этой причине мы не найдем в материалах по PMS ответа на вопрос «почему», а получим только набор инструкций, к тому же не достаточно гибкий. При этом во многих случаях мы можем найти достаточно подробное описание инженерных и экономических моделей, используемых в системах. Интересно, что знакомство с данными моделями может привести к впечатлению о том, что это, собственно, и есть система управления состоянием покрытий. Однако разработчики систем не раскрывают глубинных принципов их построения. В таких условиях простое копирование инженерных и экономических моделей расчетов приведет к созданию лишь псевдо системы, работа по которой привет только к дополнительным затратам. Таким образом, рассмотрение любых аспектов проблемы системного управления состоянием автомобильных дорог представляется актуальным и своевременным. Определенные проблемы, связанные с системным управлением состоянием дорог, имеется уже на стадии принятия основных управленческих решений.

Как 30 или 50 лет назад в нашей работе господствует ситуативный подход, или управление по обстоятельствам. Определяющим принципом этого подхода является адекватность управленческого решения относительно конкретной ситуации. Адекватным в данной ситуации полагается решение, наилучшее с точки зрения изменения ситуации, непосредственно после оказания на нее соответствующего управленческого воздействия. Стремление отреагировать на каждый новый поворот или разворот (изменение видения) ситуации адекватным образом приводит к тому, что мы вынуждены принимать все новые и новые решения, а со временем может оказаться, что они идут вразрез с прежними. Мы фактически перестаем управлять событиями. Получается, что все сводится к принципу: ремонтировать там, где разваливается.

Альтернативой ситуативному подходу является системный подход. Системный подход – чрезвычайно мощный инструмент, применение которого позволяет значительно повысить эффективность любой деятельности даже в рамках имеющихся ресурсов. К использованию системного подхода при принятии решений проявляется все более широкий интерес со стороны специалистов по управлению и хозяйственных руководителей. Его все чаще называют новым типом управленческого мышления. И в настоящее время практически в любой научной работе по экономическим, управленческим проблемам содержатся ссылки на использование системного подхода.

Рассмотрим основные принципы системного подхода при применении его к назначению ремонтных мероприятий на автомобильных дорогах.

Уяснить в чем заключается задача, значит существенно продвинуться в исследованиях. И наоборот – неправильно понять задачу – значит, направить исследование по ложному пути. Этот этап непосредственно связан с фундаментальным философским понятием цели, т.е. мысленным предвосхищением результата. Сформулировать цель значительно труднее, чем следовать принятой цели.

На первый взгляд понятие цели чрезвычайно простое. Однако такая кажущаяся простота вопроса привела к тому, что мы вообще перестали размышлять о целях, перестали их перед собой ставить, а, следовательно, перестали им следовать в жизни. Тогда как логической основой изучения любых систем является точное определение целей системы, то есть смысла ее существования.

В терминологии системного анализа под целью понимают желаемое состояние системы или результаты ее деятельности, достижимые в пределах некоторого интервала времени. Во имя осуществления целей создаются и развиваются сами системы.

При определении цели первое, что необходимо учесть, это то, что основная цель системы определяется надсистемой, то есть более крупным образованием, в которую наша система входит как элемент. Очевидно, что в случае автомобильных дорог такой надсистемой является транспортный комплекс. Однако положение осложняется тем, что цели и задачи надсистемы могут быть неизвестны, или известны не полностью. В этом

случае цель можно сформулировать, оставаясь на уровне системы. Для этого необходимо принять во внимание, что цели можно классифицировать по различным признакам: уровню стабильности, содержанию, функциональному уровню, уровню управления, степени открытости и др. Основным является признак уровня стабильности. Это значит, что какие бы цели не стояли перед нами, основополагающей является цель, характеризующаяся уровнем стабильности. Может совсем ни быть никаких других целей, кроме одной – цель стабилизации системы или цель развития системы.

Что означает цель стабилизации применительно к существующим дорогам? Стабилизация предусматривает удержание системы в существующем состоянии или в определенных пределах в условиях возмущающих внешних воздействий. Важно четко понимать, что именно понимается под состоянием, поскольку неправильный выбор критериев приведет к неоправданно завышенному расходу бюджетных средств.

Обычно, когда говорят о состоянии дорог, выделяют показатели технического и эксплуатационного уровня [3]. Показатели технического уровня или не изменяются с течением времени, или изменяются очень медленно, а проведение капитальных и текущих ремонтов практически не оказывает на них влияния. По этой причине они не подходят в качестве критерия при постановке цели.

Эксплуатационные параметры изменяются в процессе эксплуатации дороги. Проведение ремонтных мероприятий оказывает существенное влияние на их значение. Чаще всего к показателям эксплуатационного уровня относят: ровность покрытия, дефектность, сцепные качества (коэффициент сцепления и шероховатость покрытия), прочность дорожной одежды. Каждый из этих критериев в отдельности является важным, и это может привести к тому, что появится желание использовать их все в качестве показателей, характеризующих достижение цели. Такой подход будет ошибочным, поскольку не учитывает скорость изменения показателей состояния. По нашему мнению, для характеристики цели следует использовать только те показатели, скорость изменения которых наибольшая. К ним относятся ровность покрытия, выраженную по шкале IRI, и его дефектность. Можно использовать только один из показателей, или оба, на-

пример объединенные в единый показатель с применением принципов нечеткой логики [4].

Целью является не каждое намерение или пожелание. Настоящей цели свойственно пять отличительных признаков.

1. Точность или конкретность – цель должна быть сформулированной таким образом, чтобы быть четкой, отчетливой и точной для того, чтобы избежать неправильной оценки

2. Цель должна иметь численное выражение для того, чтобы можно было судить о том, достигнута она или нет. Такие цели, в которых нет шкалы измерений, следует оценивать по длительности процесса.

3. Цель должна быть такой, чтобы было возможным в соответствии с имеющимися ресурсами достичь ее в пределах выделенного времени.

4. Реалистичность цели определяется равновесием между безопасностью и риском. Этот показатель отражает физические возможности достижения цели.

5. Цель должна учитывать имеющийся уровень развития, и быть ориентирована на определенное его превышение.

Второй принцип системного подхода, который необходимо учитывать при планировании ремонта дорог состоит в том, что для оценки любого решения следует определить все существенные взаимосвязи и установить его влияние с учетом этих взаимосвязей на поведение всей системы, а не только ее части. Подчеркнем, что здесь речь идет о существенных связях, а не о связях вообще.

Иначе говоря, при рассмотрении того или иного частного вопроса требуется оценить, как то или иное его решение может сказаться на системе в целом, разумеется, не усложняя исследование изучением второстепенных связей.

Это означает, что при планировании ремонтов автомобильных дорог необходимо анализировать, как с точки зрения достижения цели повлияют те или иные ремонтные мероприятия на состояние сети дорог в целом в течение некоторого промежутка времени, называемого периодом анализа. Такие расчеты возможны только с использованием моделей прогнозирования и вычислительной техники.

К сожалению, на практике преобладает то, что называется принципом локального оптимума. При таком подходе главным

критерием при назначении ремонтных мероприятий становится состояние дорог в данный момент времени, например, выявленное в результате выполненного осмотра. Работая по такому принципу можно улучшить состояние отдельной дороги или даже небольшой сети дорог, однако улучшить состояние всей сети в целом практически невозможно.

Третий принцип системного подхода – обратная связь. Обратная связь означает соединение между выходом и входом системы, осуществляемое либо непосредственно, либо через другие элементы системы.

С помощью обратной связи информация от объекта управления передается в орган управления. Здесь эта информация сравнивается с данными о содержании и объеме работы (например, с планом). В случае возникновения рассогласования между фактическим и плановым состоянием работы принимаются меры по его устранению.

Нарушение обратных связей в социально-экономических системах по различным причинам ведет к тяжелым последствиям. Отдельные локальные системы могут вообще утратить способность к эволюции.

В том случае, если владелец дорог желает добиться улучшения состояния своей сети необходимо постоянно анализировать параметры дорог после проведения ремонтов и своевременно корректировать в случае необходимости планы своих работ для более полного достижения цели. Своевременно принятые меры в этом случае позволят не допустить дальнейшего ухудшения ситуации с состоянием дорог.

Использование только этих основных принципов при назначении ремонтных мероприятий для сети дорог позволит преодолеть негативные тенденции ухудшения их состояния и обеспечить переход к удержанию их в стабильном состоянии или даже к развитию.

### **Литература**

1. Робинсон, Р. Управление ремонтом и содержанием автомобильных дорог. Концепции и системы / Р. Робинсон, У. Даниэльсон, М. Снэйт; Пер. с англ. под ред. В. В. Сильянова. – М.: Информавтодор, 2003. – 383 с.



2. Finn F. Pavement Management Systems – Past, Present, and Future Public Roads, July/August 1998.– Vol. 62.– No. 1
3. Эксплуатация автомобильных дорог, их ремонт и содержание // Автомобильные дороги Беларуси: Энциклопедия / под общ. ред. А. В. Минина. – Минск: БелЭн, 2002. – 672 с.
4. Leonowicz, I. Nowe zasady opracowania systemów zarządzania stanem nawierzchni [Electronic resource]/ I. Leonowicz, S. Bohdanowicz // Materiały konferencyjne I Polskiego Kongresu Drogowego "Lepsze drogi - lepsze życie". – Warszawa, 2006. – Mode of access: [http://szablony.idcom.pl/pkd/szablony/szablony/719/pliki/leonowicz,\\_bogdanowicz.pdf](http://szablony.idcom.pl/pkd/szablony/szablony/719/pliki/leonowicz,_bogdanowicz.pdf). Date of access: 02.02.2007

УДК 625.87

**Теоретические основы современной диагностики  
автомобильных дорог**

Леонович И. И.

Белорусский национальный технический университет

**Введение.** Диагностика – это наука по выявлению дефектов в конструктивных элементах сооружения, оценке общего состояния и определению соответствия автомобильных дорог предъявленным к ним коммуникативным требованиям. Ее можно отнести к числу молодых. Она стала развиваться с того времени, когда особую актуальность приобрело качество дорог, а для его определения начали использоваться приборы и оборудование, позволяющие получать численные характеристики.

При диагностике автомобильной дороги определяют параметры ее конструктивных элементов, ровность покрытия, прочность и степень износа верхнего слоя дорожной одежды, шероховатость и скользкость поверхности проезжей части, светотехнические характеристики объектов дорожного интерьера, аэродинамическую и гидрогеологическую устойчивость дорожных сооружений, термоустойчивость материалов дорожной конструкции, а также производят диагностирование транспортных потоков и погоднo-климатических условий эксплуатации дорог [1].

В арсенале диагностики дорог имеется значительная приборная база, а основные положения диагностирования и критерии качества дорог вошли во многие нормативные документы. Наряду с экспериментальной диагностикой развивается и теория диагностирования. Однако она далека от совершенства. Очевидной является необходимость ее дальнейшего развития и в первую очередь, ее рамочное рассмотрение.

**1. Цели и задачи диагностики.** Диагностика по отношению к существующим автомобильным дорогам имеет конкретные цели. Они могут быть сформулированы следующим образом: [2]

1. Определение технического состояния, в котором дорога находится в рассматриваемый период времени. Этот вид работ выполняется в процессе диагностики с использованием инструментов, приборов, различного вида установок и передвижных лабораторий. В Республике Беларусь широко применяются, как отечественные, так и зарубежные контрольно-измерительные приборы. Руководство по систематическому контролю технико-эксплуатационного состояния автомобильных дорог осуществляет РУП «Белдорцентр». Непосредственный контроль осуществляют дорожно-эксплуатационные организации и РУП «Белдорцентр».

2. Прогнозирование технического состояния, в котором окажется автомобильная дорога по истечении определенного периода времени. Этот вид работ может быть назван диагностированием прогнозов. Он включает, с одной стороны, детальное экспериментальное исследование состояния дорог с помощью имеющихся технических средств, с другой – разработку прогнозов по специально построенным алгоритмам и программам. К сожалению, такие алгоритмы и программы еще не доведены до совершенства. Их усовершенствование – задача первостепенной важности, на решение которой должны быть нацелены научные коллективы республики.

3. Выявление первопричин возникновения тех или иных дефектов, их генезиса. Этот вид диагностики базируется на данных контроля качества дорожно-строительных материалов, используемых при строительстве, материалах анализа условий эксплуатации дороги, закономерностях изменения свойств материалов под воздействием природных факторов и транспортных нагрузок. Несомненную пользу при этом могут принести

банки данных, отражающие особенности эксплуатации автомобильной дороги за весь рассматриваемый период.

4. Систематический контроль в режиме мониторинга, транспортных потоков с определением интенсивности и состава движения, габаритов и весовых параметров транспортных средств, допустимых и реализуемых скоростей движения.

5. Выявление мест концентрации дорожно-транспортных происшествий с определением причин из возникновения и установлением влияния дорожной составляющей на безопасность движения транспортных потоков.

6. Сбор информации и микроклимата дорожного интерьера необходимой для создания термокарт, являющихся основой научно-обоснованного управления состоянием дорог и оптимальным использованием противогололедных материалов, играющих отрицательную роль в экологической безопасности окружающей среды.

Основными задачами учебной дисциплины являются:

1) сбор объективной информации о техническом состоянии городских улиц и дорог и всех относящихся к ним сооружений;

2) оценка технико-эксплуатационного состояния улиц и дорог с определением участков, требующих ремонта; выявление причин этого несоответствия; [3]

3) прогнозирование изменений состояния улиц и дорог, разработка рекомендаций по повышению уровня эксплуатационного состояния с определением видов и объемов работ;

4) планирование дорожных работ с учетом фактически выделяемых средств для полного или ограниченного их финансирования;

5) формирование автоматизированного банка дорожных данных, включающего в себя обработку, хранение и выдачу информации о технико-эксплуатационном состоянии сети автомобильных дорог.

2. Классификация основных направлений диагностирования автомобильных дорог.

При планировании и организации работ по диагностированию автомобильных дорог целесообразно учитывать, как диагностируемые параметры, так и возможности их использования для принятия управленческих решений. По-нашему мнению основные характеристики автомобильных дорог и всего дорож-

но-транспортного комплекса следует оценивать дифференцированно, а о качестве дорог в целом – судить на основании их всестороннего анализа. Для всестороннего анализа автомобильных дорог, как важнейшей составляющей дорожно-транспортного комплекса, целесообразно выделить следующие группы диагностических характеристик:

1). *Технические характеристики дорог*, т.е. параметры автомобильных дорог, которые были приняты на стадии их проектирования и реализованы при строительстве. К ним относятся: ширина земляного полотна, обочин и разделительной полосы; высота насыпи и глубина выемок; крутизна откосов; ширина проезжей части и число полос движения; радиусы круговых кривых в плане и профиле дороги; расчетная видимость; продольные уклоны; тип дорожной одежды и ее конструкция; система обустройства; пересечения с другими линиями транспортных коммуникаций; освещение; декоративное и сервисное обустройство и др.

2). *Технико-эксплуатационные характеристики*, т.е. показатели состояния дорог, которые не являются постоянными в процессе их эксплуатации, а изменяются или могут изменяться под влиянием погодно-климатических факторов, внешних нагрузок или в результате старения материала. К ним относятся: прочность дорожной одежды; продольная и поперечная ровность и шероховатость (скользкость) покрытия; метеорологическая видимость; обзорность дорожного интерьера; освещенность и яркость проезжей части; уровень дефектности и снегозаносимости дороги; эрозионная стабильность земляного полотна, надежность функционирования в чрезвычайных ситуациях.

3). *Коммуникативные характеристики*, т.е. показатели, с помощью которых дается оценка возможности автомобильным транспортом успешно выполнять возможные функции с минимальными издержками дорожного движения. К ним относятся: допустимая скорость движения; обеспеченность расчетной скорости; эффективная ширина проезжей части; пропускная способность; уровень загрузки дороги движением; допустимые весовые нагрузки на проезжую и мостовые конструкции; габаритные параметры транспортных средств; безопасность движения;

время сообщения; эмоциональная безопасность, энергетические и органомиические затраты и др.

4). *Транспортные характеристики*, т.е. показатели, которые определяют технические и транспортно-эксплуатационные качества транспортного потока. К ним относятся: скорость, интенсивность, состав, однородность и плотность транспортного потока, осевые нагрузки, габариты транспортных средств и др.

