

ИНЖЕНЕР- МЕХАНИК

№ 2 (87)
апрель – июнь
2020

Республиканский межотраслевой производственно-практический журнал
Издается с июля 1998 года
Выходит один раз в три месяца

Учредитель: Общественное объединение
«Белорусское общество инженеров-механиков»
(ОО «БОИМ»)

Главный редактор Чижик С.А.

Редакционная коллегия: Андреев М.А., Дашков В.Н.,
Дубовик Д.А., Дюжев А.А., Захарик А.М.,
Колпашиков В.Л., Крупец Л.Н., Лягушев Г.С.,
Мариев П.Л., Медвецкий Е.И., Мелешко М.Г.,

Адрес редакции:

220141, Минск, ул. Ф. Скорины, 52/6
тел. 264-00-80

E-mail: mail@boim.by

Свидетельство о регистрации № 1132 от 21.04.1998

Подписной индекс 001392

Компьютерная верстка Н.В. Побяржина

Подписано в печать 29.06.2020.

Формат 60×84/8. Бумага офсетная.

Гарнитура «Таймс». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,6. Уч.-изд. л. 4,7.

Тираж 75 экз. Заказ №

Цена номера договорная.

Отпечатано с оригинал-макета заказчика в ЧПТУП
«Колорград»

Лицензия ЛП № 02330/474 от 08.09.2015 г.

220033, г. Минск, пер. Велосипедный, 5, оф. 904.

www.segment.by

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы конференций и семинаров

Из материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технологического парка Полоцкого государственного университета «Иновационные технологии в машиностроении».....2

Разработки ученых и специалистов

Научно-технические направления исследований кафедры Технологии и оборудования машиностроительного производства Витебского государственного технологического университета в области инновационных технологий машиностроения.....16

Сравнительный анализ двух методов определения минимальных безопасных расстояний до магистральных газопроводов (МГ).
В.Г. Калиниченко.....18

Объемная гидropередача моноагрегатная на базе шестерённых гидромашин. *Котлобай А.Я., Котлобай А.А.*.....24

Совершенствование системы сбора и доставки ТКО. *А.В. Вавилов, И.В. Бурмак*.....30

Новые двигатели водных транспортных средств. *Северянин В.С.*.....35

Механика блочного лука. Ч.1. Траектория толчка стрелы. *Доброго К.В.*.....38



ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Из материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технологического парка Полоцкого государственного университета (Новополоцк, 21-22 апреля 2020 г.)

К 50-ЛЕТИЮ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ И НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПОЛОЦКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Н.Н. ПОПОК

Полоцкий государственный университет, Беларусь

Истоки технического образования на Полотчине нисходят, пожалуй, ко времени существования Полоцкого иезуитского коллегия, когда в 1729 г. была допущена астрономия, в 1730 г. – физика, а в 1783 г. – архитектура. Наиболее яркой фигурой этого периода был уроженец Вены Габриэль Грубер (1740–1805 г.), придворный физик австрийского императора Иосифа II Габсбурга. Переехав в Полоцк (1784 г.), Г. Грубер организовал музей, в корпусах которого разместил лаборатории и физико-механический кабинет. В физической части музея находились электрические машины, механические оптические и технологические приборы и оборудование. При изучении механики была возможность ознакомиться с устройством и работой машины для забивания свай. Большинство механизмов было из-

готовлено в Полоцке, причём многие из них под руководством Г. Грубера.

Поэтому неслучайно в 1862 г. Полоцкий кадетский корпус, основание которого было заложено в иезуитском коллегия, окончили известные в технических науках учёные, например, Виктор Львович Кирпичёв, профессор механики, основатель и первый ректор Харьковского технологического института (ныне НТУ «ХПИ») и Киевского политехнического института (ныне НТУУ «КПИ»), организатор и первый ректор Санкт-Петербургского электротехнического института Николай Григорьевич Писаревский.

В XIX–XX веках была создана сеть специальных учебных заведений в г. Полоцке: лесной (1912 г.), аграрно-экономический (1951 г.), торгово-технологический (1959 г.) техникумы и, конечно же,

учительская семинария (1872 г.), позднее – училище, колледж, а с 1953 по 1959 гг. – педагогический институт им. Ф. Скорины. В Новополоцке был открыт нефтяной (1963), позднее (1987) получившей название политехнический техникум, где выпускаются, в том числе и машиностроители. Именно на базе Новополоцкого нефтяного техникума в 1968 году был создан Новополоцкий филиал Белорусского политехнического института (НФ БПИ), позднее (1969 г.) Новополоцкий филиал Белорусского технологического института (НФ БТИ) и в 1974 году – Новополоцкий политехнический институт (НПИ), второй политех Беларуси.

Открытие вуза в г. Новополоцке способствовало бурное развитие промышленности – Новополоцких заводов «НПЗ» и «Полимир», Полоцких «Стекловолокно», авторемонтного и литейного заводов, позже Новополоцкого завода «Измеритель», а также Витебских станкостроительных заводов им. Кирова, «Коминтерна» и заточных станков, станкостроительного и инструментального заводов в г. Орше, и других, которые испытывали острую потребность в инженерных кадрах. Примечательно, что приказ об открытии НФ БПИ визировали Лев Степанович Ляхович (1919–1990гг.), д.т.н, профессор и Петр Иванович Ящерицын (1915–2005), академик НАН Беларуси, профессор, доктор технических наук, известный ученый в области технологии машиностроения и обработки материалов резанием, в то время ректор Белорусского политехнического института. П.И. Ящерицын оказал большое влияние на подготовку высококвалифицированных кадров и формирование научных направлений по машиностроению в Полоцком государственном университете.

В 1969 г. была образована кафедра «Технология конструкционных материалов» и в 1970 году осуществлён набор по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». В 1975 году из кафедры «Технологии конструкционных материалов» была выделена кафедра «Технология машиностроения» и организован машиностроительный факультет, состоялся первый выпуск инженеров-механиков. В дальнейшем в связи с развитием машиностроительной отрасли происходила реорганизация выпускающих машиностроительных кафедр: в 1980 году из кафедры «Технология машиностроения» выделена кафедра «Металлорежущие станки и инструменты»; в 2008 году вновь состоялось объединение кафедр и создана кафедра «Технология и оборудование машиностроитель-

ного производства»; в 2014 году на базе кафедры «Технологии конструкционных материалов» создана кафедра «Автомобильного транспорта». Также претерпели изменения состав и наименование факультета: вначале с 1971 года механико-технологический, 1975 года машиностроительный, затем с 2014 г. факультет машиностроения и автомобильного транспорта, а с 2017 года – вновь механико-технологический факультет, также изменился набор специальностей I ступени образования, по которым готовились инженеры:

- 1-36 01 01 «Технология машиностроения»;
- 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства»;
- 1-36 01 06 «Оборудование и технология сварочного производства»;
- 1-36 01 04 «Технология и оборудование высокоэффективных процессов обработки материалов»;
- 1-37 01 06 «Техническая эксплуатация автомобилей»;
- 1-37 01 07 «Автосервис»;
- 1-44 01 02 «Организация дорожного движения»;
- 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трёхмерных технологий».

По II ступени образования обучаются магистранты по следующим специальностям:

- 1-36 80 03 «Машиностроение и машиноведение»;
- 1-36 80 04 «Обработка конструкционных материалов в машиностроении»;
- 1-36 81 01 Инновационные технологии в машиностроении;
- 1-37 81 02 «Создание многофункциональных колёсных и гусеничных машин»;
- 1-36 81 02 «Сварочные и родственные технологии в промышленности».

Аспирантура ведёт подготовку инженеров исследователей по следующим специальностям:

- 05.02.08 «Технология машиностроения»;
- 05.02.07 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки».

За все время существования машиностроительного факультета защищено 9 докторских диссертаций, в т.ч. 4 – выпускниками факультета. Диссертации защитили: Ф.И. Пантелеенко, В.И. Коробко, В.Н. Коровкин, В.П. Иванов, В.Я. Прушак, М.Л. Хейфец, Н.Н. Попок, В.А. Данилов, В.М. Константинов. Ф.И. Пантелеенко и В.Я. Прушак избраны членами-корреспондентами НАН Беларуси. Присвоено звание профессора канд. техн. наук Б.П. Чемисову, канд.

техн. наук А.И. Голембиевскому, канд. техн. наук Ю.П. Ощепкову.