Каждая из этих диагностических групп имеет или должна иметь соответствующую теоретическую и экспериментальную базу, используя которую можно получить численные данные, объективно характеризующие состояние дорожного объекта и дорожной сети в целом.

### **3. Теоретическая база диагностики автомобильных дорог.**

При оценке параметров первой группы теоретической базой является метрология и стандартизация, включающая измерение линейных, угловых и высотных величин, географическое позиционирование, а также вычисления вероятности и достоверности получаемых результатов на основе теории вероятности и математической статистики.

Вторая группа диагностических параметров отличается особенно большим разнообразием, и поэтому здесь приходится учитывать различные физические, физико-химические, механические и другие закономерности [4].

При диагностике автомобильных дорог большое значение имеют: теория надежности и долговечности транспортных сооружений; теория деформирования упруго-вязко-пластических тел, к которым относится большинство дорожных конструкций, состоящих из органоминеральных композиций; теория упругости, используемая для расчета жестких и нежестких дорожных одежд; тепло-массообмен, протекающий в земляном полотне и дорожных одеждах под влиянием погодно-климатических факторов; закономерности поверхностного стока, фильтрации и гидродинамики; устойчивости грунтовых масс и коррозии материалов.

Особое место в раскрытии закономерностей транспортно-эксплуатационного состояния дорог в различные периоды и годы принадлежит теории математического моделирования и

установления функциональных и корреляционных зависимостей в системе ВАДСС.

При диагностике дорожных знаков, вертикальной и горизонтальной разметки, функциональных особенностей котопфотов и других объектов дорожного интерьера широко используются теоретические положения геометрической оптики и, прежде всего, законы фотометрии. Они позволяют определить энергию светового потока, силу света, освещенность, яркость, светимость и другие светотехнические характеристики дорожных объектов и сооружений.

Третья группа диагностических параметров отражает, с одной стороны, дорожно-транспортную составляющую (ширину проезжей части, состояние покрытия, продольные уклоны трассы, вид транспортного средства и его технические характеристики), а с другой – социально-экономическую (плотность населения, наличие и обустройство остановочных пунктов общественного транспорта, принятая система регулирования движения). Каждая из этих составляющих может быть детально раскрыта на основании социально-технических, экономических и экологических закономерностей, которые содержатся в научной и справочной литературе по проблемам транспортных коммуникаций.

Оценка параметров четвертой группы связана с тяговыми и динамическими характеристиками транспортных средств, теорией движения автомобилей, системой случайных процессов при формировании транспортных потоков, прогнозированием безопасности дорожного движения и влиянием дорожных и погодноклиматических условий на возможность реализации планов перевозочного процесса.

4. Экспериментальная база диагностики автомобильных дорог.

Как уже было отмечено выше, оценка качества автомобильных дорог базируется на ряде теоретических положений. Эти положения раскрыты в трудах ученых СоюзДорНИИ, МАДИ (ГТУ), Киевского и Харьковского университетов дорожного профиля, БНТУ, РУП «Белдорцентр» и других научных центров. Экспериментальная база в центрах диагностики формируется приборами и оборудованием, которые выпускают многие предприятия и организации в странах СНГ и дальнего зарубе-

жья. Можно считать, что в настоящее время имеется большое количество дорожных испытательных станций, достаточное количество моделей лабораторного оборудования, портативных приборов и мобильных лабораторий для оценки прочности дорожных одежд, ровности дорожного покрытия, шероховатости, сцепных качеств проезжей части, светотехнических характеристик дорожных знаков и разметок, определения основных экологических составляющих окружающей среды, оценки весовых параметров, интенсивности и состава транспортных потоков. Современный арсенал высокоточного электронного оборудования позволяет решать многие вопросы определения физических параметров дорожных поверхностей, геометрических параметров сооружений и процессы их деформирования при воздействии на них транспортных нагрузок и изменения температуры окружающей среды.

Главной проблемой на современном этапе является укомплектование дорожно-строительных и дорожно-эксплуатационных организаций всеми приборами и оборудованием необходимыми для непрерывного, в режиме мониторинга, проведения работ по диагностике автомобильных дорог, а также определения эффективности дорожно-ремонтных работ [5]. Наряду с диагностикой автомобильных дорог, безусловно, требует развития и база стендовых испытаний [6].

На основании приведенной выше информации и с учетом задач, которые вытекают из государственной программы «Автомобильные дороги Беларуси» на 2006-2015 гг. можно сделать следующие выводы.

1. Диагностика автомобильных дорог, как наука и установившаяся практика, имеет достаточно надежную теоретическую основу для своего функционирования. Параллельно с теорией развивается и экспериментальная база, что позволяет проводить масштабные работы по оценке качества автомобильных дорог, особенно республиканского значения.

2. Разработанные в РУП «Белдорцентр» методики проведения работ по диагностике автомобильных дорог, установленные нормы для основных характеристик автомобильных дорог различных категорий и принятая система контроля за их соблюдением позволили повысить культуру производства работ по содержанию, строительству, капитальному и текущему ремонту

автомобильных дорог.

3. Уровень теоретического обоснования критериев и системы проведения диагностики автомобильных дорог достаточно высокий, но его не следует считать предельно возможным.

4. Дальнейшее развитие теории диагностики автомобильных дорог целесообразно проводить по направлениям:

- создание надежных методов расчета дорожных одежд в условиях интенсивного развития автомобильного транспорта большой грузоподъемности и использование в дорожной практике новых дорожно-строительных материалов;

- разработка и использование мобильных лабораторий, позволяющих с высокой точностью экспрессными методами определять всю совокупность технико-эксплуатационных характеристик дорог;

- обоснование комплексных программ по сбору информации и исследованию состояния дорожного объекта и окружающей среды в зонах дислокации дорожных испытательных станций;

- формирование потока технической и метеорологической информации необходимой для термокартирования дорожной инфраструктуры – организационной основы реального учета текущих и прогнозных условий движения;

- увязка диагностических характеристик состояния дорог с организацией и технологией их содержания и ремонта, комплексной оценкой безопасности движения и эффективностью работы автомобильного транспорта.

5. Вопросам теории диагностирования автомобильных дорог необходимо уделять большое внимание в периодических изданиях дорожного профиля, в учебных программах по дисциплинам специальности «Автомобильные дороги», учебных и методических пособиях.

## Литература

1. Автомобильные дороги. / Я. Н. Ковалев [и др.]. – Минск, АртДизайн, 2006. – 352 с.
2. Диагностика и управление качеством автомобильных дорог / И. И. Леонович, С. В. Богданович, В. В. Голубев [и др.]; под ред. И. И. Леоновича. – Мн.: БНТУ, 2002. – 357 с.
3. Корсунский, М.Б. Оценка прочности дорог с нежесткими



одеждами / М. Б. Корсунский. – М., 1966.

4. Чихладзе, Э.Д. Расчет напряжений и деформаций в двухслойных плитах / Э. Д. Чихладзе, А. Г. Кислов // Автомобильные дороги и мосты. – Мн.: РУП «Белдорцентр», 2007. – № 1. – С. 31–34.

5. Указания по оценке эффективности дорожно-ремонтных работ / ВСН 2-80. – Минавтодор РСФСР. М., 1981. – 32 с.

6. Русин, Р.М. Стендовые испытания дорожных конструкций и материалов / Р. М. Русин // Автомобильные дороги и мосты. – Мн.: РУП «Белдорцентр», 2007. – № 1. – С. 76-78.

УДК 625.76

**Вопросы диагностики автомобильных дорог  
в трудах профессора А. П. Васильева**

**Леонович И. И.**

**Белорусский национальный технический университет**

Автомобильные дороги имеют относительно небольшую историю своего развития. Проблемы их проектирования и строительства возникли около 100 лет тому назад с появлением автомобилей, а интенсивная автомобилизация постоянно инициирует необходимость совершенствования конструкций дорог, расширения дорожной сети и повышения коммуникативных возможностей транспортных магистралей.

Проблемами дорог занимались и занимаются многие научные коллективы в различных государствах, огромная армия проектировщиков, строителей и эксплуатационников. Все большее значение придается интеграционным процессам в системе транспортных комплексов межгосударственного и внутригосударственного значения. Автомобильный транспорт в системе транспортного комплекса играет важнейшую связующую роль, как на коротких, так и значительных расстояниях.

Успешная работа автомобильного транспорта всецело зависит от состояния автомобильных дорог, их соответствия интенсивности и состава транспортных потоков, допустимых скоростей движения автомобилей. Качество автомобильных дорог включает ряд составляющих и охватывает значительный временной интервал - от проектирования и строительства до эксплуатации, которая продолжается «бесконечно». На протяжении

жизненного эксплуатационного цикла дорог дорожным организациям приходится постоянно проводить работы по их содержанию и содержанию всех относящихся к ним сооружений, своевременно выполнять работы по текущему, среднему и капитальному ремонтам, а при необходимости осуществлять реконструкцию дорог. Роль диагностики при этом имеет первостепенное значение. Теория и практика диагностирования дорог всегда привлекала внимание ученых и ИТР дорожной отрасли. Известны работы профессоров Н.Н. Иванова, А.К. Бирули, В.Ф. Бабкова, Ю.М. Яковлева, В.М. Сиденко, В.А. Семенова, Д.А. Павлюка, кандидатов наук С.С. Кизимы, И.В. Нестеровича и многих других ученых, в трудах которых заложены основы оценки качества дорог, дано обоснование критериев качества, предложены приборы и методики для их экспериментального определения. Очевидно, что на различных стадиях развития дорожной науки, фундаментализации теоретической базы, описания процессов, протекающих под влиянием погодноклиматических факторов в земляном полотне и в контакте транспортных нагрузок и дорожного покрытия, диагностика имела свои особенности, и это находило отражение в нормативных документах, в учебной и методической литературе.

В настоящей статье нам представляется необходимым акцентировать внимание на вкладе в дорожную диагностику профессора Александра Петровича Васильева, с которым у нас сложились и постоянно развиваются творческие связи при решении дидактических и научных проблем, стоящих и перед коллективом наших одноименных кафедрах «Строительство и эксплуатация дорог» МАДИ (ГТУ) и БИТУ.

А.П. Васильев родился 17 февраля 1932 года в Саратовской области, доктор технических наук (1979), профессор (1980), Заслуженный деятель науки и техники РСФСР (1982). С 1984 г. работает на кафедре «Строительство и эксплуатация дорог» МАДИ (ГТУ), и с 1986 г. является ее бессменным руководителем. Ранее, после окончания Саратовского автомобильно-дорожного института (1956), работал на объектах дорожного строительства Казахстана, где прошел путь от мастера до начальника производственного отдела крупной дорожно-строительной организации. В 1960 г. поступил и в 1964 г. успешно закончил аспирантуру в МАДИ с защитой диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук. После обучения в очной аспирантуре вернулся в г. Саратов и работал деканом дорожно-строительного факультета Саратовского автомобильно-дорожного института. Некоторое время был начальником отдела НИИ МВД СССР. В период 1969–1984 гг. работал в ГосдорНИИ в должности заместителя директора по научной работе.

Профессор А.П. Васильев является известным учебным в области дорожного строительства и эксплуатации дорог. Его исследования относятся к проблемам диагностики и управления качеством автомобильных дорог, отличаются фундаментальностью и глубиной научной аргументации. Среди множества опубликованных работ - монографии и учебники по теории эксплуатации, организации и безопасности дорожного движения.

Так, в 1989г. под редакцией А.П.Васильева вышел справочник инженера-дорожника [4], в котором дана классификация деформаций и разрушений земляного полотна, дорожных одежд и покрытия; сформулированы предложения по оценке транспортно-эксплуатационных качеств дорог; подробно рассмотрены методы определения прочности, ровности, шероховатости и сцепных качеств. Здесь впервые была обоснована система комплексной оценки состояния дорог. В качестве критерия был преодолен коэффициент обеспеченности расчетной скорости.

В 1990 вышел учебник «Эксплуатация автомобильных дорог и организация дорожного движения» [5].

В этой книге более детально рассмотрены деформации и разрушения автомобильных дорог, характеристики поверхности покрытия транспортно-эксплуатационные показатели их зависимость от состояния автомобильных дорог.

В отраслевых дорожных нормах [8, 9] определены требования к методике оценки транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог, сформулированы важнейшие положения организации диагностирования дорог и планирования дорожно-ремонтных мероприятий с разработкой комплексных производственных программ. Несомненный интерес для оценки состояния дорог и повышения транспортно-эксплуатационных качеств представляют работы проф. А.П. Васильева в области колееобразования [6, 10], поверхностных обработок [7, 11], организации и безопасности движения [1, 2] и др.

Разработанная профессором А.П. Васильевым система оценки эксплуатационного состояния дорожных конструкций получила распространение в России, Беларуси, Казахстане и других государствах. Научная общественность и практические работники дорожной отрасли многих стран знают Александра Петровича как талантливого педагога и крупного ученого. Под его руководством создана общепризнанная в нашей стране и за рубежом научная школа в области эксплуатации дорог. Им опубликовано более 300 научных работ, около 30 монографий и учебников, включая несколько томов Справочной энциклопедии дорожника. Под его руководством подготовлено и защищено около 30 кандидатских и 5 докторских диссертаций.

Профессор А.П. Васильев успешно развивает международные связи, выступая с докладами на международных конгрессах и форумах дорожников. В течение многих лет преподавал в Щецинском политехническом институте (Польша), где избран профессором, читал лекции и руководил подготовкой докторов и кандидатов наук. Одна из докторских диссертаций, выполненная польским специалистом, защищена в МАДИ в 2005 году.

Много времени и сил отдает профессор А.П. Васильев общественно-научной деятельности, являясь членом научных, технических и диссертационных советов. С момента создания Российской академии транспорта избран ее действительным членом и является руководителем секции «Автомобильные дороги аэродромы». За плодотворную научную деятельность и безупречную работу награжден рядом правительственных наград СССР и Российской Федерации.

При изучении проблем диагностики автомобильных дорог и проводя исследования в этом направлении необходимо в первую очередь обращать внимание на теоретические постулаты профессора А.П. Васильева. В краткой форме они могут быть сформулированы следующим образом: 1) максимальный учет совокупности внешних погодно-климатических и транспортных воздействий на дорогу при решении вопросов ее диагностирования, содержания и ремонта; 2) комплексность в оценке состояния дорожной конструкции; 3) тщательность методологической аргументации при проведении экспериментальных работ; 4) всесторонняя взаимоувязка теории и эксперимента при формулировании основополагающих выводов.

Аргументация этих постулатов и их практические доказательства изложены в научных трудах проф. А.П. Васильева. Важнейшие из них приведены в нижеследующем списке литературы.

#### Литература

1. Васильев, А. П. Состояние дорог и безопасность движения автомобилей в сложных погодных условиях / А. П. Васильев. – М.: Транспорт, 1976. – 224 с.
2. Васильев, А. П. Управление движением на автомобильных дорогах / А. П. Васильев, Н. И. Фримштейн. – М.: Транспорт, 1979. – 296 с.
3. Васильев, А. П. Проектирование дорог с учетом влияния климата на условия движения / А. П. Васильев. – М.: Транспорт, 1986. – 248 с.
4. Ремонт и содержание автомобильных дорог: Справочник инженера дорожника / Под ред. А. П. Васильева. – М.: Транспорт, 1989.
5. Васильев, А. П. Эксплуатация автомобильных дорог и организация дорожного движения / А. П. Васильев, В. М. Сиденко. – М.: Транспорт, 1990.
6. Ремонт автомобильных дорог / А. П. Васильев, Ю. М. Яковлев, М. С. Коганзон [и др.]. – М., 1998. – 125 с.
7. Васильев, А.П. Поверхностная обработка с синхронным распределением материалов. Опыт дорожников Франции /А.П. Васильев, П. Шамбар. – М.: ООО «Трансдорнаука», 1999. – 80 с.
8. Васильев, А. П. Пути совершенствования норм проектирования автомобильных дорог / А. П. Васильев // Строительство и эксплуатация автомобильных дорог: Задачи и решения. – М., 2001. – С. 4–19.
9. Васильев, А. П. Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог / А. П. Васильев. – (ОДН 218.0.006-2002).
10. Васильев, А. П. Расчет общей глубины колеи на жестких дорожных одеждах / А. П. Васильев, С. В. Лугов // тезисы Всеросс. отрасл. науч.-практ. конф. «Пути решения современных проблем по диагностике, паспортизации автомобильных дорог и искусственных сооружений на основе создания и использования автоматизированных банков данных», Саратов, 24-26 ноября 2003 г. / ФГУП СНПЦ Росдортех, 2003. – С. 17–18, 20–23.
11. Строительство и реконструкция автомобильных дорог: Справочная энциклопедия дорожника (СЭД). / А. П. Васильев [и др.]; под ред. А. П. Васильева. – М.: Информавтодор, 2005. – Т. I. – 646 с.
12. Ремонт и содержание автомобильных дорог: Справочная энциклопедия дорожника (СЭД)/ А. П. Васильев [и др.]; под ред. А. П. Васильева. – М.: Информавтодор, 2004. – Т. II. – 507 с.
13. Дорожная наука: Справочная энциклопедия дорожника (СЭД) / А. П. Васильев [и др.]; под ред. А. А. Надежко. – М.: ФГУП «Информавтодор», 2006. – Т. IV. – 393 с.