Созданы научные школы и направления:

- материаловедение (проф. Ю.П. Ощепков);
- самофлюсующиеся сплавы на железной основе (чл.-кор. НАН Беларуси Ф.И. Пантелеенко);
- материаловедение сплавов для упрочняющих покрытий (проф. В.М. Константинов, доц. А.Л. Лисовский);
- электроферромагнитное упрочнение деталей машин (проф. Б.П. Чемисов, доц. А.В. Абрамова);
- мобильное производство на основе модульных технологий и оснастки (проф. Н.Н. Попок);
- плазменная эмиссионная электроника (проф. В.А. Груздев, доц. В.Г. Залесский);
- интенсификация процесса обработки сложных поверхностей деталей (проф. В.А. Данилов, доц. Р.А. Киселев);
- системология зубонарезания (проф. Голембиевский А.И.);
- технологические комплексы (проф. М.Л. Хейфец);
- механика прочности деталей машин (доц. В.Э. Завистовский);
- механика жидкостей и газов (проф. В.И. Коробко, проф. В.Н. Коровкин);
- организация ремонтного производства (проф. В.П. Иванов, доц. Вегерина Т.В.);
- горное машиностроение (чл.-кор. НАН Беларуси В.Я. Прушак).

Техническая наука в университете начиналась с образования технических кафедр и развивалась вместе с ними. Первый заведующий кафедрой технических дисциплин Ю.П. Ощепков (1969 г.) занимался металловедением и создал направление, связанное с изучением структур и свойств металлов и их совершенствованием. Впоследствии это вылилось в 30-летний опыт сотрудничества с предприятиями нефтехимической отрасли в области восстановления и упрочнения деталей машин. Этой же проблемой занимался Николай Васильевич Спиридонов, создавший первую в Республики Беларусь отраслевую лабораторию, имеющую союзное подчинение. Впоследствии Н.В. Спиридонов, д.т.н., профессор работал на кафедре «Технологии машиностроения» БНТУ.

Одним из первых преподавателей филиала Г.М. Макаренко на Полоцком авторемонтном заводе была создана лаборатория по плазменной обработке. Кстати, первые студенты-машиностроители В.Э. Завистовский и Н.Н. Попок получили навыки научной работы именно у Ю.П. Ощепкова и Г.М. Макаренко.

В направлении упрочняющих технологий работали Владимир Владимирович Кузнецов (1970 г.) и Семен Владимирович Ярмолович, защитившие кандидатские диссертации в институте надежности и долговечности машин. НАН Беларуси с 1984 по 2010 гг. С.В. Ярмолович возглавлял кафедру начертательной геометрии и графики.

Ф.И. Пантелеенко, получивший в 1972 г. распределение в филиал БТИ (Новополоцк), под руководством проф. Леонида Григорьевича Ворошнина (БПИ, ныне БНТУ) защитил кандидатскую, а затем докторскую диссертации в области создания самофлюсующихся материалов на железной основе и защитных покрытий из них. Научная школа чл.-кор. НАН Беларуси Ф.И. Пантелеенко взрастила целую плеяду ученых, работающих в этом направлении: д-р техн. наук Валерий Михайлович Константинов, канд. техн. наук Александр Леонидович Лисовский, канд. техн. наук Андрей Станиславович Снарский, канд. техн. наук Олег Петрович Штемпель, канд. техн. наук Виктор Александрович Фруцкий, канд. техн. наук Сергей Николаевич Жабурёнок и др. Научные работы Ф.И. Пантелеенко нашли практическое воплощение в том числе в диагностике нефтяных трубопроводов и емкостей.

В это же время с кафедры Л.Г. Ворошнина (БПИ-БНТУ) в Новополоцк прибывает канд. техн. наук Алексей Михайлович Долгих, специализирующийся в области инструментальных сталей и впоследствии развивающий направление химико-термической обработки материалов.

Прибывшие в НИИ из Калининграда Б.П. Чемисов, В.И. Абрамов, И.Т. Сычев сформировали научное направление электроферромагнитного упрочнения деталей, которое координировал академик НАН Беларуси Евмений Григорьевич Коновалов, работавший в физико-техническом институте НАН Беларуси. По этому направлению были защищены кандидатские диссертации Б.П. Чемисовым и В.И. Абрамовым, выполнены первые дипломные проекты В.Э. Завистовским и Н.Н. Попок. Кстати, В.К. Липский, также прибывший из Калининграда, руководил студенческой лабораторией по электрогидравлическому упрочнению деталей; под его руководством по этой тематике был выполнен и защищен дипломный проект Б.И. Сосновиком. В.К. Липский д.т.н., профессор способствовал становлению как ученого выпускника машиностроительного факультета Ю.Г. Грозберга, ныне декана радиотехнического факультета, и многих других.

Научное направление в области упрочнения и восстановления деталей машин нашло свое продолжение в тесном сотрудничестве с институтом надежности и долговечности машин (ныне ГНУ «Объединенный институт машиностроения») НАН Беларуси, благодаря которому защитили диссертации выпускники НПИ: В.Э. и С.Э. Завистовские, А.А. Лысов, А.С. Аршиков, А.В. Дудан, М.Л. Кипервассер, Н.Н. Петюшев, В.М. Изойтко, А.В. Федоровичус, А.Л. Худолей и др. Координировал это направление чл.-кор. НАН Беларуси Нил Николаевич Дорожкин. Всего же выпускниками машиностроительного факультета НПИ-ПГУ защищено более 30 кандидатских диссертаций.

Выпускник НПИ (1976 г.) Виктор Яковлевич Прушак, начинавший заниматься наукой в сфере технологии машиностроения, защитил кандидатскую и докторскую диссертации и был избран членом-корреспондентом НАН Беларуси в области исследования и разработки геотехнологий и горной техники.

Наряду с металловедением, упрочняюще-восстанавливающим и технологическим направлениями в институте развивалось научное направление, связанное с обработкой материалов резанием. Его инициировал Юрий Агафьевич Новоселов, прибывший из г. Куйбышева (ныне г. Самара), аспирант известного ученого, позднее ректора Тольятинского политехнического института, профессора Арона Наумовича Резникова. Ю.А. Новоселов развивает исследования в области тепловых явлений при резании, в частности при фрезеровании.

Исследовались новые способы обработки и инструменты – фрезоточение, сборные резцы и т.д., упорядочивалась терминология резания. В 1983 г. в тесном сотрудничестве с известным ученым профессором Г.И. Грановским (МГТУ им. Н.Э. Баумана), университетом Дружбы народов им. Патриса Лумумбы и Госстандартом СССР были выпущены три ГОСТа СССР, которые и сегодня определяют терминологию науки о резании материалов.

Из г. Владимира в НПИ прибыл ещё один аспирант школы А.Н. Резникова Владимир Александрович Петров, защитивший кандидатскую диссертацию по ротационному подрезанию торцов труб. В.А. Петров – специалист поистине энциклопедических знаний, много сделал для становления кафедр технологии машиностроения и металлорежущих станков.

Формированию направления ротационного резания способствовал прибывший из аспиран-

туры ФТИ НАН Беларуси Евгений Михайлович Найдёнышев (диссертация по ротационному растачиванию). По этому направлению впоследствии были защищены кандидатские диссертации выпускниками НПИ Н.Н. Попок и М.Л. Хейфецем.

Научное направление в области резания материала развивали Виктор Алексеевич Данилов и Анатолий Иосифович Голембиевский, прибывшие из г. Калининграда. В.А. Данилов уже на тот момент состоял как ученый в области контроля сложнопрофильных поверхностей деталей. Впоследствии он занимался ротационным резанием, обработкой некруглых валов, шлицевых и зубчатых контуров и создал научную школу по интенсификации процесса резания сложных поверхностей.

А.И. Голембиевский защитил диссертацию по поверхностному пластическому деформированию деталей в ФТИ НАН Беларуси, занимался тангенциальным резанием и исследовал эффект затирания при зубодолблении, развивает научную школу по системологии зубонарезания.

Прибывший из Томска (1993 г.) доктор технических наук, профессор Владимир Алексеевич Груздев, сформировал научный коллектив и создал научную школу по направлению обработки материалов плазменноэмиссионными электронами, которая успешно развивается в тесном содружестве с ФТИ НАН Б и кафедрами машиностроительного факультета. По его инициативе организован Совет по защите диссертаций К 02.19.02 «Электрофизика и электрофизические установки». Успешно защитили кандидатские диссертации В.Г. Залесский, Ю.П. Голубев, О.П. Петрович, Д.А. Антонович и др. Впоследствии В.Г. Залесский защитил докторскую диссертацию и ныне возглавляет ФТИ НАН Беларуси.