# Транспортные сооружения

УДК 699.82

## Определение долговечности гидроизоляционных материалов для мостов и тоннелей

Ляхевич Г. Д., Максименко А. Л.

Белорусский национальный технический университет

Гидроизоляция мостов преимущественно выполняется из битумных, битумно-полимерных материалов в тонком слое (например, грунтовка бетонной поверхности железобетонных конструкций), а также в толстом слое (нанесение на огрунтованную поверхность рулонного гидроизоляционного материала).

Длительная, свыше 8 лет, эксплуатация гидроизоляции протекает преимущественно в температурном интервале  $-12...+60^{\circ}\text{C}$ . Старение битумных, битумно-полимерных материалов за такое длительное время весьма существенна. В этой связи исследования и разработка композитного вяжущего, которое обладало бы более высокой термоокислительной стабильностью, представляет научный и практический интерес.

Устойчивость вяжущих к старению оценивается по термической стабильности при  $163^{\circ}\text{C}$ . Это позволяет с достаточной степенью вероятности воспроизвести технологические условия переделов, эксплуатацию битумно-полимерных материалов. В ГОСТ 18180-72 и СТБ 1062-97 регламентируется изменение пенетрации после прогрева битума в слое толщиной 4 мм в течение 5 часов при  $163^{\circ}\text{C}$ . Более жесткие условия испытаний предусматривает стандарт США ASTM D 2872-85, в котором предусматривается контактирование с воздухом битума толщиной 0,15 мм. Поэтому в настоящей работе изотермическое нагревание композитных вяжущих и их компонентов проводилось при толщине 4 мм (толстый слой) и 0,15 мм (тонкий слой).

Для исследований в толстом и тонком слое использовались образцы композитных вяжущих на основе нефтяного битума, суспензии наполнителя и оксидата отработанных минеральных масел.

Были определены основные показатели качества вяжущих материалов и их компонентов:

- температура перехода их из вязкопластического в жидкое состояние, которая оценивалась температурой размягчения по КиШ, °С;
  - вязкость (глубина проникания иглы при 25°С, 0,1 мм);
- а также показатели, характеризующие долговечность исследованных материалов, а именно:
- коэффициент температурного перехода из вязкопластического в жидкое состояние за время  $\tau$  в часах ( $K_{\text{КиШ}}^{\tau}$ );
  - коэффициент вязкости (пенетрация при 25°С, 0,1 мм) за время  $\tau$ , в часах ( $K_{\text{П}}^{\tau}$ );
  - динамика изменения температуры размягчения по КиШ в % за время  $\tau$  ( $D_{\text{КиШ}}^{\tau}$ );
- Динамика изменения глубины проникания иглы (пенетрация) в % за время  $\tau$  ( $D_{\text{П}}^{\tau}$ ).

Коэффициент  $K_{\text{КиШ}}^{\tau}$  определялся из выражения:

$$K_{\text{КиШ}}^{\tau} = T_{\text{КиШ}} / T_{\text{КиШ}}^{\tau}$$

Здесь  $T_{\text{КиШ}}$  – температура размягчения по КиШ в °С композитного вяжущего или их компонентов до изотермического нагрева, т.е.  $\tau$  равно нулю;  $T_{\text{КиШ}}^{\tau}$  – температура размягчения по КиШ в °С композитного вяжущего или их компонентов после изотермического нагрева за время  $\tau$  в часах.

Коэффициент  $K_{\text{П}}^{\tau}$  определялся из выражения:

$$K_{\text{П}}^{\tau} = \Pi / \Pi^{\tau}$$

здесь:  $\Pi$  – глубина проникания иглы при 25°С, 0,1 мм композитных вяжущих или их компонентов до изотермического нагрева, т.е.  $\tau$  равно нулю;  $\Pi^{\tau}$  – глубина проникания иглы при 25°С, 0,1 мм композитных вяжущих или их компонентов после изотермического нагрева за время  $\tau$  в часах.

Динамику изменения температуры размягчения по КиШ за время  $\tau$  ( $D_{\text{КиШ}}^{\tau}$ ) определяли из выражения:

$$D_{\text{КиШ}}^{\tau} = (T_{\text{КиШ}}^{\tau} - T_{\text{КиШ}}) / T_{\text{КиШ}} \times 100\%$$

Динамику изменения глубины проникания иглы при 25°С, 0,1 мм композитных вяжущих или их компонентов после изотермического нагрева за время  $\tau$  в часах ( $D_{\text{П}}^{\tau}$ , %):

$$D_{\text{П}}^{\tau} = (\Pi - \Pi_{\text{П}}) / \Pi_{\text{П}} \times 100\%$$

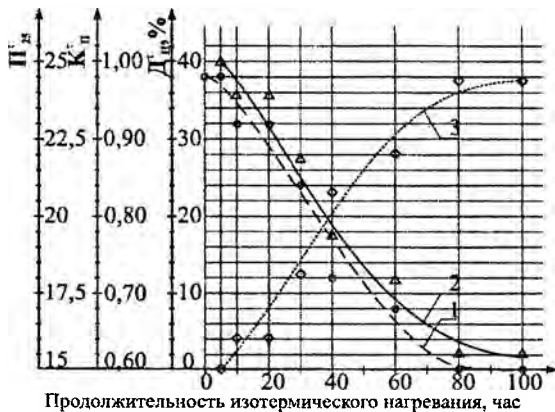


Рис. 1. Влияние изотермического нагревания на вязкость композитного материала в толстом слое

1 - вязкость композитного вяжущего при изотермическом нагревании за время  $\tau$  ( $\Pi_{д25}^{\tau}$ ); 2 - коэффициент вязкости композитного вяжущего при изотермическом нагревании за время  $\tau$  ( $K_{п}^{\tau}$ ); 3 - динамика изменения температурного перехода композитного вяжущего из вязко-пластичного состояния в жидкое при изотермическом нагревании за время  $\tau$  ( $D_{вп}^{\tau}$ , %), где  $\tau=0...100$ , часов

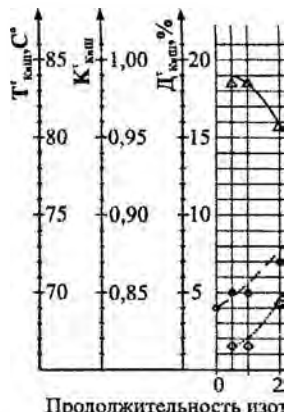


Рис. 2. Влияние изотермического нагревания на температуру размягчения композитного вяжущего из вязко-пластичного состояния в то...

1 - температура размягчения композитного вяжущего при изотермическом нагревании за время  $\tau$  ( $T_{разм}^{\tau}$ , °C); 2 - коэффициент температуры размягчения композитного вяжущего при изотермическом нагревании за время  $\tau$  ( $K_{п}^{\tau}$ ); 3 - динамика изменения температурного перехода композитного вяжущего из вязко-пластичного состояния в жидкое при изотермическом нагревании за время  $\tau$  ( $D_{вп}^{\tau}$ , %), где  $\tau=0...100$ , часов



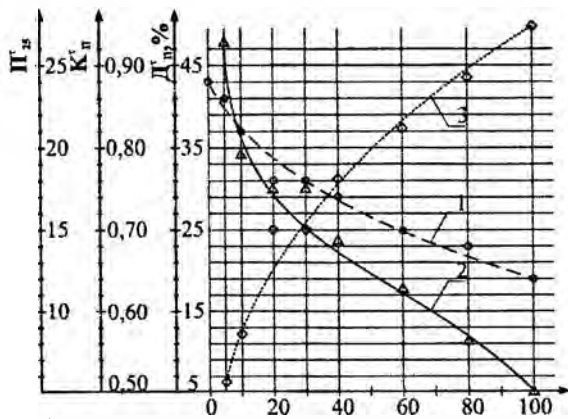


Рис.3. Влияние изотермического нагревания на вязкость композитного материала в тонком слое

1 - вязкость композитного вяжущего при изотермическом нагревании за время  $\tau$  ( $\Pi_{25}^{\tau}$ ); 2 - коэффициент вязкости композитного вяжущего при изотермическом нагревании за время  $\tau$  ( $K_{\Pi}^{\tau}$ ); 3 - динамика изменения температурного перехода композитного вяжущего из вязко-пластичного состояния в жидкое при изотермическом нагревании за время  $\tau$  ( $D_{\Pi}^{\tau}$ , %), где  $\tau=0...100$ , часов

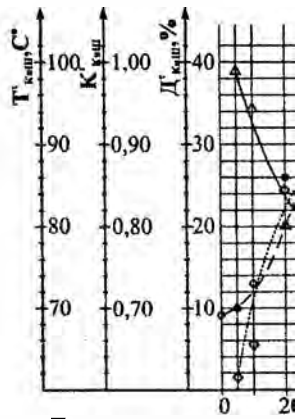


Рис. 4. Влияние изотермического композитного вяжущего из вязко-пластичного состояния в текучее

1 - температура размягчения по кольцу и шару композитного вяжущего при изотермическом нагревании за время  $\tau$  ( $T_{\text{КШ}}^{\tau}$ , °C); 2 - коэффициент текучести композитного вяжущего по кольцу и шару композитного вяжущего при изотермическом нагревании за время  $\tau$  ( $K_{\text{КШ}}^{\tau}$ ); 3 - динамика изменения температурного перехода композитного вяжущего из вязко-пластичного состояния в текучее при изотермическом нагревании за время  $\tau$  ( $D_{\text{КШ}}^{\tau}$ , %)

Результаты исследования влияния изотермического нагревания в толстом и тонком слое на долговечность полученных нами композитных вяжущих представлены на графиках (рис. 1-4).

Анализ результатов показал:

- увеличение продолжительности изотермического нагревания в толстом и тонком слоях композитных вяжущих ведет к повышению температурного перехода из вязкопластического в жидкое состояние и повышению их вязкости (снижение глубины проникания иглы при 25°C);
- сравнивая параметры термической стабильности различных композитных вяжущих, подвергнутых изотермическому нагреву, в толстом и тонком слоях, необходимо отметить общую для них закономерность: старение композитных вяжущих в толстом слое значительно меньше, чем в тонком слое.

УДК 691(075.8)

**Создание бетона повышенной водонепроницаемости  
с использованием модифицированных глинистых  
минералов**

Ляхевич Г. Д., Гречухин В. А.

Белорусский национальный технический университет

Цементный камень, является капиллярно-пористой гидрофильной системой. При соприкосновении с водой, являющейся агрессивной средой, он впитывает ее, а это отрицательно влияет на цементный камень и арматуру железобетонных конструкций.

Одним из путей улучшения характеристик цементного камня является управление процессами его структурообразования путем введения различных добавок в состав бетонной смеси.

Ранее, для повышения водонепроницаемости и водоотталкивающих свойств бетона применялись добавки, придающие стенкам пор и капилляров гидрофобные свойства.

На основании вышеизложенного нами проведены исследования влияния гидрофобизирующей добавки – глинистых минералов модифицированных маслом, а в частном случае отработанной глины масляного производства нефтеперерабатывающих заводов (ОГМП) на бетонную смесь и свойства цементного камня.

Целью исследования является изучение влияния высокодисперсной добавки отработанной глины масляного производства (ОГМП), на свойства цементного теста и прочность цементного камня.

В процессе исследования решены следующие задачи:

- изучено влияние ОГМП на свойства цементного теста и цементного камня.

Для решения данной задачи в бетонную смесь, содержащую цемент, песок, щебень, добавку и воду в качестве добавки вводили бентонитовую глину, модифицированную ароматизированной углеводородной фракцией, при следующем соотношении компонентов, масс. %: цемент 19 – 25; щебень 45 – 53; песок 11 – 17; бентонитовая глина, модифицированная ароматизированной углеводородной фракцией 2 – 8; вода – остальное.

Введение компонентов в рекомендованном соотношении повышает плотность и водонепроницаемость бетонной смеси и снижает водопоглощение.

Для приготовления бетонной смеси использовали портландцемент (без минеральных добавок) марки 500 ГОСТ 10178-85, щебень фракции 5 – 20 мм ГОСТ 8267-93, песок для строительных работ ГОСТ 8736-93, воду по ГОСТ 23732-79 и добавку. В качестве добавки использована бентонитовая глина, модифицированная ароматизированной углеводородной фракцией. Состав добавки масс. %: бентонитовая глина 90 % и углеводородная фракция 10%. Бетонную смесь готовили следующим образом. Портландцемент смешивали с бентонитовой глиной модифицированной ароматизированной углеводородной фракцией, мелким и крупным заполнителем и добавляли воду. Полученную бетонную смесь перемешивали до получения однородной смеси. Затем смесью заполняли формы 15\*15\*15 см с вибрированием на вибростоле. Образцы хранили во влажных условия в течение 28 суток.

Водонепроницаемость образцов определяли по ГОСТ 12730.5-84. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости на приборе Агама-2Р. Прочность определяли по ГОСТ 10180-90 на гидравлическом прессе.

Составы бетонной смеси и их физико-механические свойства бетона приведены в таблице 1.

Из данных таблицы видно, что при использовании составов 2 - 8 в предлагаемой бетонной смеси водонепроницаемость составляет 1,25 – 2,40 МПа, морозостойкость 85 – 145 циклов, прочность на сжатие 30,6 – 46,9 МПа.

Предлагаемая бетонная смесь не требует сложного оборудования и может быть использована на большом количестве предприятий по производству железобетонных конструкций и бетонных смесей. Данную бетонную смесь можно укладывать на основную конструкцию в качестве гидроизоляционного слоя и использовать в качестве отдельного конструктивного элемента.

Таблица 1. Составы бетонной смеси и физико-механические свойства бетона

Состав № п/п	Расход в масс. %					Прочность на сжатие, МПа	Водонепроницаемость W, МПа
	Цемент ПЦ-500	Песок	Щебень	Вода	Добавка		
1	21	18	49	11	1	43,9	0,40
2	21	17	49	11	2	46,3	1,25
3	21	14	49	11	5	46,7	1,35
4	21	12	49	11	7	46,9	2,05
5	21	11	49	11	8	42,6	2,15
6	21	10	49	11	9	31,9	2,40
7	25	11	45	10	9	33,4	2,30
8	19	11	53	14	3	30,6	1,25

На основе выполненных исследований получены бетоны с повышенной водонепроницаемостью.

Использование бентонитовой глины, модифицированной ароматизированной углеводородной фракцией в бетонной смеси обеспечит экономию средств, связанных с ремонтом гидроизоляционных покрытий искусственных сооружений и увеличит срок службы конструкций.

УДК 691(075.8)

**Теоретические аспекты и экспериментальные исследования влияния высокодисперсных минеральных наполнителей на прочность бетона**

Ляхевич Г. Д., Звонник С. А.

Белорусский национальный технический университет

Теоретическими предпосылками создания прочного и долговечного бетона является более полное использование энергии гидравлического вяжущего, создание оптимальной микроструктуры цементного камня, уменьшение пористости, повышение трещиностойкости, упрочнение контактных зон цементного камня.

Бетоны, получаемые из высокоподвижных смесей с ограниченным водосодержанием, имеют прочность на сжатие в возрасте двух суток 30-50 МПа, в возрасте 28 суток 60-150 МПа, морозостойкость больше F 600, водонепроницаемость больше W 12. Прогнозируемый срок службы такого бетона превышает 200 лет, а есть предпосылки получить бетон со сроком службы до 500 лет.