Также надо отметить научно-исследовательские работы по алмазной обработке материалов (науч. руководители: А.А. Лысов, А.С. Аршиков) и абразивной обработке ленточным инструментом (науч. руководитель С.Э. Завистовский).

Через научные школы машиностроительного факультета и Совет по защите диссертаций, возглавляемый Ф.И. Пантелеенко, прошли многие производственники: директор ОАО «Проммашремонт», канд. техн. наук Владимир Иванович Семёнов, директор ОАО «Белкард» (Гродно), канд. техн. наук Виктор Иванович Кравченко и многие другие.

Сочетание технологических и физических направлений исследований позволило сформиро-

вать научные направления по мобильному производству, основанному на модульных технологиях, быстроперестраиваемом технологическом оборудовании и оснастке (науч. руководитель Н.Н. Попок), а также проектированию технологических комплексов (науч. руководитель М.Л. Хейфец). Способствовал развитию этих направлений и координировал их академик НАН Беларуси П.И. Ящерицын.

Уникальность научной школы в области мобильного развития машиностроительного производства состоит в том, что она формировалась на базе научных школ представителей различных городов Советского Союза и впитала в себя лучшие их достижения. Наиболее существенный вклад в создание школы внес академик НАН Беларуси Петр Иванович Ящерицын – известный ученый в машиностроении и обработке металлов резанием. За время существования школа защищено 4 кандидатских и 3 докторских диссертации, более 30 магистерских диссертаций. Научная школа активно развивается. Об этом свидетельствуют выполняемые задания в государственных программах научных исследований, в том числе фундаментальных, которые завершены внедрением разработок в производства ряда станкостроительных и инструментальных предприятий Республики Беларусь.

Научная школа участвует в выполнении заданий государственной программы инновационного развития Республики Беларусь на 2016–2020 гг. по созданию и развитию технопарка Полоцкого государственного университета, в международных проектах с Литовским инновационным центром. Изданы многочисленные монографии и статьи в рецензируемых журналах, получены патенты на изобретения. Регулярно с интервалом в два года проводятся международные научно-технические конференции «Инновационные технологии в машиностроении» с участием уче-

ных России, Украины, Литвы, Латвии, Польши, Германии.

Постоянно совершенствуется материально-техническая база исследований. За последние годы приобретен ряд современных металлорежущих станков с ЧПУ и вакуумная установка для ионно-плазменной обработки изделий, современная измерительная аппаратура и приборы для точного измерения линейных размеров (видеоизмерительный микроскоп «Norgau NVM-4030D»), температуры (пирометр «Optris»), шероховатости поверхности (профилограф-профилометр «Abris») и т.д.

Но главное достижение научной школы – это преемственность ее учеников и последователей. В 2018 г. защищена кандидатская диссертация Р.С. Хмельницким. Ежегодно в научных кружках занимаются более 10 студентов, 2–3 студента участвуют в выполнении госбюджетной тематики, выполняется порядка 3–5 дипломных проектов по научно-исследовательским темам, до 10 студентов участвуют в студенческих конференциях, в т.ч. на английском языке.

В настоящее время по машиностроительным специальностям обучается в аспирантуре – 5 человек, в магистратуре – 10 человек. По результатам Республиканского конкурса научных работ в 2017–2019 году лауреатом стал магистрант, а ныне аспирант В.С. Анисимов, I категории удостоены работы студентов и магистрантов Башлачёва Д.А., Пуймана Е.В., Жихорева Е.О., Тихон Е.М. В 2019 г. открыта магистратура по специальности «Инновационные технологии в машиностроении». Еще большую привлекательность для молодых ученых придает открытие такой перспективной специальности, как «Производство изделий на основе трехмерных технологий». Современные методы обучения студентов и освоение ими цифровых технологий позволят еще больше увеличить количество молодых людей, желающих заниматься наукой.

УДК 658.512

САПР УНИВЕРСАЛЬНО-СБОРНЫХ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ ДЛЯ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Н.В. БЕЛЯКОВ, Ю.Е. МАХАРИНСКИЙ

Витебский государственный технологический университет, Беларусь

Н.Н. ПОПОК

Полоцкий государственный университет, Беларусь

Приводятся основы создания и функционирования системы автоматизированного синтеза компоновок универсально-сборных приспособлений для корпусных деталей средних габаритных размеров. Система позволяет: формировать схемы установки заготовок, обеспечивающие на стадии проектирования требуемые допуски взаимного расположения конструктивных элементов; производить автоматизированное проектирование трёхмерных моделей компоновок универсально-сборных приспособлений, их чертежей, а также технологических схем сборки и разборки.

Анализ работы станкостроительных предприятий показывает, что в общей номенклатуре обрабатываемых деталей корпусные детали составляют порядка 15–20%. Причем порядка 60% из них являются деталями средних габаритных размеров. Обеспечение точности взаимного расположения конструктивных элементов (функциональных модулей) деталей должно осуществляться уже на стадии проектирования технологии за счет правильного выбора баз, состава установочных и установочно-зажимных элементов приспособлений и их компоновки. В практической работе в большинстве случаев для каждой новой корпусной детали синтезируется индивидуальный технологический процесс [1–2], а для операций серийного, крупносерийного и массового производства проектируются соответствующие станочные приспособления. При этом порядка 80% приспособлений на операциях обработки корпусных деталей на фрезерных обрабатывающих центрах являются универсально-сборными (УСП).

В настоящее время на предприятиях компоновка и сборка УСП осуществляется слесарями-сборщиками высокой квалификации по чертежу детали. Как такового проектирования компоновочной схемы приспособления никем не производится. Сборка приспособления осуществля-

ется исходя из собственного опыта и интуиции сборщика. При этом вопросы обеспечения точности взаимного расположения конструктивных элементов обрабатываемой заготовки не рассматриваются вовсе, что часто приводит к неустраняемому браку.

Повысить качество проектирования приспособлений и сократить трудоемкость проектных работ в десятки раз позволяет их автоматизация. Некоторые компании представляют базы данных 3-D элементов УСП стоимостью порядка нескольких тысяч у.е., однако каких-либо инструментов автоматического формирования компоновок приспособлений с учетом обеспечения требуемых допусков взаимного расположения конструктивных элементов деталей они не предоставляют.

Одной из причин отсутствия работоспособных систем автоматизированного проектирования компоновок УСП для корпусных деталей является несовершенство положений теории базирования и, как следствие, отсутствие методик формирования заданий на проектирование приспособлений обеспечивающих требуемые допуски взаимного расположения функциональных модулей. Ранее авторами настоящей работы предложен ряд методик, моделей и алгоритмов, позволяющих использовать теорию базирования в качестве инструмента синтеза маршрута обра-

ботки заготовок корпусных деталей, позволяющего определять порядок обработки заготовки, выбирать базы на первой и последующих операциях, определять число связей накладываемых базами и генерировать задание на проектирование станочных приспособлений [1–3].

Предложенные методики, модели и алгоритмы позволили создать систему автоматизированного синтеза компоновок универсально-сборных приспособлений для корпусных деталей средних габаритных размеров при обработке на фрезерных обрабатываемых центрах. Система разработана как приложение графического твердотельного редактора Autodesk Inventor. Пользователь системы средствами графического редактора проектирует трехмерную твердотельную модель детали с кодированием функциональных модулей, допусков взаимного расположения и линейных размеров. В приложении задаются технологические возможности оборудования, векторы доступности для обработки и др. Пользователь может сам указать конструктивные элементы, подлежащие обработке на операции. Далее система предлагает несколько вариантов маршрута обработки за-

готовки с указанием приоритетных базовых поверхностей для обеспечения допусков взаимного расположения функциональных модулей, состав установочных, установочно-зажимных и (или) зажимных элементов, рекомендует состав базовых, направляющих и прочих элементов УСП, формирует несколько вариантов трёхмерных компоновок приспособления, монтажные чертежи, а также наглядные схемы сборки-разборки сложных компоновок.

Система проходит апробацию на ОАО «Вистан» (г. Витебск) и в учебном процессе УО «ВГТУ» (рисунок). Разработанная система позволяет: снижать вероятность неустранимого брака за счет научно обоснованного решения вопроса обеспечения допусков взаимного расположения конструктивных элементов детали на этапе проектирования компоновки; снижать временные затраты на подготовку производства; собирать приспособления сборщиком невысокой квалификации; составлять наиболее рациональную номенклатуру пусковых комплектов; включить службу УСП в единую автоматизированную систему технологической подготовки производства.