Известны композиты сверх уплотненной структуры, содержащие специальные цементы, гомогенно распределенные высокодисперсные частицы, суперпластификаторы и микроволокна, которые при В/Ц отношении равном 0,12-0,22 позволяют достичь прочности 270 МПа.

Можно прогнозировать, что в ближайшем будущем будет происходить постепенное замещение обычных традиционных бетонов многокомпонентными бетонами, содержащими высокодисперсные минеральные наполнители, например, микрокремнезем, наноматериалы. Влияние их на структуру и физико-механические характеристики цементных композиций можно объяснить:

-снижением водопотребности бетонных смесей и как результат, уменьшение общей пористости цементного камня с меньшими размерами капиллярных пор;

-связыванием гидроксида кальция кристаллогидратной структуры аморфизованным кремнеземом и повышением пуццолановой активности наполнителя при его тонком измельчении, что обеспечивает ускорению начальной стадии химического

твердения цементных структур с частицами наполнителя, служащими центрами кристаллизации;

-образованием в бетоне кластеров "вяжущее-наполнитель" за счет высокой поверхностной энергии частиц наполнителя и упорочением контактной зоны между цементным камнем и заполнителями.

Для экспериментальных исследований использованы: Красносельский портландцемент ПЦ 500-ДО с активностью 52,4 МПа, песок с модулем крупности  $M_{кр}$  равным 2,31, удовлетворяющим требованиям ГОСТ 8736, щебень ГП «Гранит» с максимальной крупностью зерен равной 20 мм, плотностью 2695 кг/м<sup>3</sup>, содержанием пластинчатых и игольчатых зерен 17,6%, марка щебня 1200, соответствует ГОСТ 8267; микрокремнезем марки МК-85 (ТУ5743-048-02495332) с истинной плотностью 2.2345 г/см<sup>3</sup>, удельной поверхностью 21,86 м<sup>2</sup>/г, а также суперпластификатор СП 07/1.

Нами изучено влияния микрокремнезема и суперпластификатора СП-07/1 на пластические свойства бетонных смесей и прочность на сжатие образцов бетона. Результаты исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1. Влияние микрокремнезема и суперпластификатора СП-07/1 на прочность бетона

Расход микрокремнезема на 1 м <sup>3</sup> , кг	Расход компонентов на 1 м <sup>3</sup> , кг						ОК, см	Прочность на сжатие, Рсж, МПа
	Ц	В	П	Щ	Д (% от Ц)	В/Ц		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	450	202	635	1150	-	0,45	4	442
8	450	112	635	1150	0,3	0,25	7	527
12	450	112	635	1150	0,3	0,25	12	623
15	450	112	635	1150	0,3	0,25	14	637
8	450	112	635	1150	0,6	0,25	8	654
12	450	112	635	1150	0,6	0,25	17	765
15	450	112	635	1150	0,6	0,25	19	781

Анализ данных результатов исследования подтверждает теоретические предпосылки создания прочного бетона. Введение в бетонную смесь высокодисперсного кремнезема МК-85 и суперпластификатора СП-07/1 обеспечило существенное улучшение пластических свойств ее, а также увеличение на 76, 7% прочность на сжатие.

УДК 624.21.012.35: 378.244

**Методологические аспекты преподавания мостовых дисциплин у студентов дорожников**

Расинская Л. Г.

Белорусский национальный технический университет

Транспортные сооружения являются неотъемлемой частью дорог. Проектирование и строительство мостов и других сооружений тесно связано с проектированием и строительством дорог.

Поэтому, инженеру-строителю, в целом приходится всегда решать комплексную задачу, требующую углубленного знания как курса дорог, так и курса транспортных сооружений.

Основная цель преподавания мостовых дисциплин состоит в формировании у студентов знаний и навыков, необходимых для проектирования и строительства транспортных сооружений в объеме, предусмотренном требованиями квалифицированных характеристик специалистов с высшим образованием специальности 1-70 03 01 «Автомобильные дороги».

Задачи изучения мостовых дисциплин состоят в освоении студентами комплекса знаний, отражающих современное состояние мостостроения и строительства транспортных сооружений на дорогах и перспективы развития данных отраслей.

Студенты должны знать виды транспортных сооружений, эксплуатируемых на дорогах, их конструкцию, способы проектирования и расчета, а также способы строительства.

Опираясь на полученные знания, студенты должны получить навыки в самостоятельном решении конкретных инженерных задач в области проектирования и строительства транспортных сооружений.

Для освоения мостовых дисциплин студенты должны иметь хорошую подготовку по следующим общетехническим и специальным курсам: сопротивление материалов, строительная механика, дорожно-строительные материалы, дорожное грунтоведение, инженерная геодезия, гидравлика, строительные конструкции, информатика, дорожно-строительные машины.

Изучение прогрессивных конструкций и промышленных способов строительства транспортных сооружений позволит студентам активно участвовать в ускорении научно-технического прогресса в мостостроении.

В таблице 1 произведен анализ учебной нагрузки по мостовым дисциплинам в учебных планах для студентов специальности Т 19.03.00 «Строительство дорог и транспортных объектов» специализации Т 19.03.01.01 «Строительство автомобильных дорог и аэродромов» по учебному плану 2001г. и специальности 1-70 03 01 «Автомобильные дороги» специализации 1-70 03 01 01 «Строительство дорог и аэродромов» по учебному плану 2005 г.

Таблица 1. Учебная нагрузка

Дисциплина	Уч. план	Сем	Всего	Сам. раб.	Ауд.	Лекц	Пр.	Лаб.	Курс. Пр.
Проектирование мостовых переходов (специальная)	2000г.	7	55	7	48	32	16	-	К.р.
	2005г.	-	-	-	-	-	-	-	-
Фундаменты транспортных сооружений (специальная)	2000г.	7	55	7	48	32	16	-	К.р.
	2005г.	7	75	27	48	32	16	-	-
Транспортные сооружения на дорогах (специализации) (специальная)	2000г.	7,8	140	34	106	76	14	16	К.п.
		7			44	28	-	16	
		8			62	48	14	-	
	2005г.	7,8	220	92	128	96	16	16	К.п.
		7			48	32	-	16	
		8			80	64	16	-	8сем.
Содержание и ремонт транспортных сооружений (специальная) (специализации)	2000г.	8	55	13	42	28	14	-	К.р.
	2005г.	9	75	27	48	32	16	-	-



К сожалению в учебном плане 2005 года отсутствует ряд курсовых работ и дисциплина «Проектирование мостовых переходов», что не улучшит подготовку будущих инженеров - строителей дорог.

УДК 624.2/8

**Оценка долговечности железобетонной плиты проезжей части мостового сооружения**

Пастушков В. Г.

Белорусский национальный технический университет

Предлагаемая методика определения напряжений с учетом диаграмм деформирования материалов ориентирована на расчет многослойной конструкции проезжей части. Она может быть использована как для проектирования, так и для проверки мостовых конструкций в условиях эксплуатации с учетом состояния, срока службы и наличия дефектов и повреждений на эксплуатационные характеристики пролетных строений.

Многослойная конструкция проезжей части состоит из различных материалов с соответствующими диаграммами деформирования.

Как показывают многочисленные испытания мостовых сооружений в стадии эксплуатации, слои мостового полотна активно участвуют в работе пролетного строения при действии временных транспортных нагрузок.

Поэтому при оценке и прогнозировании долговечности плиты проезжей части мостового сооружения необходимо определять напряженное состояние слоев гидрозащиты, работающей совместно с плитой проезжей части.

Особо важное значение приобретает установление работы слоев конструкции проезжей части в эксплуатационной стадии.

Для проезжей части мостов наиболее часто применяются асфальтобетонные покрытия. Асфальтобетонное покрытие находится во взаимодействии с изгибаемой плитой проезжей части, однако точно установить напряженно-деформированное состояние асфальтобетонного покрытия достаточно сложно в связи со следующими обстоятельствами:

1. Модуль деформации покрытия зависит от многих факторов: температуры, скорости приложения нагрузки, знака напряжений.

2. Распределение напряжений в материале покрытия имеет нелинейный характер вследствие криволинейной диаграммы «напряжение–деформация».

3. Напряженно-деформированное состояние плиты проезжей части зависит от сцепления покрытия с защитным слоем, а также от совместной работы и других слоев конструкции проезжей части.

Напряженно-деформированное состояние покрытия в эксплуатационной стадии работы зависит от свойств слоя сцепления покрытия с плитой проезжей части. В некоторых покрытиях связующий слой отсутствует и связь покрытия с плитой можно условно считать «абсолютной». Там, где слой сцепления играет роль гидроизоляции, работа покрытия подчинена свойствам этого слоя.

Если этот слой эластичный, например, битумно-мастичный, то связь покрытия с плитой при высоких температурах может нарушаться, и в этом случае покрытие и плита работают независимо. Учет температуры покрытия и роль связующего слоя являются определяющими для оценки усталостной прочности плиты покрытия проезжей части.

Для оценки работы отдельных слоев гидрозащиты для исследования было выбрано экспериментальное бездиафрагменное пролетное строение моста через Западный Буг и проведен математический эксперимент.

Число параметров для общих данных выбрано с таким расчетом, чтобы максимально характеризовать размеры и весовые параметры мостового полотна. Возможности расчетной системы позволяют задать параметры конструкции практически любого мостового полотна автодорожных мостов.

В работе выделены две группы расчетов долговечности транспортных сооружений: первая, связанная с силовыми воздействиями и возникающими с ними повреждениями, и вторая, связанная с воздействиями окружающей среды.

В качестве основной модели расчета грузоподъемности и долговечности при силовых воздействиях предложена модель, когда усилия вызываются не только постоянной нагрузкой, но и

повторно-переменной во времени кратковременной нагрузкой, и учитывается постепенное снижение прочностных и деформационных характеристик бетона с течением времени.

В предлагаемом методе оценки грузоподъемности и долговечности эксплуатируемых мостовых сооружений определение фактических напряжений в элементах пролетного строения в любой момент времени  $t$  производится на основе деформационной расчетной модели для сечений с применением трансформированных диаграмм деформирования материалов при действии постоянных и многократно-повторной нагрузок.

В общем случае функции сопротивления  $R(t)$  и усилия  $S(t)$  для конструктивных элементов описывают случайные процессы. Работоспособность элементов характеризуется случайной функцией предельного состояния

$$Z(t) = R(t) - S(t), \quad (1)$$

где значения сопротивлений и усилий в условиях эксплуатации по мере накопления повреждений изменяются во времени.

Доверительная вероятность безотказной работы в сечении случайного процесса при оценке работоспособности элементов при нормальном законе распределения случайной величины  $Z$  определяется по простой формуле

$$P\{Z > 0\} = \Phi(\beta_z), \quad (2)$$

где  $\beta_z$  – относительное отклонение величины  $Z$ .

Во всех вероятностных расчетах требуется знать в явном или скрытом виде минимально допускаемое нормативное значение показателя надежности конструкций. Для мостовых конструкций повышаются требования к обеспечению безопасности, эксплуатационной пригодности и долговечности конструкций, так как возникновение предельного состояния может стать причиной не только экономического, но и социального ущерба. Если оценивается безопасность конструкции, то отклонение  $\beta_z$  обычно называется характеристикой безопасности или гауссовским показателем надежности элементов и принимается равным в диапазоне от 3 до 4. При расчете долговечности бетонных и железобетонных слоев конструкции проезжей части  $\beta_z$  рекомендовано принять равным 1,64.

# Эксплуатация автомобильного транспорта

УДК 656

## Программное обеспечение для расчетов режимов регулирования

Левашев А. Г., Тарасюк Ю. В.

Иркутский государственный технический университет  
г. Иркутск, Россия

В мировой практике еще пятнадцать лет назад лишь ограниченное число инженеров-практиков могли использовать специальные программные средства при разработке проектов организации дорожного движения. Счастливым меньшинством были лишь крупные департаменты транспорта, ряд университетов и другие крупные компании, занимающиеся организацией дорожного движения [2]. Другим же оставалось использовать рекомендуемые в данной области методики или просто оплачивать проведение расчетов, связанных с разработкой проектов ОДД. Сейчас компьютерные технологии стали более доступными и инженеры-профессионалы почти всех точек мира используют их при проектировании.

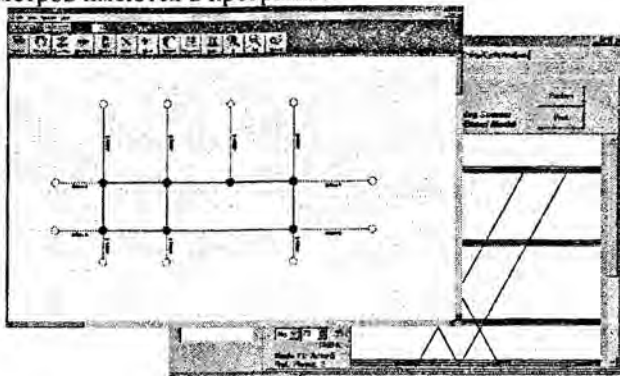
Крупные компании-разработчики программных продуктов за последние десятилетия предоставили множество компьютерных программ, позволяющих автоматизировать процесс планирования транспорта на всех его этапах. Так, например, в США Федеральная Служба Управления Дорогами (FHWA) и Федеральная Служба Управления Общественным транспортом (FTA) учредили специальный центр, обеспечивающий механизм эффективного движения программных продуктов в области ОДД от разработчиков к пользователям. Специальный компьютерный транспортный центр (*McTrans*) насчитывает около 475 программных продуктов, используемых при решении проблем в следующих сферах транспорта: управление строительством; проектирование дорог, дорожного покрытия, мостов, водоснабжения и водоотведения; обслуживание транспортных конструкций; безопасность дорожного движения и учет дорожно-транспортных происшествий; геодезия; транспортная инженерия (организация дорожного движения); общественный транспорт; планирование, развития городского транспорта.

Регулируемый перекресток является наиболее важным элементом улично-дорожной сети, поэтому сейчас в мире разработано большое множество компьютерных программ для анализа и моделирования как существующих, так и проектируемых регулируемых пересечений. Несмотря на то, что среди этого множества программ существуют такие, которые предоставляют информацию о задержках на перекрестке, длинах очередей на подходах к перекрестку, потоке насыщения и уровне обслуживания, нет ни одной программы, позволяющей предоставить сразу всю эту информацию как для существующих, так и для проектируемых условий движения. Так, например, если два пересечения расположены слишком близко друг к другу, одна компьютерная программа может быть полезной для определения задержек на пересечении, но не является эффективным средством для определения других параметров транспортного потока, таких, как длина очереди и т.д. Анализ специальной литературы показал, что, начиная с середины 50-х годов, автоматизация проектирования регулируемых пересечений была вопросом многих исследований. Несколько зарубежных компьютерных программ перечислены далее [2].

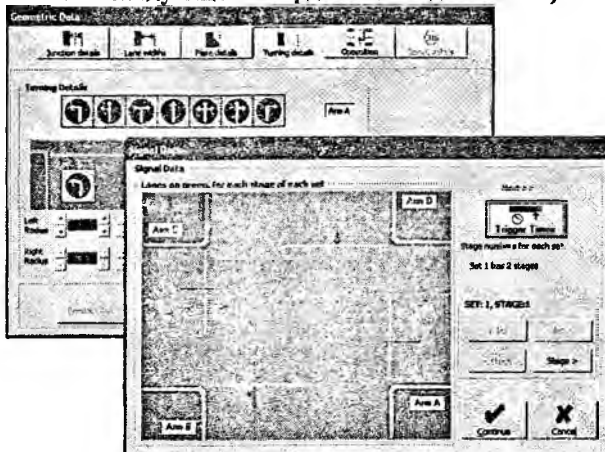
*HCS 3.0* – (программные продукты по проектированию пропускной способности дорог) – Расчет пропускной способности, задержек и уровня обслуживания на основе методики «HCM». Разработана для анализа изолированных пересечений [1]. *PASSER V* – Последняя программа из серии *PASSER*, разработанная фирмой TTI. Предназначена для определения режимов регулирования для магистралей и пересечений в нескольких уровнях (рис. 1). Программа ориентирована также на определение координации движения на нескольких пересечениях. *OSCADY* – Программа, разработанная для проектирования регулируемых пересечений с оценкой длин очередей и транспортных задержек (рис. 2). Также на основе исходных данных программа выдает информацию о вероятности дорожно-транспортных происшествий на пересечении. Следует отметить и еще целый ряд компьютерных программ, предназначенных для проектирования светофорных объектов: *NOSTOP*, *TRAF-NETSIM*, *CORSIM*, *PRESYNCHRO*, *TRANSIT-7F*, *HCMCINEMA*, *SIGCINEMA*, *SIDRA*, *SymTraffic*, *PRESYNCHRO*.