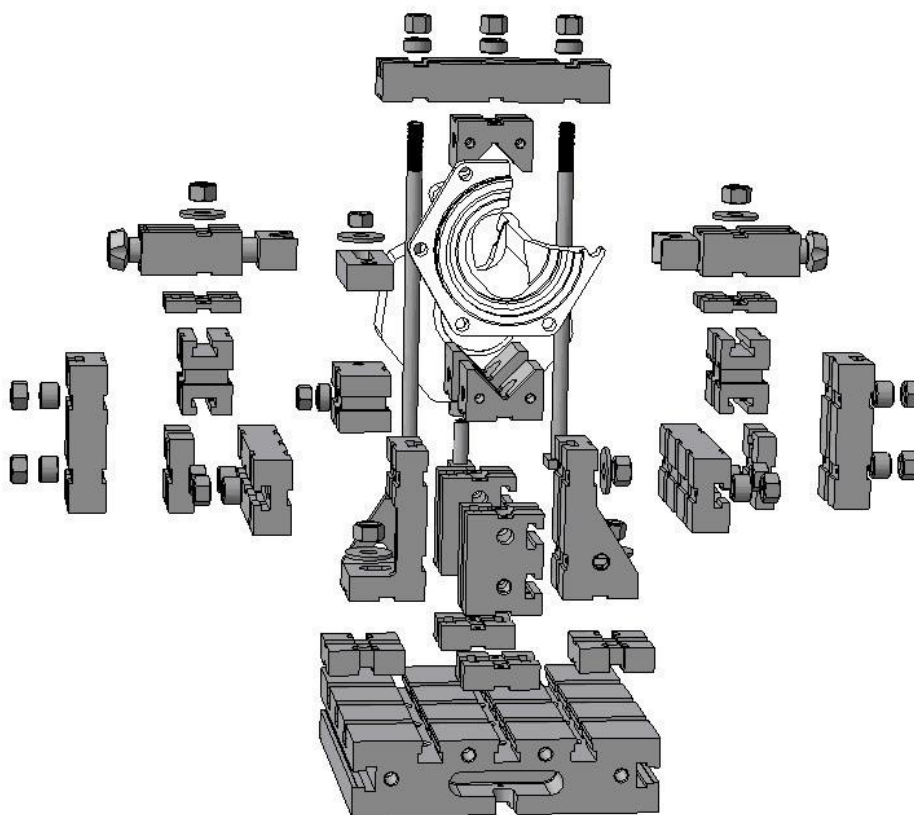


Рис. Ассоциативная схема сборки УСП, выполненная с помощью системы (деталь «Рукав 422-240711», ОАО «Вистан»)

ЛИТЕРАТУРА

1. Попок, Н. Н. Методы и модели компьютерного проектирования технологических процессов изготовления корпусных деталей / Н. Н. Попок, Н. В. Беляков // Вестник ПГУ. – 2010. – №3, Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – С. 68–75.
2. Попок, Н. Н. Система автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления корпусных деталей на станкостроительных предприятиях Витебской области / Н. Н. Попок, Н. В. Беляков, В. И. Ольшанский, Ю. Е. Махаринский, М. М. Жадович, Д. Б. Ермашкевич, А. В. Белецкий, В. В. Величко // Вестник ПГУ. – 2011. – №11, Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – С. 2–11.
3. Махаринский, Е. И. Теория базирования в проблеме проектирования технологических процессов механической обработки и станочных приспособлений / Е. И. Махаринский, Н. В. Беляков, Ю. Е. Махаринский // Вестник машиностроения. – 2008. – №9. – С. 34–45.

ДК 622.363.2.06(042.3)(476)

ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДОБЫЧИ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВА ЗАО «СОЛИГОРСКИЙ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ С ОПЫТНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ»

А.В. БРИЖЕВИЧ, Е.В. БОРИС, Е.В. КОДНЯНКО

Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством, Беларусь

ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» – ведущий национальный разработчик и поставщик импортозамещающего горнодобывающего, обогащенного, подъемно-транспортного и бурового оборудования, а также комплексов складирования и перевалки крупнотоннажных сыпучих материалов. Выпускаемая предприятием техника постоянно модернизируется и обновляется. Эту задачу успешно решает коллектив предприятия и инженерно-технические работники ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством».

Введение

В настоящее время, когда спрос на полезные ископаемые продолжает оставаться высоким, отечественная горнодобывающая промышленность нуждается в современной импортозамещающей высокопроизводительной технике для добычи и переработки калийных солей. На современном рынке горнодобывающего оборудования большое внимание разработкам техники для добычи и переработки калийных солей уделяет ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (далее Институт).

ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» – ведущий национальный разработчик и поставщик

импортозамещающего горнодобывающего, обогащенного, подъемно-транспортного и бурового оборудования, а также комплексов складирования и перевалки крупнотоннажных сыпучих материалов.

Основной текст

В основу производственной деятельности Института положено использование передовых достижений отечественной и зарубежной науки, а также собственных научно-технических разработок. На предприятии осуществляется весь цикл создания горных машин от научных исследований до опытно-конструкторских разработок и серийного производства, а также ведутся работы в области ресурсосберегающих технологий под-

земной разработки калийных месторождений.

Приоритетным направлением научно-производственного развития ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» является производство (рис. 1):

– горно-шахтных машин и оборудования – проходческих и проходческоочистных комбайнов и комплексов, машин целенарезных и погрузочных, масло станций передвижных;

– оборудования обогатительного – мельниц шаровых и стержневых, дробильно-сортировочных станций, сгустителей, установок сушильных, вакуумфилтров;

– оборудования для производства гранулированных минеральных удобрений (комплексных и однокомпонентных) – смесителей (шнековых, роторных,

барабанных), дробилок, растворителей, охладителей, грануляторов, прессов валковых, линий тукосмешения;

– оборудования и комплексов по перегрузке сыпучих материалов – кратцер-кранов, элеваторов, станций разгрузки сыпучих материалов из железнодорожных вагонов, складских комплексов для сыпучих продуктов, морских и речных терминалов по перегрузке сыпучих материалов;

– оборудования горной автоматики и управления – автоматических систем контроля и управления на базе микропроцессорной техники, электротехнических устройств, пневмоприводов исполнительных органов.

Научные исследования, разработка и выпуск современного импортозамещающего горно-шахтного и другого оборудования стали возможны во многом благодаря созданию и аккредитации испытательного центра.

Коллектив предприятия уделяет большое внимание проблемам повышения надежности горных машин и механизмов. Объектом исследования является изучение актуальных проблем современного состояния и перспектив развития горного машиностроения, которое характеризуется широкой номенклатурой изделий, что обусловлено не только большим разнообразием горных машин, но и

стремлением приспособить их к разнообразным горногеологическим условиям эксплуатации.

Повышение надежности – одна из важнейших задач в горнорудной промышленности, что связано с непрерывным ростом интенсификации технологических процессов горного производства, повышением производительности оборудования и увеличением воздействующих на него нагрузок.

Технический прогресс в горном машиностроении развивается по двум основным направлениям:

– непрерывный рост мощностей, скоростей и производительности каждого агрегата, и в связи с этим, постоянное усложнение конструкций машин, снижение их массы;

– переход от отдельных машин к агрегатам и комплексам оборудования. Современные горные машины очень сложны в конструктивном отно-



Рис. 1. Основная номенклатура продукции ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»

шении, поэтому вопросы удобства обслуживания техники при эксплуатации приобретают исключительное значение. Ремонтпригодность – одно из свойств изделия, которое характеризует его приспособленность к предупреждению, обнаружению и устранению отказов путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Реализация мероприятий по дальнейшему повышению надежности, долговечности горнодобывающего оборудования осуществлялась в следующих направлениях:

- применение лучших компоновочных решений, прогрессивных методов расчета на прочность, унификация узлов и деталей на стадии проектирования и разработки конструкции;
- улучшение структуры применения конструкционных материалов, прогрессивных неметаллических конструкционных материалов;
- обеспечение потребности горнорудных предприятий горными машинами для конкретных горно-геологических условий.