Следует отметить, что непосредственное использование зарубежных программ в российских условиях недопустимо, по-

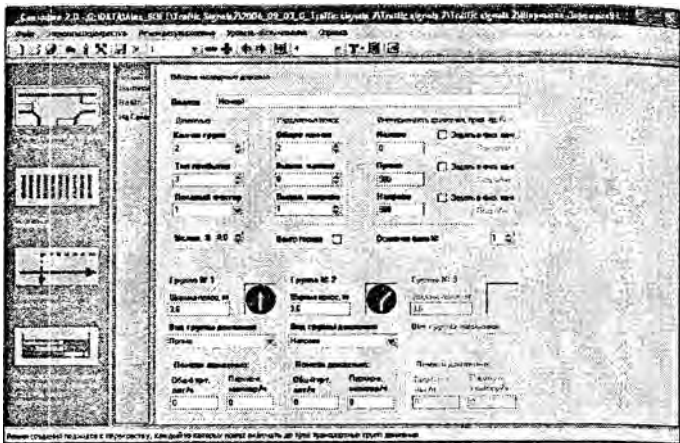
сколько эти программы включают расчетные параметры, полученные для дорожных условий тех стран, где произведены программы. Поэтому, прежде чем применять такую программу, следует определить, какие расчетные методики и параметры использованы в ней и какие средства регулирования (настройки) параметров имеются в программе.



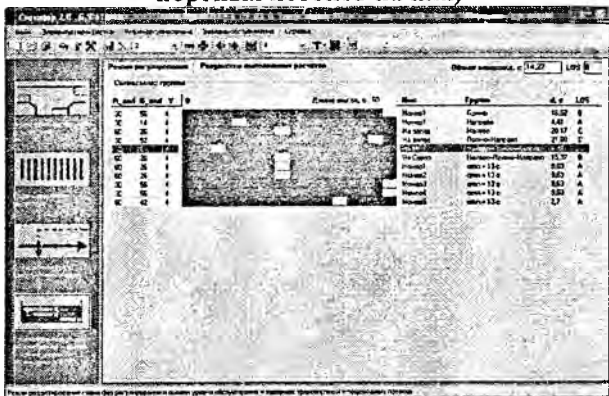
**РИС. 1 - Программа PASSER V (Создание сети перекрестков с последующей координацией движения)**



**РИС. 2 - Программа OSCADY (Формирование групп движения на подходах с разделением движению по фазам регулирования)**



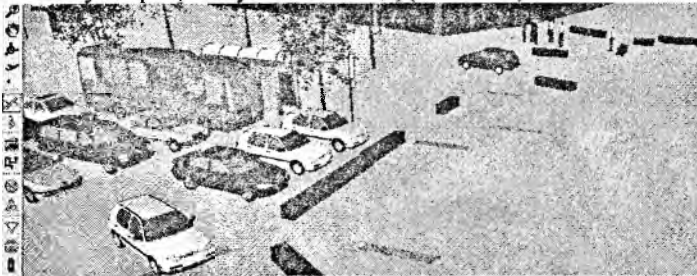
**РИС. 3 - Программа СВЕТОФОР 2.0 (ввод геометрических параметров подходов к перекрестку и параметров транспортных потоков на них)**



**РИС. 4 - Программа СВЕТОФОР 2.0 (разработка плана фаз режима регулирования и оценка его эффективности)**

Созданная в 2000 г. в Иркутске «Транспортная лаборатория ИрГТУ» (TL-ISTU) начала работу по адаптации существующих современных методик проектирования режимов регулирования, используемых в зарубежных современных программных пакетах [1, 2]. В результате специальных исследовательских работ, был установлен ряд важных параметров транспортного потока на регулируемом перекрестке, позволяющий использо-

вать современные методики в российских условиях. В результате в 2003 г. была создана программа **СВЕТОФОР**, а в 2006 г. вышло ее обновление (рис. 3, 4). При этом, в отличие от первой версии (версия 1.0) **СВЕТОФОР 2.0** обрел больше возможности с точки зрения проектирования различных элементов регулируемых пересечений. Количество подходов к перекрестку и обустройство движения пешеходов (пешеходных переходов) теперь неограниченно. Это является очень важным в условиях проектирования сложных светофорных объектов. Также новая версия позволяет более гибко задавать условия приоритета. Это необходимо для эффективного учета конфликтных поворотных потоков в зависимости от главных транспортных и пешеходных потоков. В программе **СВЕТОФОР 2.0** появилась возможность детально проектировать режим регулирования. Теперь легко можно изменить параметры светофорной сигнализации для любой группы движения, включая движения пешеходов. Оценка эффективности при этом осуществляется на основе большого числа параметров. Для анализа уровня обслуживания движения пешеходов авторы рекомендуют использовать специально разработанную программу **ПЕШЕХОД (TL-ISTU)**.



**РИС. 5 - Программа VISSIM (3-х мерный вид модели участка улично-дорожной сети)**

Перечисленные выше программы являются очень важными вспомогательными инструментами при использовании других программ, относящихся к средствам имитационного моделирования различных участников движения. Например, компьютерная программа **VISSIM (PTV - Германия)** позволяет моделировать движение любых видов транспорта и движение пешеходов, включая моделирование работы светофорных объектов (рис. 5). Предварительно рассчитанные режимы регулирования в спе-



циализированных программах (например, СВЕТОФОР) можно вводить в модели в программе VISSIM и анализировать транспортную ситуацию на участке улично-дорожной сети.

Программа VISSIM (и другие подобные программы) включают в себя множество различных процедур, для корректировки которых предусмотрены специальные параметры. По результатам исследований TL-ISTU было установлено, что применение подобных программ в российских условиях возможно лишь после адаптации методик, используемых в программах и корректировки соответствующих параметров, а также после создания методик подготовки необходимых исходных данных. В рамках данной проблемы TL-ISTU исследует параметры транспортных потоков (на регулируемых, нерегулируемых и кольцевых пересечениях), параметры пешеходных потоков, разрабатывает методы восстановления матриц корреспонденций транспортных и пассажирских потоков, изучает особенности организации парковки и ее влияния на движение транспортных потоков.

#### **Литература**

1. Highway Capacity Manual. // TRB, Washington, DC, 2000. – 1134 p.
2. Walter J. Freeman, P.E., Kien Y. Ho, P.E., Elizabeth A. McChesney, E.I.T. An Evaluation of Signalized Intersection System Analysis Techniques // [www.trafficline.com](http://www.trafficline.com) – 16 p.

УДК 656

#### **Постановка задачи моделирования системы парковок**

Куприянова А. Б., Левашев А. Г., Тарасюк Ю. В.

Иркутский государственный технический университет  
г. Иркутск, Россия

К основным мерам, с помощью которых может формироваться городская политика в области парковки, относят: снижение спроса на паркование в районах с развитой системой общественного транспорта; снижение количества мест уличного парковки, введение дифференцированной системы платы за паркование (которая может быть выгодной для одних пользователей и невыгодной для других); увеличение стоимости парковки и увеличение территории, где взима-

ется плата за паркирование; ограничение паркирования по продолжительности; создание или ликвидация внеуличных парковок; совершенствование системы контроля за нарушителями, паркирующимися в неполюженном месте, включая увеличения размера штрафов; создание системы удерживающих парковок (Park and Ride System); совершенствование системы оповещения о наличии свободных парковочных мест с использованием радио или других информационных систем.

Одним из основных направлений Транспортной Лаборатории ИрГТУ (*TLISTU*), является освоение и систематизация знаний в области паркирования. Результатами работы лаборатории в данном направлении являются исследование производительности стоянок и определяющих ее параметров [1], а также исследование в области формирования тарифной политики с учетом уличных и внеуличных парковок [2]. В качестве дальнейшего развития этой темы планируются исследования влияния политики в области паркирования на подвижность населения, исследования в области формирования норм на выделения необходимого количества мест паркирования для различных видов объектов массового тяготения, а также исследования в области применения системы удерживающих стоянок.

При этом проблема использования удерживающих стоянок является одной из наиболее актуальных. Это обуславливается тем, что Иркутск, как и многие другие города, столкнулся с явлением downtown, когда значительная доля объектов массового тяготения размещена в центре города. В результате характерной особенностью центров таких городов, как Иркутск, является их перегруженность.

Одним из наиболее эффективных способов изучения области паркирования является моделирование системы парковок. Анализ специальной литературы [4] показал, что специалисты разных стран в процессе формирования спроса на поездки рассматривают парковки как жесткое ограничение (количество поездок в определенный район зависит от общего количества мест паркирования в рассматриваемом районе) и как ценовой фактор в обобщенных затратах на передвижение. Эти два положения являются основными при разработке моделей, учитывающих систему паркирования.

Одним из наиболее ярких примеров работ, в которых рассматривалось моделирование системы парковок в районе центра города, является работа авторов R. Arnott и J. Rowse [3]. В этой работе рассмотрена оптимизационная модель, где целевой функцией,  $L$ , являлись общие затраты на передвижение:

$$L(\tilde{x}, \bar{x}, P, d) = \frac{1}{\bar{x}} \left[ \int_0^{\tilde{x}} T_1(x) dx + \int_{\tilde{x}}^{\bar{x}} T_2(x, P, d) dx \right] + l + \frac{\pi r}{\mu \bar{x}}, \quad (1)$$

где  $L$  – общие затраты времени на передвижение;  $\tilde{x}$  – максимальная длина передвижения пешком;

$\bar{x}$  – максимальная длина поездки с использованием автомобиля;  $x$  – расстояние от центра, определяющее место зарождения поездки в центр;  $T_i(x)$  – ожидаемые затраты времени на передвижение от  $x$  к центру города и обратно с использованием  $i$ -го вида транспорта ( $i = 1$  – передвижение пешком;  $i = 2$  – передвижение с использованием автомобиля);  $P$  – средняя плотность размещения парковочных мест на сети города;  $d$  – расстояние, с которого водитель начинает поиск парковочного места;  $l$  – время, затрачиваемое на посещение объекта тяготения, в течение которого автомобиль находится на стоянке;  $\frac{\pi r}{\mu \bar{x}}$  – параметр,

учитывающий возникновение потребности в поездках в центр города, исходя из заданной авторами планировочной структуры города и плотности ГТС.

R. Arnott и J. Rowse в своей модели рассмотрели два конкурирующих способа передвижения: передвижение пешком,  $T_1(x)$ , и передвижение с использованием автомобиля,  $T_2(x)$ . Одним из основных ограничений при этом было следующее условие:  $T(x) = T_1(x)$  при  $x \leq \tilde{x}$  и  $T(x) = T_2(x)$  для  $x \in (\tilde{x}, \bar{x})$ . Ожидаемые затраты времени на передвижение пешком и с использованием автомобиля были выражены формулами (2) и (3) соответственно:

$$T_1 = \frac{2x}{w}, \quad (2)$$

$$T_2(x, P, d) = \frac{2x}{v} + \frac{4e^{-Pd}}{wP} + 2 \left( d - \frac{1}{P} \right) \left( \frac{1}{w} - \frac{1}{v} \right), \quad (3)$$

где  $v$  – скорость движения автомобилей;  $w$  – скорость движения пешеходов.

Используя данную модель, авторы получили различные оптимальные состояния системы паркингования с учетом разделения передвижений по их способу. В качестве оптимальных состояний рассматривались следующие: минимум затрат населения на передвижение для ограниченного числа мест паркингования и при отсутствии платы за паркингование (разделение передвижений по их способу); минимум затрат населения на передвижение при условии максимального удовлетворения спроса на поездки в центр (выбор оптимального количества мест паркингования); минимум затрат населения на передвижение для ограниченного числа мест паркингования при взимании определенной платы за паркингование (разделение передвижений по их способу с учетом влияния стоимости паркингования на выбор способа передвижения).

Авторы настоящей статьи считают, что возможны и другие способы формализованного описания функционирования транспорта, обслуживающего центральную часть города. В частности представляет практический и научный интерес обслуживание центра маршрутным ГПТ при наличии удерживающих парковок. При этом *под системой удерживающих парковок понимается* группа внеуличных парковок размещенных по границе территории центра города, въезд в которую на индивидуальном транспорте разрешен только специальным группам пользователей (например, служебные автомобили) или за высокую плату и находящихся вблизи остановок общественного транспорта.

В качестве конкурирующих способов передвижения предлагается применять передвижение с использованием общественного транспорта и передвижение с использованием индивидуального транспорта и системы удерживающих парковок.

Задачей моделирования такой транспортной системы является минимизация общих затрат населения на передвижения в центр города при различных ограничениях. При этом ожидаемые затраты времени на передвижения с использованием общественного и индивидуального транспорта могут быть определены по формулам (4) и (5) соответственно:

$$T_1 = t_{\text{идо.1}} + t_{\text{иди.}} + t_{\text{идо.2}}, \quad (4)$$

$$T_2 = t_{\text{идо.1}} + t_{\text{одо.}} + t_{\text{иде.}} + t_{\text{иди.}} + t_{\text{идо.2}}, \quad (5)$$

где  $T_i$  – предполагаемые затраты времени на передвижение  $i$ -ым способом ( $i = 1$  – на общественном транспорте;  $i = 2$  – с использованием индивидуального транспорта и системы удерживающих парковок);  $t_{\text{пеш.1}}$ ,  $t_{\text{пеш.2}}$ ,  $t_{\text{общ.}}$ ,  $t_{\text{авт.}}$ ,  $t_{\text{парк}}$  – соответственно время на подход к остановочному пункту или гаражу, время на подход к пункту назначения, время поездки на общественном транспорте (от остановочного пункта отправления или от остановочного пункта в районе удерживающей парковки), время поездки на индивидуальном транспорте от гаража до удерживающей парковки и время, связанное с затратами на парковку и подход к остановочному пункту в зоне удерживающей парковки и ожидание общественного транспорта.

Следует отметить, что время на подход к остановочному пункту или к пункту назначения зависит от плотности УДС, а спрос на передвижения зависит от таких факторов, как структура населения, планировочная структура города, законы распределения поездок населения по длине (по времени) поездки (функции тяготения) с разделением по видам транспорта и уровня автомобилизации. Перечисленные характеристики, а также уровень стоимости проезда и уровень платы за парковку могут быть использованы в качестве исходных данных, устанавливая ограничения на которые можно получить такие оптимальные состояния ГТС (для существующего или прогнозируемого уровня автомобилизации), как: минимум затрат населения с разделением поездок по способам передвижения при ограниченном уровне стоимости за проезд и тарифах на парковку; минимум затрат населения и максимальная прибыль от общественного транспорта и системы парковок при ограниченном количестве парковочных мест и др.

Разработка подходов к моделированию системы удерживающих парковок проводится в рамках диссертационного исследования. Ожидаемым результатом данной работы является инструмент, который может быть использован при формировании и реализации транспортной политики города.

По мнению авторов, исследование подходов к моделированию системы парковок является одним из основных направле-

ний в области исследования влияния парковки на подвижность населения. Развитие моделей парковок позволит не только определить количество удерживающих парковок и их емкость и удаленность от центра, но и определить, насколько будут эффективны альтернативные политики развития транспортной системы. Например, использование таких моделей позволит определить, насколько будет эффективнее удовлетворение спроса на паркование с помощью увеличения парковочных мест в центре города по сравнению с развитием системы удерживающих парковок. Затраты на передвижение с использованием индивидуального транспорта при этом будут зависеть от времени на поиск свободного парковочного места, которое в свою очередь будет определяться соотношением предложения и спроса на паркование и уровнем загрузки УДС в центре города.