Проведенные исследования позволяют нам сформулировать следующие рекомендации:

- доведение показателей технического уровня разрабатываемой (модернизируемой) продукции до уровня мировых достижений, и полностью отвечающего требованиям потребителя на весь период ее эксплуатации;
- разработка и освоение принципиально новых технологических решений, направленных на повышение надежности и долговечности горного оборудования, разработка новых материалов и процессов, обеспечивающих требуемое качество конечного изделия;
- научно-техническое обеспечение инновационного промышленного производства горно-

шахтного оборудования;

- освоение сложных наукоемких технологий, внедрение новых средств измерения и методов активного контроля параметров технологических процессов;
- оказание услуг и выполнение профильных работ научно-исследовательского, проектного, производственного характера, обеспечение послепродажного обслуживания поставляемого оборудования.

Заключение

Создание новых моделей шахтного подземного транспорта всегда диктовалось потребностями горнодобывающих предприятий России, Казахстана, Узбекистана и других стран СНГ.

Основным направлением своей производственной политики ЗАО

«Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» считает постоянное повышение технического уровня, качества и надежности выпускаемой продукции, максимальное удовлетворение запросов потребителей, с которыми предприятие связывает многолетнее и плодотворное сотрудничество.

Для решения поставленных задач проводится изучение мирового уровня строительно-дорожной, подземной и специальной техники, а также запросов потребителя. Осуществляется совершенствование продукции с учетом требований и ожиданий рынка.

Выпускаемая предприятием техника постоянно модернизируется и обновляется. Эту задачу успешно решает коллектив предприятия и инженерно-технические работники ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством».

ЛИТЕРАТУРА

1. [Электронный ресурс] – Режим доступа : <https://sivr.by/>. – Дата доступа : 10.03.2020.

УДК 621.793.7: 620.178.53: 539.4:539.67

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ НАНЕСЕНИЕМ НА ИХ ПОВЕРХНОСТЬ ПОКРЫТИЙ

А.В. ДУДАН

Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь

Е.К. СОЛОВЫХ

Центральноукраинский национальный технический университет, Кропивницкий, Украина

М.Ф. КОВАЛЕВ, М. ГОЛОВАЩУК

Национальный транспортный университет, Киев, Украина

В.Н. КУЛЫЖСКИЙ

Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

В работе показана целесообразность и отмечены перспективы использования различных методов упрочнения и нанесения покрытий для повышения прочности несущих деталей, защиты их от коррозии и износа. Показано, что разработанные в настоящее время технологические методы упрочнения позволяют повысить прочность и, в частности, пределы выносливости деталей более чем в 2 раза, а сроки службы за счет этого – в десятки раз. Физическая природа эффекта упрочнения, вызванного технологическими приемами обработки поверхности изделия, связана с образованием в поверхностных слоях сжимающих напряжений, приводящих к переходу очага зарождения усталостной трещины от рабочих напряжений с поверхности в глубь детали ниже слоя с сжимающими напряжениями. Эффект упрочнения зависит как от механических свойств материала в сечении, так и от результирующей положения эпюр остаточных напряжений (вызванных упрочнением) и рабочих напряжений.

В процессе эксплуатации большинство деталей любых машин подвергается силовым воздействиям, вызывающим крайне неоднородное напряженное состояние. При этом во всех случаях максимальные напряжения, обусловленные главным образом изгибом и кручением или их совместным действием, возникают в наружных слоях материала несущих деталей, где и появляются первые трещины, приводящие к разрушению. Следует учесть и сильное влияние на упрочнение поверхностных слоев

внешней среды, приводящей во многих случаях к коррозии, которая понижает прочность, особенно усталостную. На несущую способность деталей, подверженных в процессе эксплуатации трению и износу, влияют и поврежденные поверхностные слои материала.

Поэтому большое практическое значение в машиностроении приобретают различные методы упрочнения поверхности деталей машин, целью которых является как повышение прочности

несущих деталей и защиты их от коррозии, так и снижение износа деталей, подверженных при контактом взаимодействии трению и износу.

В зависимости от типов деталей и материалов, из которых они изготовлены, условий их эксплуатации применяют различные виды и технологии упрочнения поверхности. Отметим следующие виды упрочнения поверхности элементов конструкций:

- химико-термическая обработка (ХТО), в том числе газовая цементация, газовое азотирование, жидкостное борирование, твердофазное борирование;

- газотермическое напыление (ГТН), в частности газопламенное (ГПН), электродуговое (ЭДН), плазменное и детонационное;

- гальванические покрытия;

- электроискровое легирование (ЭИЛ) и легирование лазерное;

- электронно-лучевое упрочнение;

- химическое осаждение из газовой фазы;

- вакуумное осаждение, в том числе химико-

технологическая обработка в тлеющем разряде;

- ионная имплантация;
- парогазовая конденсация и др.

Значительное распространение получили методы повышения прочности элементов конструкций и деталей машин, подверженных действию повторно-переменных нагрузок. К их числу следует отнести упрочнение поверхности путем наклепа, обкаткой роликами или обдувкой металлической дробью, а также поверхностной закалкой с нагревом током высокой частоты (ТВЧ), цементацией, цианированием и др.

Рассмотрим характерные виды упрочнения элементов конструкций и деталей машин путем нанесения на их поверхность специальных металлических слоев. Среди методов упрочнения поверхности изделий важное место занимают наплавка и напыление как средства поверхностного упрочнения деталей машин при изготовлении и восстановлении. Указанные типы покрытий обеспечивают значительное повышение работоспособности и долговечности машин и механизмов за счет увеличения износостойкости, коррозионной стойкости и других эксплуатационных свойств деталей в зависимости от их назначения.

Для упрочнения деталей металлургического оборудования и сельскохозяйственном машиностроении широкое распространение получила наплавка износостойкими материалами. Заслуживает внимания плазменное напыление гильз цилиндров дизельных двигателей с целью их защиты от кавитации. При этом имеется возможность установить пороговое значение прочности сцепления покрытия, при котором происходит смена механизма разрушения композиции. Исследования показали, что максимальный эффект по защите гильз цилиндра двигателя от кавитации удается достичь за счет увеличения прочности материала покрытия, а также адгезионной прочности покрытия с основой, превышающей критическое пороговое значение. При этом удается сохранить ресурс работы изделия при снижении в два раза толщины наплавленного защитного слоя.

Наряду с упрочнением покрытиями путем напыления и наплавки, используется метод нанесения покрытий дискретной структуры. Покрытие представляет собой отдельные островки — «точки», получаемые с помощью специальных металлических электродов. При этом минимальный износ достигается, когда островки занимают 60 % поверхности упрочняемой детали. Указанные островки имеют высокую твердость по сравнению с твердостью основного металла. Такое

упрочнение эффективно для снижения износа трущихся поверхностей деталей машин и трущихся о грунт поверхностей элементов земледообработывающих машин.

Особого внимания заслуживают покрытия, применяемые в газотурбостроении для упрочнения и увеличения долговечности рабочих лопаток. В этом случае покрытие служит не столько для упрочнения лопатки, сколько для защиты от коррозии, влияющей на долговечность лопатки, а также для тепловой защиты материала лопатки от перегрева и повышения температуры газового потока на входе, а, следовательно, и повышения коэффициента полезного действия (КПД) газовой турбины.

Цель покрытия – повысить весь комплекс технико-экономических показателей газовой турбины, что может быть достигнуто повышением температуры на входе газовой турбины. Для этого необходимо повысить жаростойкость применяемых для изготовления турбинных лопаток материалов путем нанесения на готовое изделие защитных покрытий. Многочисленные исследования показали, что эффективным методом получения такого покрытия является электронно-лучевое испарение и конденсация металла на поверхности в условиях вакуума. При использовании упрочняющих и теплозащитных покрытий (ТЗП) применительно к турбинным лопаткам оправдали себя многослойные покрытия. Позволяет создавать сложные композиционные многослойные покрытия электронно-лучевая технология, которая является одной из наиболее гибких в управлении.

Для обеспечения оптимальной несущей способности изделия с покрытием подбор материала слоев по физико-механическим свойствам и чередование слоев осуществляются так, чтобы не было резкой разницы в физико-механических свойствах в соседних слоях и тем самым можно было бы свести до минимума начальные остаточные напряжения, которые могут возникать при повышении температуры. Такой подход, используемый, в частности, при применении покрытий из тугоплавких материалов на основе ниобия и молибдена для несущих элементов реактивных двигателей, эксплуатируемых в условиях высоких температур, основным материалом которых является сплав на основе ниобия, позволил повысить сопротивление ползучести на 10–20 %, долговечность увеличить в 3 раза, а при теплосменах – более чем в 2 раза. В случае применения в качестве основного материала сплава на основе молибдена сопротивление ползучести при теплосменах возрастает на 35–60 %, жаро-

прочность – в 4 раза, а долговечность – в 4–6 раз. Использование для нанесения защитных покрытий электронно-лучевой технологии позволило повысить долговечность композиции «жаропрочный сплав – ТЗП» в 1,5–1,6 раза при испытаниях на термоциклическую ползучесть и в 1,6–2,1 раза при испытаниях на изотермическую ползучесть при снижении скорости ползучести на 40–50 %.

Разработанные в настоящее время технологические методы упрочнения позволяют повысить прочность и, в частности, пределы выносливости деталей более чем в 2 раза, а сроки службы за счет

этого – в десятки раз. Физическая природа эффекта упрочнения, вызванного технологическими приемами обработки поверхности изделия, связана с образованием в поверхностных слоях сжимающих напряжений, приводящих к переходу очага зарождения усталостной трещины от рабочих напряжений с поверхности в глубь детали ниже слоя с сжимающими напряжениями. Эффект упрочнения зависит как от механических свойств материала в сечении, так и от результирующей положения эпюр остаточных напряжений (вызванных упрочнением) и рабочих напряжений.

УДК 621.81

ОБОСНОВАНИЕ РЕНТАБЕЛЬНОСТИ РЕМОНТА АВТОМОБИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

В.П. ИВАНОВ, Т.В. ВИГЕРИНА

Полоцкий государственный университет, Беларусь

Поддержание автомобильного парка в технически исправном состоянии при эксплуатации состоит из воздействий двух видов: технического обслуживания и ремонта. Воздействия первого вида направлены на уменьшение интенсивности разрушительных процессов по мере использования автомобилей своевременным выявлением и экономически эффективным предупреждением неисправностей в плановом порядке.

Наиболее сложным и трудоемким видом ремонта является капитальный ремонт, при котором устраняются любые неисправности с полным восстановлением ресурса. В настоящее время капитальный ремонт техники сводится к ремонту агрегатов и заключается в экономически эффективном восстановлении их надежности в результате наиболее полного использования остаточной долговечности деталей [1].

Практика показывает, что научно обоснованные процессы и организация ремонта машин позволяют достичь нормативной наработки техники, а в отдельных случаях и превзойти наработку новых изделий.

Восстановление деталей позволяет использовать их материал, форму и остаточную долговечность, что сокращает потребление запасных частей, энергии и материалов, а также способствует охране окружающей среды (масса отходов при восстановлении деталей в 20 раз меньшая, чем при их изготовлении). Только за счет исключения металлургического процесса при восстанов-

лении одной тонны стальных деталей экономят 180 кВт-ч электроэнергии, 0,8 т угля, 0,8 т известняка и 175 м³ природного газа [1]. Таким образом, использование восстановленных деталей при ремонте агрегатов является актуальным, эффективным и ресурсосберегающим мероприятием.

Цель работы – обоснование рентабельности ремонта автомобильных агрегатов с применением восстановленных деталей.

Обоснование рентабельности основывалось на учете количественно изменяющихся статей затрат на технологические операции ремонта автомобильных агрегатов в различных вариантах. Ограничениями решений являлось обеспечение нормативной послеремонтной наработки отремонтированных агрегатов, обусловленной наработкой составляющих деталей. Объект исследования являлись автомобильные агрегаты (двигатели ведущие мосты и коробки передач).

Восстанавливаемые детали агрегатов утрачивают работоспособность в большинстве случаев из-за незначительного износа небольшого числа поверх-

ностей (потеря массы деталей при этом составляет до 0,3 %). При восстановлении деталей обрабатывают только около 25 % числа поверхностей, обрабатываемых при их изготовлении. Затраты на материалы при изготовлении деталей составляют 30–40 % общих затрат, а при их восстановлении 6–7 % от себестоимости соответствующих процессов [2]. Если эти затраты сопоставить непосредственно, то окажется, что материальные затраты при восстановлении деталей составят лишь 3 % от соответствующих затрат при их изготовлении. Создание ремонтных заготовок пластическим деформированием материала, электромеханической обработкой или обработкой под ремонтные размеры вообще не требует расхода материалов.

Затраты на восстановление деталей зависят от количества и видов устраняемых повреждений. При первом обращении на восстановление, как правило, обходятся без трудоемкого нанесения восстановительных покрытий, поэтому стоимость восстановления минимальная (таблица). Последующее обращение, связанное с нанесением таких покрытий, в 1,5–2,0 раза увеличивает соответствующие затраты.

Современное состояние науки и практики позволяет повысить наработку восстановленных деталей до нормативного значения, но некоторые

детали нерационально восстанавливать централизованно, потому что даже в условиях значительной концентрации производства на специализированных предприятиях невозможно обеспечить себестоимость восстановления, которая не меньше затрат на изготовление детали. На заводе по капитальному ремонту машин следует сохранить восстановление простых деталей, имеющих низкую стоимость изготовления, но в результате изнашивания которых приходится восстанавливать значительную (более 100 см²) рабочую поверхность. Это – валы и оси шестерен масляных насосов, валики и оси педалей, оси блоков шестерен, штоки переключения скоростей, крышки подшипников и др.

В рамках одного ремонтного завода следует выделять участки восстановления деталей, взятых с комплексных участков ремонта отдельных агрегатов. Производительность труда на таких участках в 1,5–1,8 раза выше, а себестоимость на 20–30 % ниже, чем на комплексных.

Обоснована рентабельность восстановления изношенных деталей с достижением послеремонтной наработки агрегатов, включающих эти детали, не уступающих наработке до предельного состояния новых агрегатов. Стоимость восстановления отдельных деталей составляет 8–60 % от цены новых изделий.

Таблица

Отношение затрат $Z_{в.д}$ на восстановление основных деталей двигателей к цене новых деталей Цн.д

Деталь	Основные восстановительные операции	Зв.д/Цн.д
Блок цилиндров	Развертывание отверстий под толкатели, шлифование стыков крышек коренных опор, хонингование опор	0,20–0,30
	Развертывание отверстий под толкатели, наплавка (напыление) и растачивание коренных опор	0,30–0,50
Головка цилиндров	Замена втулок клапанов, их развертывание	0,15–0,20
Гильза цилиндра	Растачивание и хонингование под ремонтный размер	0,10–0,15
	Установка листовой дополнительной ремонтной детали, хонингование под номинальный размер	0,25–0,30
Поршень	Шлифование юбки, развертывание отверстия под поршневой палец, нанесение оловянного покрытия	0,10–0,30
Поршневой палец	Термопластическая раздача, шлифование	0,20–0,25
	Хромирование, шлифование	0,30–0,45
Шатун	Замена втулки, железнение поверхности нижней головки, обработка резанием поверхностей отверстий	0,40–0,60
Коленчатый вал	Шлифование и полирование шеек под ремонтные размеры	0,08–0,15
	Наплавка (напыление) шеек, их точение, шлифование и полирование под номинальные размеры	0,35–0,50
Вкладыши коленчатого вала	Растачивание под предыдущий ремонтный (номинальный) размер	0,10–0,15
Распределительный вал	Шлифование шеек под ремонтные размеры и кулачков «как чисто»	0,08–0,12
	Наплавка шеек и их шлифование под номинальные размеры, газопламенная наплавка кулачков и их шлифование	0,35–0,45

ЛИТЕРАТУРА

1. Восстановление и упрочнение деталей, 2013, (под ред. Ф.И. Пантелеев), Издательство «Наука и технология», Москва.
2. Иванов В.П. Обеспечение нормативной послеремонтной надежности коленчатых валов, Инновации в отрасли народного хозяйства, как фактор решения социально-экономических проблем современности, 2015, Институт непрерывного образования, Москва.

УДК 658.512

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КАФЕДРЫ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА ВИТЕБСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА В ОБЛАСТИ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*В.И. ОЛЬШАНСКИЙ, В.В. ПЯТОВ, С.С. КЛИМЕНКОВ, Н.В. БЕЛЯКОВ,
Ю.Е. МАХАРИНСКИЙ, С.В. ЖЕРНОСЕК, А.С. КОВЧУР, И.С. АЛЕКСЕЕВ,
И.А. ДОРОШЕНКО, Д.Г. ЛАТУШКИН, А.Н. ГОЛУБЕВ, Р.В. ОКУНЕВ*
Витебский государственный технологический университет, Беларусь

Описаны направления исследований кафедры в областях: САПР в машиностроении; оптимизации управления плоским врезным и профильным шлифованием; методики проектирования силовых шнековых машин для экструзии многофункциональных композиционных материалов; электроформования полимеров; технологий и оборудования для гидрокриогенной резки материалов; энергоэффективных технологий термической обработки и сушки изделий и материалов; технологий, оборудования, испытательных установок для материалов специального назначения; использования осадков химводоподготовки.