#### **Литература**

1. Тарасюк, Ю. В. Повышение эффективности функционирования стоянок автомобильного транспорта: дис. ... канд. техн. наук / Ю. В. Тарасюк. – Иркутск, 2004. – 238 с.
2. Фадеев, Д. С. Разработка методов оценки и моделирование инвестиционной деятельности в парковочном комплексе крупных городов: дис. ... канд. экон. наук / Д. С. Фадеев. – Иркутск, 2005. – 152 с.
3. Arnott, R. Modeling parking / R. Arnott, J. Rowse // Journal of urban economics, 1999, 45 (1), pp. 97–124.
4. Gillen, D.W., parking policy, parking location decisions and the distribution of congestion // transportation 7, 1978, pp. 69–85.

#### **УДК 656**

#### **Расчет кривых тяготения, с использованием данных выборочного анкетирования на основе модели EVA**

Левашёв А. Г., Лагереv Р. Ю., Шаров М. И., Зедгенизов А. В.  
Иркутский государственный технический университет  
г. Иркутск, Россия

В настоящее время «Лаборатория информационных технологий на Транспорте» ИрГТУ ([www.transport.istu.edu](http://www.transport.istu.edu)) выполняет проектную работу по заказу администрации г. Иркутска. Цель проекта – прогнозирование пассажирских потоков и потоков индивидуального автомобильного транспорта. В рамках этого

проекта должны быть выполнены расчеты оптимальной структуры подвижного состава маршрутного пассажирского транспорта. Расчеты пассажиропотоков и транспортных потоков будут выполняться с использованием немецкой программы транспортного макро моделирования VISSUM (производитель программы PTV Карлсруе). В рамках расчетов перспективных пассажиропотоков специалистам лаборатории предстоит оценить межрайонную матрицу пассажирских корреспонденций. В таких расчетах используется, так называемая, функция тяготения - обобщенная оценка населением условий связи мест жительства с местами приложения труда и культурно-бытовыми центрами тяготения. Функции кривой тяготения изучаются по категориям передвижений (трудовых, культурно-бытовых) и отличаются в разных градостроительно-транспортных условиях. Наиболее детерминированные из них - функции тяготения населения относительно мест приложения труда, которые имеют наиболее важное значение в жизни общества, определяют загрузку транспортной сети и отличаются сравнительным постоянством. Их изучение является обязательным этапом подготовки исходных данных планирования транспортных систем городов.

В математических терминах подборка функции тяготения формулируется следующим образом. Функцией тяготения называют вероятность выбора населением, реализующим передвижения  $A_i$ , целью достижения центра  $j$ . Ее определяют как количество передвижений  $A_{ij}$  из зоны  $i$  в центр зоны  $j$ , отнесенных к емкости района  $A_i$  зоны  $i$  к емкости района  $j$  по прибытиям: 
$$d_{ij} = A_{ij} / (A_i A_j) \quad (1)$$

Ординаты функции тяготения  $d_{ij}(l, t)$  получают делением соответствующих ординат зависимостей  $A_{ij}(l, t)$  и  $A_i(l, t)$ . Функция тяготения имеет падающий характер и отражает тенденцию населения расселяться вблизи интересующих его центров тяготения. Транспортно-социологические обследования расселения деятельного населения относительно объектов приложения труда и культурно-бытового тяготения для построения зависимостей  $A_{ij}(l, t)$  и  $A_i(l, t)$  проводят анкетными методами по местам работы и жительства и списочным методом (выбор-

кой по местам работы бесфамильного списка адресов мест жительства трудящихся). Анкетные методы используют и для обследований передвижений населения по различным целям. Соответствующий им вид функции тяготения  $d_{ij}(l, t)$  находят, используя уравнение (1). Функция тяготения отражает факт распределения передвижений по затратам времени. В настоящее время ее рассматривают преимущественно как функцию затрат времени на передвижения по трудовым связям. В результате обследований расселения и передвижений населения в плане города с обработкой по формуле (1) получен ряд функций тяготения, аппроксимированных гиперболическими, экспоненциальными и другими зависимостями. В частности большинство градостроительных инженеров рассматривают гиперболическую функцию тяготения:  $d_{ij} = a/t_{ij}^k$ , (2)

где  $a$  и  $k$  эмпирические коэффициенты, устанавливаемые обследованиями («калибровкой» модели в натуральных обследованиях расселения и передвижений населения по различным целям);  $t_{ij}$  - затраты времени на передвижения к рассматриваемому центру тяготения  $j$ .

Модификациями модели (2) являются гиперболическая функция тяготения [1]:  $d_{ij} = 1/t_{ij}$ , (3)

квадратичная гипербола [1]:  $d_{ij} = 1/t_{ij}^2$ . (4)

Ряд авторов предлагают двух- и трехпараметрические экспоненциальные модели функции тяготения [1]:

показательная функция  $d_{ij} = a \cdot \exp(-bt_{ij})$ , (5)

показательная функция  $d_{ij} = a \cdot \exp(bt_{ij}^c)$ . (6)

В немецкой практике проектирования транспортных систем городов для описания тяготения населения используется функция EVA [2]:

$$d_{ij} = \frac{1}{(1+t_{ij}) \varphi(t_{ij})}, \quad \varphi(t_{ij}) = \frac{E}{1 + e^{(F-G \cdot t_{ij})}}, \quad (7)$$

где  $a, b, c, E, F, G$  – калибровочные коэффициенты.

Следует заметить, что функции тяготения по культурно-бытовым целям могут существенно отличаться от функций тя-



готения по трудовым. Как правило, они круче для повседневных культурно-бытовых передвижений, реализующихся в микрорайонах жительства, положе для культурно-бытовых передвижений периодического типа (внутрирайонных) и приближаются к равновероятному тяготению  $d_{ij} = 1$  для культурно-бытовых передвижений эпизодического характера (городских). Разнообразие функций тяготения определяется, прежде всего, различием характеристик обследованных ими городов, а также различием функции тяготения населения к разным центрам: местам работы, отдыха, культурно-просветительным учреждениям, зрелищным предприятиям. Анкетное обследование транспортной подвижности населения было выполнено в июне-октябре 2006 г. (табл. 1).

Таблица 1

Статистики исходных данных для оценки кривой тяготения

Число респондентов, чел.	4588
Максимальные затраты времени, мин.	230
Минимальные затраты времени, мин.	0
Среднее значение затрат, мин	39.06
Медиана выборки	37
Размах выборки	230
Стандартное отклонение	19.54
Дисперсия	381.90

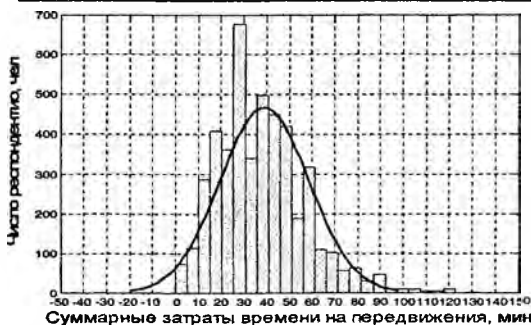
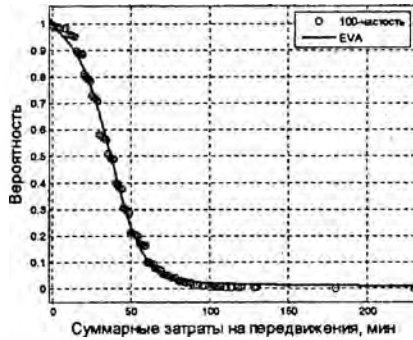
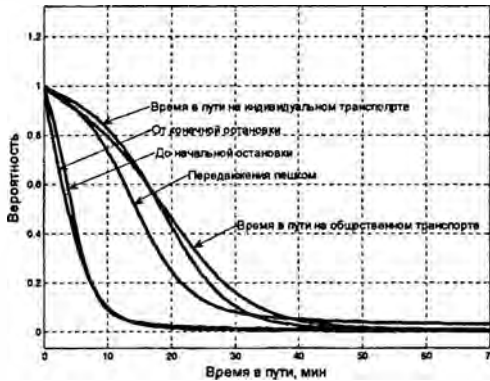


Рис. 1. Гистограмма распределения суммарных затрат времени на передвижения в Иркутске (нормальное распределение)



**Рис. 2.** Кривая тяготения, построенная с использованием данных выборочного анкетирования на основе модели EVA

В числе параметров, выявляемых в процессе анкетирования были, составляющие передвижений: продолжительность пешеходных подходов, продолжительность ожидания на остановочных пунктах, продолжительность маршрутных поездок, продолжительность пересадок, продолжительность поездок на индивидуальном транспорте и т.д. (рис. 1).



**Рис. 3.** Итоговые кривые тяготения, построенные с использованием данных выборочного анкетирования на основе модели EVA

Авторами была выполнена аппроксимация кривых тяготения с использованием всех представленных выше функций (формулы 3–7). Коэффициент корреляции для всех рассмотренных функций  $R \geq 0.90$ , что подтверждает определяющее влияние на формирование трудового расселения фактора времени сообще-

ния между местами жительства и приложения труда. Наименьшие отклонения и наибольшие коэффициенты корреляции получены для функции EVA (рис. 2).

Сгруппированные результаты анкетных данных в виде кривой распределения частот представлены на рис. 2. В дальнейших расчетах корреспонденций с применением динамической имитационной модели расселения VISSUM нами будут использованы параметры функции EVA, подобранные по данным г. Иркутска (рис.3).

Выполненный по материалам анкетных данных поиск функций тяготения показал, что наилучшей аппроксимацией обладает функция EVA:

1. Коэффициент множественной детерминации для рассмотренной функции  $R^2 \geq 0.98$ , что подтверждает высокое качество аппроксимации данных анкетных обследований.

2. Функции тяготения для разных видов передвижений существенно отличаются (в результате калибровки получают различные величины параметров распределения):

Тип передвижения	E	F	G
Все виды передвижений	1.078	3.855	0.0707
Индивидуальный транспорт	0.915	4.330	0.1199
Общественный транспорт	0.8618	4.517	0.09017

Результаты данного исследования еще подтверждают невозможность применения одной «универсальной» кривой для городов, отличающихся планировочно-градостроительной структурой, социальным и профессиональным составом населения, характеристиками транспортной системы. Однако усреднение функции тяготения на стадии проектирования генерального плана неизбежно вследствие неполноты необходимой информации для ее точного представления.

#### Литература

1. Ефремов, И. С. Теория городских пассажирских перевозок / И. С. Ефремов, В. М. Кобозев, В. А. Юдин. – М.: Высш. школа, 1980. – 535 с.
2. Schnabel, W. Grundlagen der Stra.enverkehrstechnik und der Verkehrsplanung / W. Schnabel, D. Lohse, L. Latzsch / Band 2: Verkehrsplanung 2. neu bearbeitete Auflage.: Berlin. –1997.–432 p.
3. Лившиц, В. В. Математическое модель случайно-детерминированного выбора и ее применение для расчета труп-

довых корреспонденций / В. В. Лившиц // Автоматизация процессов градостроительного проектирования: Сборник. – М.: ЦНИИП градостроительства, 1973. – С. 39-57.

4. Лившиц, В. Н. Калибровка и проверка гравитационной статистической модели трудовых корреспонденций / В. Н. Лившиц, А. И. Стрельников // Сборник. – М.: ЦНИИП градостроительства, 1983. – С. 79–101.

УДК 656.13

### **Оценка влияния продолжительности простоя МГПТ на остановочных пунктах на его пропускную способность**

Зедгенизов А. В., Шаров М. И., Куприянова А. Б.

Иркутский государственный технический университет

За последние годы в нашей стране произошли серьезные изменения в области транспорта. В целом, значительно выросла плотность транспортных потоков. В частности, увеличивается число индивидуального и ведомственного транспорта, перевозка людей общественным транспортом все чаще осуществляется коммерческими предприятиями, для которых нет единой согласованной системы диспетчеризации. В этой связи используется самый разнообразный подвижной состав, причем наибольшее предпочтение в г. Иркутске до 70% от всего подвижного состава это особо малый класс (микроавтобусы 11-14 мест). Поскольку провозные способности последних меньше не пропорционально габаритным размерам и вместимости подвижного состава предназначенного для перевозки пассажиров в городских условиях т.е там, где существуют постоянные и достаточные пассажиропотоки, то чтобы сохранить или хоть как-то поддерживать провозную способность на маршруты стали выпускать достаточно большое количество микроавтобусов, в этой связи резко выросла интенсивность МГПТ значения которой могут достигать 250 ед/ч в одном направлении. В результате возникли проблемы организации дорожного движения (ОДД) на остановочных пунктах, которые не отвечают сложившимся нагрузкам. Во многих случаях остановочные пункты сами становятся источниками помех основному движению.

Решение рассматриваемой проблемы требует: рассредоточения маршрутов по большему количеству улиц (т.е. снижения маршрутного коэффициента); увеличение пропускной способности ОП МПТ.

Первое из перечисленных мероприятий связано с увеличением протяженностью маршрутной сети и сети магистральных улиц и реализуется в достаточно большие сроки. Второе из мероприятий, хотя и приводит к ограниченному эффекту (т.е. остановочные карманы большой пропускной способности могут устраиваться далеко не на всех участках УДС), но может быть реализовано в сжатые сроки и дать быстрый эффект.

Выполнение проектов ОДД, связанных с движением маршрутного пассажирского транспорта требует выполнения расчетов, обосновывающих размеры и пропускную способность остановочных пунктов. Поэтому объектом наших исследований стали методы расчета пропускной способности остановочных пунктов и проектирования их планировочных решений (линейные размеры, радиусы кривых и отгонки уширений в плане).

Анализ специальной литературы позволяет сделать ряд важных выводов направленных на расчеты, обосновывающие пропускную способность остановочных пунктов, которые должны учитывать: Вероятность того, что в момент прибытия транспортного средства к остановочному пункту все места будут заняты, т.е. вероятность того, что среднее время стоянки превысит среднюю величину. Вариацию времени стоянки на остановочном пункте с целью посадки-высадки пассажиров. Интенсивность на крайней правой полосе, которая влияет на время выезда из остановочного пункта (вливание в поток). Влияние регулируемых пересечений, находящихся в непосредственной близости от остановочного пункта, т.е. влияние на интервалы следования между транспортными средствами. Вот основные направления исследований, которые могут отражать реальную пропускную способность остановочного пункта, а, следовательно, и его геометрическое формирование. Из всех рассмотренных моделей наибольший интерес представляет методика руководства НСМ:

$$B_{bb} = \frac{3600 \cdot \left(\frac{g}{C}\right)}{t_c + \left(\frac{g}{C}\right) \cdot t_d + z_a \cdot c_v \cdot t_d}, \quad (1)$$

где  $B_{bb}$  – пропускная способность одного остановочного места, ед./ч;  $g$  – длительность горения зеленого сигнала для движения, с;  $C$  – длительность цикла регулирования, с;  $t_c$  – время освобождения остановочного пункта, с;  $t_d$  – среднее время пребывания на остановочном пункте, с;  $z_a$  – коэффициент вероятности сбоя (отказа в заявке на обслуживание);  $c_v$  – коэффициент вариации времени пребывания на остановочном пункте.

В соответствии с формулой (1) пропускная способность всего остановочного пункта определяется как:

$$B_S = N_{eb} \cdot B_{bb} = N_{eb} \cdot \frac{3600 \cdot \left(\frac{g}{C}\right)}{t_c + \left(\frac{g}{C}\right) \cdot t_d + z_a \cdot c_v \cdot t_d}, \quad (2)$$

где  $B_S$  – пропускная способность остановочного пункта, ед./ч;  $N_{eb}$  – количество мест для остановки транспорта.

Поскольку, не все автобусы имеют одинаковую величину времени простоя, в связи с посадкой-высадкой пассажиров на остановочном пункте в зависимости от величины спроса пассажиров между маршрутами, типом подвижного состава и прочими факторами, то влияние вариации времени простоя автобуса на остановочном пункте отражается:

- коэффициентом вариации времени стоянки на остановочном пункте  $C_v$ , который может быть найден как отношение стандартного отклонения времени стоянки к среднему значению:

$$C_v = \frac{S}{t_d}, \quad (3)$$

где:  $S$  – стандартное отклонение времени простоя

- Коэффициент нормы отказа  $z_a$ , который направлен на обеспечение запаса надежности при расчете пропускной способности остановочного пункта. Заштрихованная область на рисунке 1 показывает возможность того, что в некоторых случаях время простоя может превышать среднее значение.