Основными научно-техническими направлениями исследований кафедры являются:

1. Методическое, алгоритмическое и программное обеспечение САПР в машиностроении. В рамках направления разработана и внедрена САПР ТП изготовления корпусных деталей металлорежущих станков. Система позволяет производить автоматизированное проектирование ТП изготовления корпусных деталей в автоматическом и диалоговом режимах или их сочетаниях; создавать и использовать базы данных функциональных модулей, комплексных технологических процессов, нормативно-справочной информации предприятий; формировать комплект стандартных технологических документов. Также в рамках направления разрабатывается СППР синтеза УСП позволяющая производить автоматизированное проектирование 3-d моделей компоновок УСП, их чертежей, а также технологических схем их сборки и разборки. Для разработки системы предложен ряд положений по модернизации теории базирования. Использование системы позво-

ляет: снижать временные затраты на подготовку производства; повысить качество продукции; собирать приспособления сборщиком невысокой квалификации.

2. Оптимизация управления плоским врезным и профильным шлифованием. В рамках направления разработаны: математические модели ограничений производительности, оценки глубины и суммарной интенсивности прижогов и процесса затупления шлифовального круга; аналитический метод оценки параметров граничного и ступенчатого алгоритмов управления рабочим циклом; способ оптимизации ступенчатого алгоритма управления рабочим циклом для различных условий шлифования; методы ускоренного экспериментального определения (на стенде и в процессе реализации рабочего цикла) параметров математических моделей производительности и тепловых ограничений для плоского врезного шлифования. Проведен анализ влияния условий шлифования на показатели ограничений производительности и результаты шлифования.

Разработано программное обеспечение для определения параметров шлифования, а также новое эффективное устройство для программной балансировки шлифовального круга на шпинделе плоскошлифовального станка. Разрабатывается методическое, алгоритмическое и программное обеспечение прогнозирования износа и правки шлифовальных кругов при зубошлифовании прецизионных зубчатых колес.

3. Методика проектирования силовых шнековых машин для экструзии многофункциональных композиционных материалов. В рамках направления разработана теоретическая модель процесса деформации пластичной среды шнеком и экструзионным инструментом, методики выполнения конструкторских расчетов по проектированию шнека и формующего инструмента и методики исследования физических и технологических свойств сжимаемых пластично-вязких сред. Практическая значимость выполненного проекта состоит в создании метода исследования триботехнических и реологических свойств пластифицированных композиций, методики выполнения конструкторских расчетов по проектированию шнека и формующего инструмента, разработке типовой технологической инструкции изготовления изделий из пластичных сред на шнековом экструдере, разработке документации на конструкцию шнекового экструдера. В настоящее время ведутся работы над созданием основанной на данной методике прикладной системы автоматизированного проектирования деталей и узлов шнековых машин.

4. Технологии и оборудование для гидрокриогенной резки материалов. В рамках направления начата разработка конструкции оборудования и технологии гидрокриогенной резки материалов. При гидроабразивной резке скорость истечения воды превышает скорость звука в 3...4 раза, давление составляет 300...600 МПа. Абразивные частицы в процессе ударного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью изнашиваются. Их рабочие грани затупляются, что приводит к необходимости частой смены абразивной суспензии. В разработках кафедры абразивные частицы в виде льда образуются непосредственно в струе воды в процессе ее охлаждения распыленным жидким азотом при температуре порядка -150°C . Размеры частиц льда, их содержание в струе определяется скоростями движения стру воды и распыления жидкого азот, а также их массами. Разрабатываемые технологии и оборудование позволяют существенно упростить и удешевить технологию резки материалов.

5. Электроформование полимеров. В рамках направления разработана установка электроформования полимеров, а также технология позво-

ляющая получать нетканые изделия из нановолокон для медицины и ветеринарии в качестве биосовместимого заменителя существующих перевязочных материалов при лечении ран и других повреждений кожи.

6. Энергоэффективные технологии термической обработки и сушки изделий и материалов в машиностроении, легкой и текстильной промышленности. В рамках направления разработаны научно-обоснованные методы интенсификации технологических процессов влажно-тепловой обработки и сушки материалов, при различных способах энергоподвода, обеспечивающие сокращение потребляемой энергии на единицу продукции, уменьшение массы и габаритных размеров сушильных установок, повышение качественных показателей материалов и изделий, предложены рекомендации по проектированию современного оборудования для термической обработки и сушки и выбору режимных параметров работы.

7. Технологии, оборудования, испытательных установок для материалов специального назначения. В рамках направления: разработан технологический процесс получения водотермостойкого материала для защитной одежды на основе полимерного покрытия трикотажного материала, получен опытный образец материала. Проведены экспериментальные исследования по теплофизическим и физико-механическим свойствам материала. Выполнены теоретические исследования процесса теплообмена горячей жидкой и газобразной среды с плоским пакетом материалов. Изготовлен макетный вариант водотермозащитного костюма. Проведена лабораторная и промышленная апробация принятых конструктивных и технологических решений.

8. Использование осадков химводоподготовки ТЭЦ. В рамках направления разработаны: технологии изготовления керамической терракотовой плитки с использованием техногенных продуктов химводоподготовки (ХВО) ТЭЦ, рекомендации по использованию добавки на основе осадков ХВО и муллитсодержащих отходов при изготовлении керамических клинкерных материалов, огнеупорных керамических материалов и керамической штукатурки.

Научные исследования выполнены в рамках ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы», «Информатика и космос, научное обеспечение защиты от чрезвычайных ситуаций», ГПНИ «Энергоэффективность», «Энергоэффективные технологии», РНТП «Инновационное развитие Витебской области» и др.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНЫХ БЕЗОПАСНЫХ РАССТОЯНИЙ ДО МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ (МГ)

В.Г. Калиниченко

ФТИ НАН Беларуси до 10.04.2020 г.

В п. 4.3 раздела 4 «Опасные факторы» методики [1] представлены из [8] рис. 1 для вероятности гибели людей в зависимости от расстояний до центра разрыва за счет метательного действия воздушной ударной волны при разрушении МГ и рис. 2 для вероятности частичного разрушения кирпичных (легких каркасных) зданий при разрушении МГ в зависимости от расстояний до центра разрыва. Эти факторы представляют опасность на расстоянии от 12 м до 80 м.

А в п. 4.5 методики [1] приведены критические расстояния для ситуации горения газа («Пожар в котловане»), составляющие при номинальном давлении PN 5,4 МПа (55 атм) для МГ диаметрами: 1200 мм – 95 м, 1000 мм – 75 м, 700 мм – 55 м, 500 мм – 45 м. Данные взяты из графика фирмы «Бритиш Газ» (рис. 1 [5] ниже) и соответствуют границе зоны абсолютного поражения (вероятности гибели человека $\geq 0,99$) от теплового потока у поверхности земли 32 кВт/м² возникшего пожара на МГ при экспозиции в 30–40 с! Очевидно, что эти расстояния не могут быть ориентиром безопасной эксплуатации МГ.

Но при этом избирательно не приведен рис. 2 [5, 8] (см. ниже) для вероятности гибели людей от их местоположения за счет термического воздействия «Пожара в котловане» при аварии на МГ. А данный фактор является самым опасным и дальнедействующим из всех при аварии на МГ!

В нормативных документах [5, 6, 7] рассматривается и другой сценарий «Струевое пламя» термического поражения людей при авариях на газопроводах.

Вероятностные характеристики аварий по обоим сценариям приведены в табл. 1 [5, 6, 7].