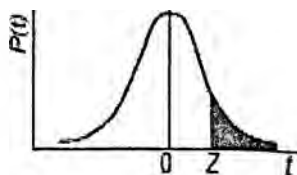


Рис. 1 - Стандартное нормальное распределение

В случае, если  $C_v$  равен нулю, то все рассмотренные случаи будут иметь одинаковые значения. В случае, если  $C_v$  равен единице, то означает, что примерно каждый третий автобус будет иметь время простоя в два раза больше чем среднее значение. Основываясь на обследованиях проведенных в США, коэффициент вариации времени простоя принимает значения от 0,4 до 0,8, при отсутствии натурных обследований рекомендуется значение 0,6.

Наиболее узкое распределение с высоким пиком показывает меньшую вариацию (разброс) значений, в то время как более широкое распределение с низким пиком показывает больший разброс. Коэффициент нормы отказа можно определить по формуле:

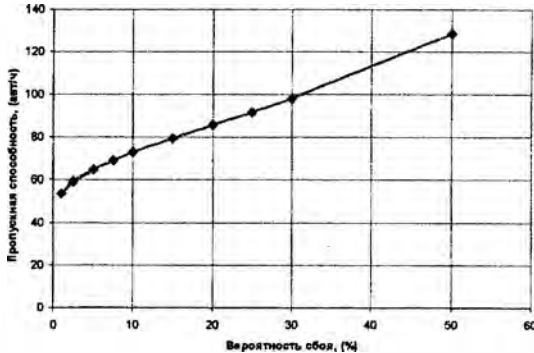
$$Z = \frac{t_{om}}{S} = \frac{t_i - t_d}{S}, \quad (4)$$

где:  $t_i$  - случайная величина времени простоя, с;  $t_{om}$  - разница между  $i$ -ым случаем и средним значением.

Следовательно:  $t_{om} = S \cdot Z = c_v \cdot t_d \cdot Z$ . (5)

Таблица 1

Вероятностью отказа, %	Коэффициент $Z_a$	Вероятностью отказа, %	Коэффициент $Z_a$
1,0	2,330	15	1,040
2,5	1,960	20	0,840
5,0	1,645	25	0,675
7,5	1,440	30	0,525
10	1,280	50	0,000
1,0	2,330	15	1,040



**Рисунок 2 – Зависимость пропускной способности от вероятности сбоя**

В таблице 1 приведены значения коэффициента  $Z_a$ , в соответствии с вероятностью отказа (сбоя) за рассматриваемый период.

По источнику [1] в центральных зонах городов (бизнес центры, центры массового тяготения) вероятность отказа рекомендована от 7,5 до 15%. Данная величина отражает компромисс между скоростями сообщения и достижением высоких пропускных способностей остановочных пунктов требуемых в центральных зонах городов. В загородных зонах городов вероятность отказа рекомендована 2,5%.

Основываясь на наших исследованиях, нам удалось получить следующие характеристики: Коэффициент вариации 0,73; Среднее время простоя 23 с; Стандартное отклонение времени простоя 16,9; Количество отказов 13 %, что соответствует  $Z_a$  равным 1,12.

### Литература

1. Highway Capacity Manual 2000. – Transportation Research Board, National Research Council. – Washington, D.C., USA, 2000, – 1134 p.
2. Multimodal Level of Service Analysis For Urban Streets. National Cooperative Highway Research. Project 3-70, FY 2003: <http://www4.trb.org/trb/crp.nsf/All+Projects/NCHRP+3-70>.
3. The Transit Capacity and Quality of Service Manual, First Edition. [http://gulliver.trb.org/publications/tcrp/tcrp\\_webdoc\\_6-e.pdf](http://gulliver.trb.org/publications/tcrp/tcrp_webdoc_6-e.pdf).



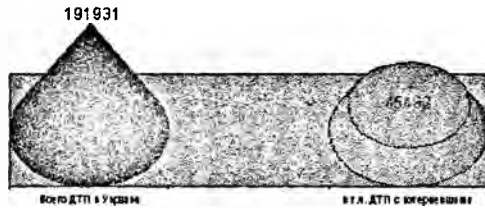
4. Transit Capacity and Quality of Service Manual. Transit Cooperative Research Program Web Document No. 6. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1999. Available: <http://www4.nationalacademies.org/trb/crp.nsf/all+projects/tcrp+a15>.
5. Закс, Л. Статистическое оценивание / Л. Закс; пер. с нем. В. Н. Варыгина; под ред. Ю. П. Адлера, В. Г. Горского. – М., «Статистика», 1976. – 598 с.
6. Лобанов, Е. М. Транспортная планировка городов / Е. М. Лобанов. – М.: Транспорт, 1990. – 240 с.
7. Организация дорожного движения в городах: Методическое пособие / под общ. ред. Ю. Д. Шелкова / НИЦ ГАИ МВД России. – М.: 1995. – 143 с.
8. Рекомендации по проектированию улиц и дорог городов и сельских поселений. – М.: ЦНИИП Градостроительства Минстроя России, 1994. – 88 с.
9. СНиП 2.07.01 – 89. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. / Госстрой СССР. – М.: ЦНТИ Госстроя СССР, 1989. – 56 с.
10. Ставничий, Ю. А. Транспортные системы городов / Ю. А. Ставничий. – М.: Стройиздат, 1990. – 224 с.

УДК 656.13

**Аварийность  
на дорогах Украины**

Бондарь Т. В., Вырожецкий В. К.  
ГосДорНИИ, г. Киев, Украина

Целью назначения и выполнения мероприятий по безопасности движения является снижение уровня аварийности и тяжести их последствий и, как результат, уменьшение народнохозяйственных потерь от ДТП как в целом по стране, так и отдельно на автомобильных дорогах.



**Рис. 1 – Аварийность в Украине за 2006 г**

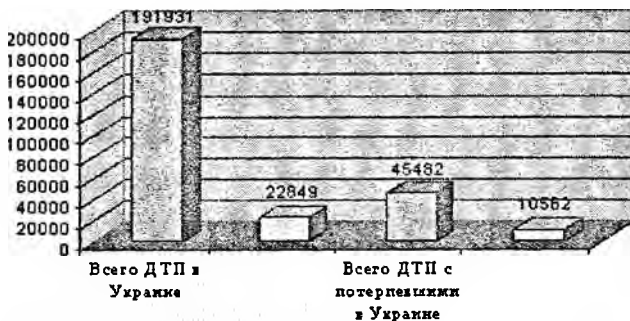
Анализ статистических данных о дорожно-транспортных происшествиях, изучение причин и установление взаимосвязей их возникновения позволит достичь поставленной цели методом целенаправленного планирования мероприятий устраняющих причины возникновения ДТП.

В 2006 году в Украине, за данными Центра безопасности дорожного движения Департамента ГАИ МВД Украины, зарегистрировано 191931 ДТП, в т.ч. с потерпевшими 45482 ДТП в которых погибли 6867 и получили ранения 55571 человек. Каждые 11,6 минуты в Украине произошло ДТП с потерпевшими. Каждые 87 минут в ДТП погиб человек. В среднем за сутки в Украине в автомобильных авариях погибли 19 и получил ранения 152 человека.

На каждые 100 ДТП с потерпевшими в 2006 году погибло 15 и получили ранения различной степени тяжести – 122 человека

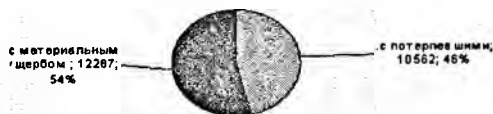
Согласно п.8 «Порядку обліку дорожно-транспортних пригод», утвержденного постановлением Кабинета Министров Украины от 30.06.05 № 538 до государственной статистической отчетности с 01.01.2006 г. включены данные и о ДТП с материальным ущербом. Потому в анализе статистических данных о ДТП с 2006 года предусмотрено «всего ДТП» и «в т.ч. с потерпевшими». Более подробному анализу подвергаются ДТП с потерпевшими, т.к. провести анализ всех ДТП без компьютерной обработки – очень трудоемкий процесс.

ДТП с потерпевшими в Украине составляют 23,7 % от их общего количества.



**Рис. 2 – Сравнительная характеристика аварийности всего и с потерпевшими в Украине**

На автомобильных дорогах общего пользования зафиксировано - 22849 ДТП, в т.ч. с потерпевшими 10562 ДТП в которых погибли 3166 и получили ранения 13962 человека



**Рис. 3 – Доля аварий с потерпевшими и с мат.ущербом на автомобильных дорогах общего пользования за 2006 год**

Как видим, в каждом втором ДТП, что произошло на автомобильной дороге, в 2006 году были жертвы. Количество дорожно-транспортных происшествий, в т.ч. и на автомобильных дорогах общего пользования, к сожалению, постоянно увеличивалось вплоть до 2006 г. В 2006 году количество ДТП с потерпевшими в Украине уменьшилось на 2,16 %, а на автомобильных дорогах общего пользования – на 22,2 %.

Таблица 1. Доля ДТП на автомобильных дорогах от общего количества в Украине за 2000 – 2006 гг

Годы	Количество ДТП		Доля ДТП на а/д	
	В Украине	В т.ч. на а/д общего пользования		
2000	33339	12271	36,8	
2001	34541	12058	34,9	
2002	34488	11069	32,1	
2003	42409	13322	31,4	
2004	45593	13366	29,3	
2005	46485	13577	29,2	
2006	Всего	191931	22849	12,0
	с потерпевши	45482	10562	23,2

Из таблицы 1 видим, что доля ДТП на автомобильных дорогах от их общего количества в Украине, из года в год уменьшается. За шесть лет в Украине количество ДТП увеличилось на 36,4 %, за этот же период количество ДТП на автомобильных дорогах общего пользования - уменьшилось на 13,9 % (в расчет принимались только ДТП с потерпевшими т. к за прошедшие годы ДТП с материальным ущербом не учитывались в статистической отчетности и потому данные о них отсутствуют). В Украине в 2006 году на дорогах общего пользования ДТП с потерпевшими произошло, в среднем, через каждые 16,0 километров. На дорогах государственного значения ДТП фиксировались в среднем на каждые 2,4 километра, а на дорогах местного значения ДТП фиксировалось на каждые 39,8 километров.

Зарубежный опыт показывает, что наличие цели подкрепленной цифрами имеет более благоприятное развитие событий в формировании и внедрении мероприятий по безопасности движения. Хорошая достоверная статистика ДТП помогает донести проблему и создать мотивацию к повышению безопасности движения.

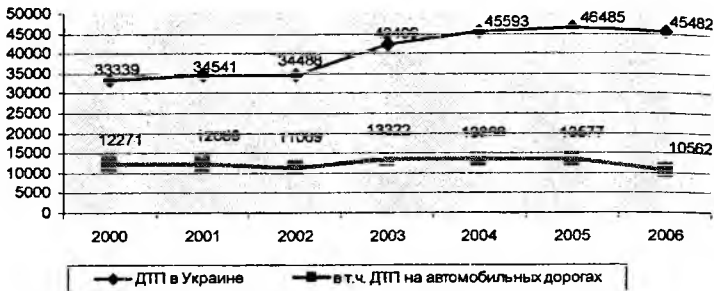


Рис. 4 – Динамика аварийности в Украине

Таблица 2. Тяжесть последствий в Украине

Годы	В Украине		
	ДТП	Погибло	Ранено
2000	33339	5185	36636
2001	34541	5984	38196
2002	34488	5982	37916
2003	42409	7149	47458
2004	45593	6966	53638
2005	46485	7229	56002
2006	Всего	191931	-
	с потерп	45482	6867

Хорошая профессиональная информация о количестве ДТП на автомобильных дорогах, причинах их возникновения, где и когда они произошли и какие именно мероприятия могут снизить уровень аварийности или уменьшить тяжесть последствий от ДТП, является необходимым обстоятельством для продуктивной борьбы с аварийностью.

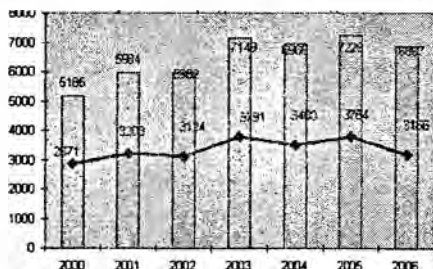
Хорошая профессиональная информация об аварийности дает возможность установить закономерности возникновения ДТП, планировать обоснованные мероприятия по безопасности движения, устанавливать приоритетность выполнения мероприятий по улучшению условий движения с целью снижения уровня аварийности, проводить оценку эффективности выполняемых мероприятий, а также решать ряд других важных вопросов.

Но, возможность внедрять эти мероприятия, зависит от цели, какую общество ставит перед собой и насколько великим есть желание достичь поставленной цели.

Отсутствие, или недостаточное количество, информации об уровне аварийности, причинах ее возникновения, эффективности мероприятий, которые влияют на снижение количества ДТП, может привести к тому, что проблемы безопасности движения не будут признаны, а эффективные мероприятия по сокращению количества ДТП не будут внедрены [1].

**Таблица 3. Тяжесть последствий на 100 ДТП за период 2005 – 2006 гг**

Годы	В Украине		В т.ч. на а/д общего пользования	
	На 100 ДТП с потерпевшими		На 100 ДТП с потерпевшими	
	погибло	ранено	погибло	ранено
2000	15,6	109,9	23,4	114,5
2001	17,3	110,6	26,6	116,7
2002	17,4	109,9	28,2	113,9
2003	16,9	111,9	28,5	119,5
2004	15,3	117,7	26,0	127,5
2005	15,6	120,5	27,9	129,0
2006	15,1	122,2	30,0	132,2



**Рис. 5 – Количество погибших в Украине за 200 – 2006 гг**

Создание Базы данных ведомственного учета ДТП позволит более детально и широко анализировать причины возникновения ДТП на автомобильных дорогах общего пользования. Накопление статистической информации о ДТП, где и при каких обстоятельствах они произошли, поможет более профессионально планировать и устанавливать очередность выполнения мероприятий по повышению безопасности движения, оценивать уровень безопасности участков дорог общего пользования, а также выявлять дорожные факторы, которые влияют на возникновение

отдельных видов ДТП, оценивать эффективность внедрения мероприятий, прогнозировать снижение аварийности от их выполнения.

На сегодня анализ аварийности на сети дорог в дорожных службах производится лишь с целью выявления участков концентрации ДТП и для учета ДТП, произошедших по вине дорожных условий и ДТП с тяжелыми последствиями. Только эти ДТП подлежат анализу для назначения мероприятий по повышению безопасности движения.

Действующая система учета ДТП в дорожных службах и Госавтоинспекции не имеет достаточно информации, которая бы позволила установить степень влияния тех или иных дорожных условий на возникновение конкретных видов ДТП и оценить эффективность внедряемых мероприятий по повышению безопасности движения. Мероприятия по обеспечению безопасности движения разрабатываются без должного обоснования и зачастую не влияют на снижение уровня аварийности и тяжести последствий от ДТП. Не смотря на снижение количества погибших, за последний год, в Украине в целом и на автомобильных дорогах в частности, остается высокой тяжесть последствий от ДТП, особенно на автомобильных дорогах. Сравнивая количество погибших на 100 ДТП на дорогах общего пользования, можно сделать неутешительный вывод. К большому сожалению, на автомобильных дорогах на каждые 100 аварий из года в год гибнет все больше и больше людей.

Увеличился этот показатель и в 2006 году по сравнению с прошлым. За последние шесть лет, количество погибших на каждые 100 ДТП на автомобильных дорогах общего пользования, увеличилось на 28,2 %. Этот факт можно объяснить увеличением скоростных режимов, особенно на дорогах вне населенных пунктов, несвоевременно оказанной медицинской помощью. Но для полноты картины, необходимо изучить влияние дорожных условий на возникновение ДТП; влияние человеческого фактора, например, нарушение Правил дорожного движения; рассмотреть улучшение конструктивных характеристик автомобилей направленных на улучшение защиты водителя и пассажиров от боковых и фронтальных ударов при возникновении ДТП, уменьшение деформации кузова автомобиля при совершении аварии, особое внимание следует уделить улучшению

видимости задних габаритных огней, особенно грузовых автомобилей и автобусов и др.

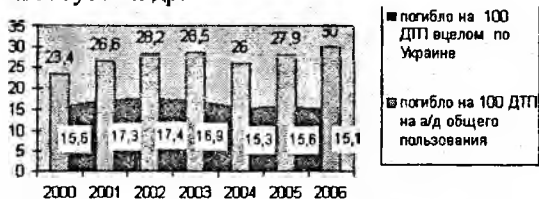


Рис. 6 – Погибло на 100 ДТП в 2000 – 2006 г г



Рис. 7 – Количество раненных в Украине за 2000 – 2006 г г

Несмотря на ощутимое снижение общего количества раненных в авариях на дорогах общего пользования, количество раненных на 100 ДТП постоянно увеличивается. За шесть лет количество людей, которые получили ранения на каждые 100 ДТП, увеличилось на 15,5 %.

Наиболее распространенными видами ДТП в Украине, за статистическими данными Центра безопасности дорожного движения при Департаменте ГАИ МВД Украины, есть «столкновения» и «наезды на пешеходов». Наиболее опасным видом происшествий, при котором наибольшая вероятность получения смертельных исходов и травм, это «наезд на пешехода», «наезд на велосипедиста», «опрокидывание». «Падение пассажира» тоже относится к виду происшествий с тяжелыми последствиями, но этот вид происшествий, к счастью, не часто случается.

Потому очень важно изучить причины и закономерности возникновения тех или иных видов происшествий и разработать соответствующие мероприятия, в первую очередь те, что предупреждают появление тех видов ДТП, которые наиболее рас-



пространенные и приносят больший ущерб при их возникновении.



Рис. 8 – Количество раненных на 100 ДТП

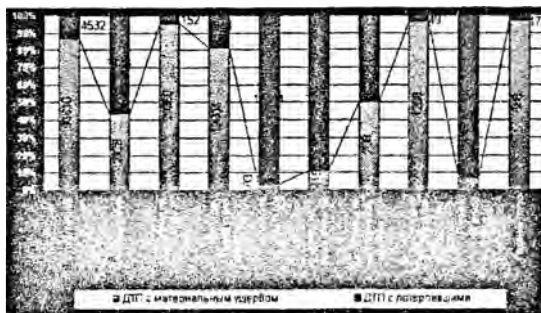


Рис. 9 – Доля аварий с потерпевшими от общего числа по видам за 2006 г

Ответственность за формирование и внедрение мероприятий по безопасности движения разделена между несколькими отдельными ведомствами: органами Госавтоинспекции, Министерствами транспорта, образования и науки, охраны здоровья, Укрдорсвязью и Укравтодором. Такое разграничение ответственности усложняет внедрение мероприятий по повышению безопасности движения, исходя из необходимости комплексного подхода для обеспечения максимальной и эффективной их реализации и может привести к тому, что проблемы безопасности движения могут отойти на другой план за счет решения других проблем отрасли.

Поэтому есть необходимость создания центрального координирующего центра по вопросам безопасности движения для урегулирования и контроля действий всех заинтересованных сторон.

### Моделирование пересечения транспортным потоком участка с ограниченной скоростью

Рожанский Д. В., Наливайко М. И., Мялик Т. В.  
Белорусский национальный технический университет

В данной работе предложена имитационная модель плотного транспортного потока, разработанная на основе детального моделирования режимов движения каждого из транспортных средств, входящих в поток. В основе модели заложено стремление водителя ведомого автомобиля выдерживать дистанцию до автомобиля-лидера в пределах от минимально до максимально безопасной, а также двигаться со скоростью, близкой к скорости лидера.

При движении автомобилей в плотном транспортном потоке можно выделить следующие режимы: остановка; движение со скоростью лидера (в т.ч. с ускорением или замедлением); снижение скорости до скорости лидера; увеличение скорости до скорости лидера; выравнивание скорости после разгона; выравнивание скорости после торможения.

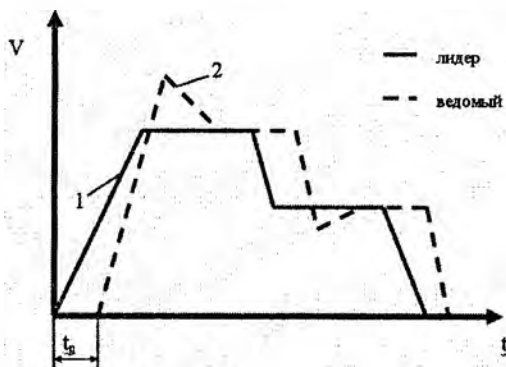


Рисунок 1 – Поведение ведомого и ведущего автомобилей

В предлагаемом варианте модели в качестве исходных данных были приняты: габаритная длина всех автомобилей в потоке

ке – 4м; время реакции водителя – 0,9с; коэффициент сцепления колёс с дорогой – 0,7; начальная скорость автомобилей потока равна «0», а режим движения – остановка.

На рис.1 представлен пример поведения водителей ведомого автомобиля и автомобиля-лидера для потока, состоящего из двух автомобилей.

После того, как дистанция между лидером и ведомым автомобилем превысила минимальную и истекло время реакции водителя, ведомый автомобиль начинает разгон. При этом ускорение определяется из условия, что скорость ведомого достигнет скорости лидера за определённое время. После того, как лидер перешёл в режим движения с постоянной скоростью, а также по истечении времени реакции, водитель ведомого автомобиля начинает выравнивать скорость после разгона с таким замедлением, чтобы достичь скорости лидера, не выйдя за пределы минимальной дистанции. После начала торможения лидером ведомый также начинает тормозить с таким замедлением, чтобы снизить скорость до скорости лидера на дистанции не ближе критической.

В дальнейшем модель была усовершенствована для имитации движения на участке с ограниченной скоростью. Дополнительно задаются следующие параметры:  $S_z$  – координата начала участка;  $L_z$  – протяжённость участка;  $V_z$  – величина ограничения скорости.

С помощью данной модели был проведен ряд исследований. В частности для различных потоков автомобилей получены зависимости времени проезда от длины участка ограничения скорости, величины ограничения скорости, граничной скорости лидера, а также от максимальной скорости движения и величины ускорения лидера.

На рис.2 изображена зависимость времени проезда от величины ограничения скорости на участке для потоков, состоящих из 5, 15 и 25 автомобилей.

На рис.3 представлена зависимость времени проезда от величины ограничения максимальной скорости потока для очереди, состоящей из 5, 15 и 25 автомобилей.

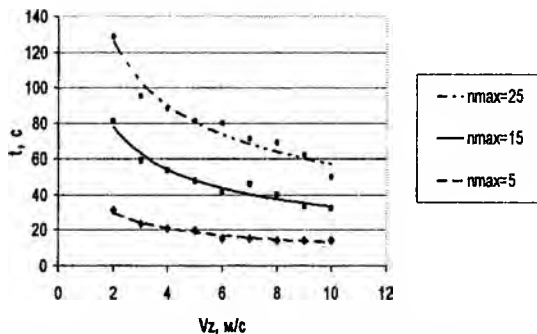


Рисунок 2 – Зависимость времени проезда от величины ограничения скорости

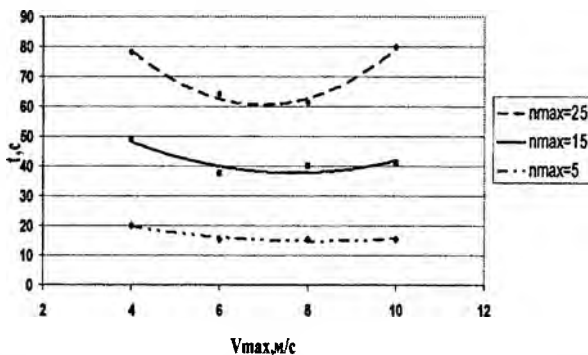


Рисунок 3 – Зависимость времени проезда от максимальной скорости потока

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы. На время проезда потока автомобилей через участок с ограниченной скоростью:

1) существенно влияют: величина ограничения скорости на участке  $V_z$  (при большой длине очереди и малом значении  $V_z$  время проезда существенно возрастает); максимальная скорость движения автомобилей потока  $V_{max}$  (наименьшее время проезда достигается, если  $V_z$  и  $V_{max}$  приблизительно равны);

2) не оказывают существенного влияния: протяжённость участка ограничения скорости  $L_z$ , (особенно при небольшой длине очереди); ускорение лидера.

УДК 656.1

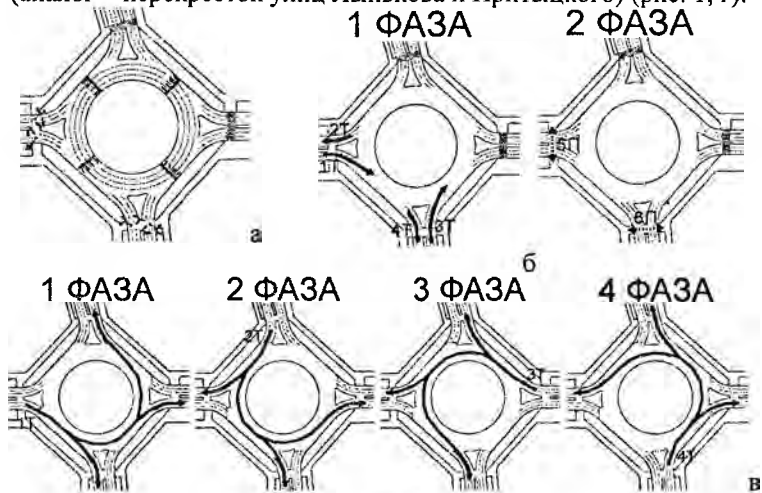
**Применение разработанной методики определения потерь для выбора параметров кольцевых перекрестков и разработки проектных решений**

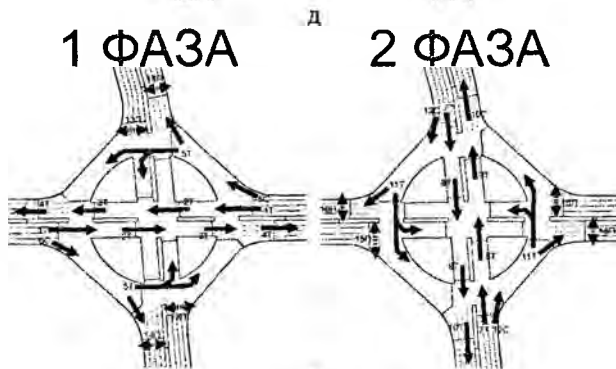
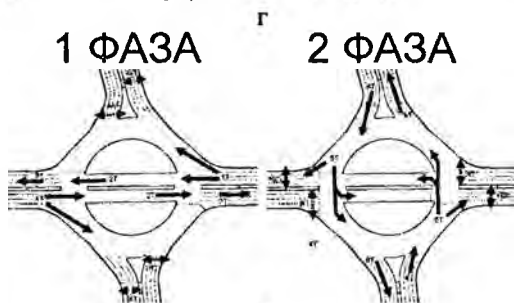
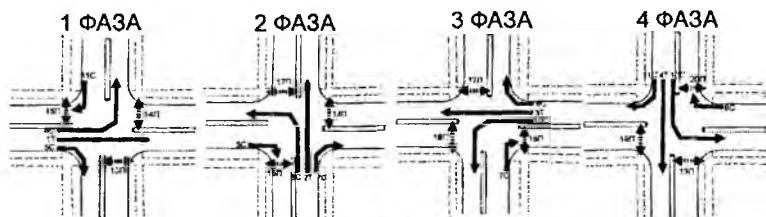
Капский Д. В., Кузьменко В. Н.

Белорусский национальный технический университет

Белорусским национальным техническим университетом были проведены исследования транспортной нагрузки и условий движения для разработки предложений и обоснованию варианта планировочного решения площади Бангалор в г. Минске (рис. 1, а). Как известно, данное пересечение работает на «пределе». При это пересечение является частично регулируемым: со входов по ул. Богдановича (со стороны МкДональдса) и по ул. Сурганова имеются регулируемые пешеходные переходы.

В дальнейшем рассмотрены следующие организационные и планировочные решения: координация работы регулируемых пешеходных переходов (рис. 1, б); полное регулирование на всех въездах (турбина) (рис. 1, в); разрез центрального островка вдоль самой нагруженной магистрали (ул. Богдановича) (рис. 1, д), полный разрез вдоль двух магистралей (аналог – площадь Притыцкого) (рис. 1, е) и стандартный перекресток (аналог – перекресток улиц Лынькова и Притыцкого) (рис. 1, г).





е

Рисунок 2 – Варианты альтернативных решений

В результате работы были проведены экспериментальные исследования транспортно-пешеходных потоков. Использовался предложенный НИЦ дорожного движения метод исследования корреспонденций для кольцевого движения (рис. 2). При проведении дальнейших исследований интенсивность движения бралась на перспективу (до 5 лет). Оценка предлагаемых решений производилась по критерию минимизации потерь в дорожном движении. На основе полученных экспериментальным путем

данных оценивались аварийные, экологические и экономические потери.

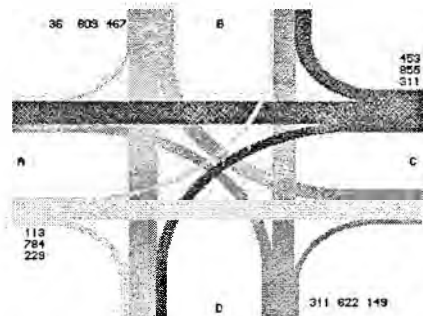


Рисунок 2 – Карттограмма интенсивности движения

Наиболее оптимальным является разрез центрального островка в двух направлениях. Потери от задержек и остановок транспорта и пешеходов при данном планировочном решении составляют 1.100.000 у.е./год. В случае координации движения по ул. Богдановича потери будут составлять 750.000 у.е./год. Преимущества предлагаемого планировочного решения: Отсутствует перепробег транзитного транспорта по ул. Богдановича и уменьшается перепробег левоповоротных потоков с улиц Орловская и Сурганова; Скорость движения на перекрестке транзитного транспорта по ул. Богдановича может быть равна скорости движения при подъезде к нему; Возможность использования наземных пешеходных переходов в 2 этапа; Меньшая прогнозируемая аварийность (на 60-70%) по сравнению с существующим планировочным решением; Возможность координации транзитного направления вдоль ул. Богдановича; Оптимальный уровень загрузки на входах (0,5-0,8).

Имеются и некоторые недостатки предлагаемого решения: Сложность координации по второй магистрали; необходимость бесперебойной работы светофорного объекта; условия движения по одной магистрали лучше, чем по другой; перепробег транзитных потоков по второстепенной магистрали и левоповоротных потоков главной магистрали; низкая скорость проезда перекрестка транспортом одной магистрали за счет движения по кольцу; наличие дополнительных задержек и остановок на условных вторых стоп-линиях участии транзитных и всех поворотных потоках.

## Содержание

### Технические и прикладные науки.

Электроэнергетика	3
Теплоэнергетика	48
Энергетическое строительство	75
Энергоэффективные технологии	108
Информационные технологии и автоматизация	126
Разработка месторождений полезных ископаемых	218
Металлургические технологии	232
Литейное производство черных и цветных металлов	242
Порошковая металлургия, сварка и обработка материалов давлением	254
Материаловедение в машиностроении	275
Теория механизмов и машин	294
Гидропневмоавтоматика	303
Горные машины	307
Двигателестроение	318
Судостроение и гидравлика	328
Строительные и дорожные машины	359
Тракторостроение	367
Информационно-измерительная техника и технологии	381
Конструирование и производство приборов	398
Опτικο-электронные и лазерные приборы и системы	418
Инженерное обеспечение строительства	431
Технология бетона и строительные материалы	446
Архитектура	462
Диагностика технического и транспортно- эксплуатационного состояния дорог	483
Транспортные сооружения	511
Эксплуатация автомобильного транспорта	525



Научное издание

НАУКА-  
ОБРАЗОВАНИЮ,  
ПРОИЗВОДСТВУ,  
ЭКОНОМИКЕ

Материалы Пятой международной  
научно-технической конференции

В 2 томах

Том 1

Ответственный за выпуск Л.Э. Ляшенко  
Технический редактор М.И. Гриневич

---

Подписано в печать 28.11.2006.

Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 37,89. Уч.-изд. л. 25,52. Тираж 150. Заказ 1317.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.

220013, Минск, проспект Независимости, 65.