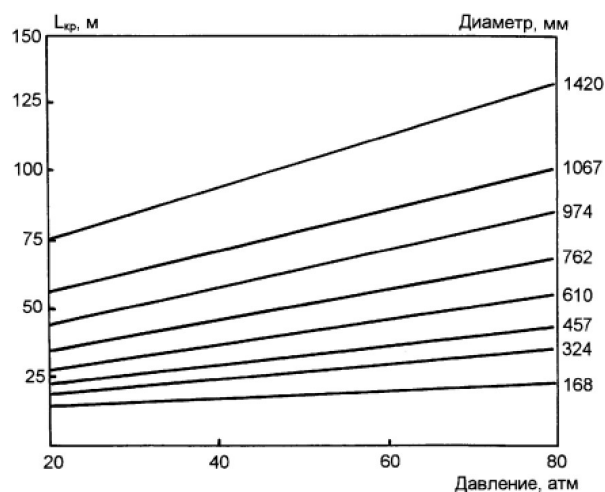


Рис. 1 [5]. Влияние технологических параметров газопроводов на размеры зон абсолютного термического поражения («Бритиш Газ»)

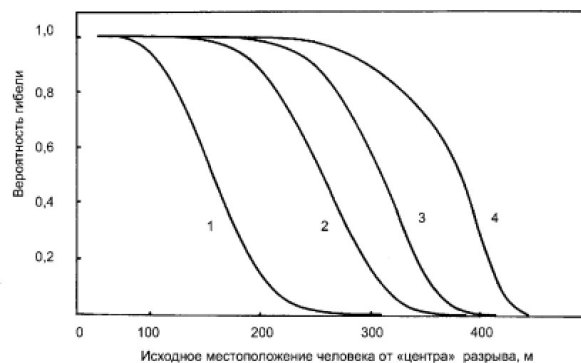


Рис. 2 [5, 8]. Вероятность гибели людей при разрывах газопроводов с возгоранием газа при покидании ими зоны опасности со скоростью $v = 2,5$ м/с, (1 - Dy700 мм, PN = 5,4 МПа; 2 - Dy1000 мм, PN = 5,4 МПа; 3 - Dy1200 мм, PN = 5,4 МПа; 4 - Dy1400 мм, PN = 7,5 МПа)

Табл. 1

Вероятностные характеристики аварий на МГ [5, 6, 7]

D_y , м	Условная вероятность загорания газа	Условная вероятность незагорания газа	Условная вероятность «Пожар в котловане»	Условная вероятность «Струевые пламена»
1,2	0,74	0,26	0,3	0,7
1,0	0,6	0,4	0,4	0,6
0,7	0,5	0,5	0,5	0,5
0,5	0,3	0,7	0,7	0,3

Были выполнены оценочные расчеты зон потенциального термического поражения человека при авариях на газопроводах по инженерной экспресс-методике [9, 10], учитывающей оба аварийных сценария. Рассчитываемые при этом характеристики аварии с пожаром на МГ показаны на рис. 3 [9, 10], а результаты расчетов приведены в табл. 2 и 3 (ниже).

Данная методика предполагает определение усредненного массового расхода газа из одного

конца аварийного газопровода G_{cp} , кг/с, зависящего только от давления газа в месте разрыва МГ до аварии P , атм и его внутреннего диаметра D , м. Для МГ диаметром D от 0,5 до 1,4 м, с учетом значительного «буферного» участка с газом в обе стороны, максимальное время теплового воздействия на реципиента составит до 4 минут без резкого снижения аварийного расхода газа [9, 10]. Ошибка расчетов по [9, 10] заявлена до $\pm 15\%$.

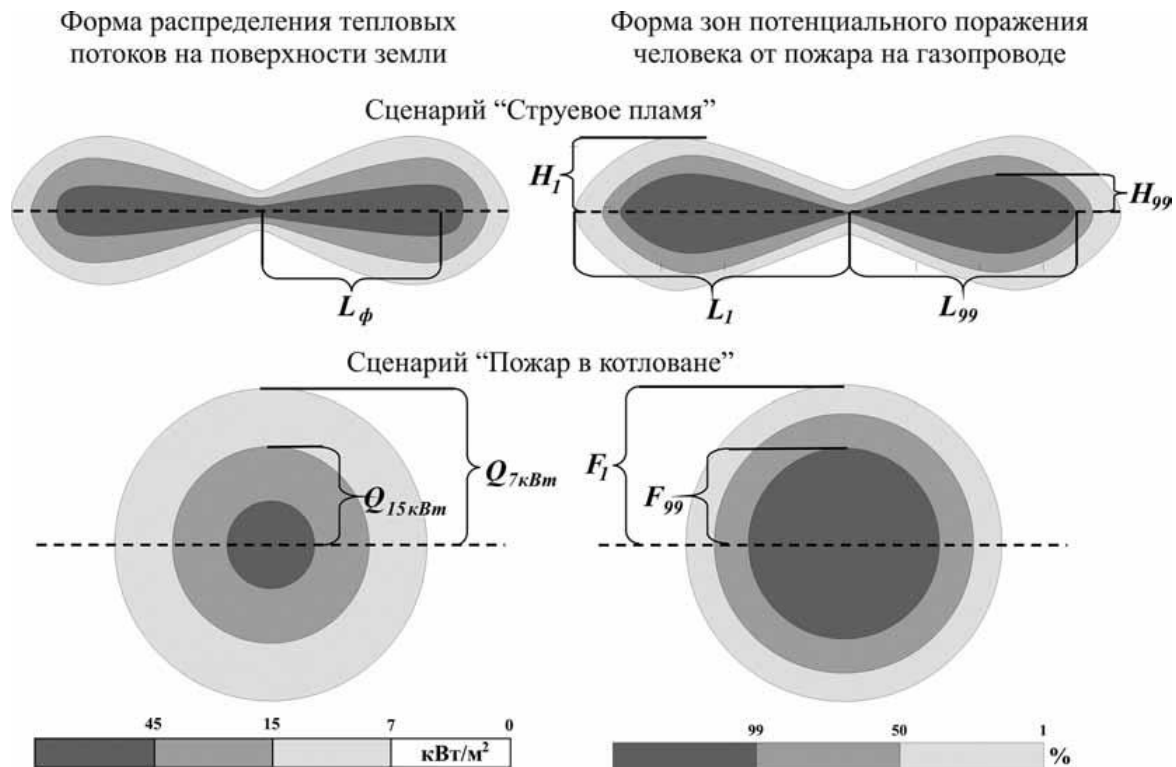


Рис. 3 [9, 10]. Рассчитываемые характеристики аварии с пожаром на МГ

Табл. 2

Результаты расчетов сценария «Пожар в котловане» по [9, 10]

D_y , м	P , атм	G_{cp} , кг/с	$P \times D^2$, атм \times м ²	$Q_{7кВт}$, м	$Q_{15кВт}$, м	F_{99} , м	F_1 , м
1,2	55	2105,6	79,2	294	179,5	190,5	346
1,0	55	1434,8	55,0	243,6	147,6	146,2	274
0,7	55	677,4	26,95	168,7	100,6	87,1	173,3
0,5	55	333,75	13,75	119,2	70,1	53,4	112,5

Обозначения:

$Q_{7кВт}$, $Q_{15кВт}$ – радиус круговой зоны с интенсивностью теплового потока соответственно ≥ 7 кВт/м² и ≥ 15 кВт/м²; F_{99} , F_1 – радиус зоны термического воздействия с вероятностью гибели человека, соответственно, $\geq 0,99$ и $\geq 0,01$, м.

Табл. 3

Результаты расчетов сценария «Струевое пламя» по [9, 10]

D_y , м	P , атм	G_{cp} , кг/с	$P \times D^2$, атм \times м ²	L_ϕ , м	L_{99} , м	H_{99} , м	L_1 , м	H_1 , м
1,2	55	2105,6	79,2	356	455	69,2	523,7	138,5
1,0	55	1434,8	55,0	302	377	52	435,6	109,6
0,7	55	677,4	26,95	218,7	261	29,9	303,8	69,3
0,5	55	333,75	13,75	161,3	184,5	17,7	216,3	45

Обозначения:

G_{cp} – усредненный массовый расход газа из одного конца аварийного газопровода, кг/с; $P \times D^2$ – технологический параметр аварийного газопровода; L_ϕ – длина факела, м; L_{99} , L_1 – полудлина зоны термического воздействия с вероятностью гибели человека соответственно $\geq 0,99$ и $\geq 0,01$, м; H_{99} , H_1 – полуширина зоны термического воздействия с вероятностью гибели человека, соответственно, $\geq 0,99$ и $\geq 0,01$, м.

Документами [2, 3] в примечании 4 к табл. 4 предусмотрены мероприятия, позволяющие сокращать минимальные безопасные расстояния до МГ. Сокращение минимальных расстояний на 30 % и на 50 % достигается применением вместо труб категории III, соответственно, труб категории II и категории В. Согласно [2, 3] и СНиП III–42–80*, после монтажа до начала эксплуатации сварные стыки участков МГ категорий В и I, II, III подвергаются радиографическому контролю, соответственно, в объеме 100 %, 25 %, 10 %.

В [11] на примере МГ DN1200, PN5,4 МПа были рассмотрены основные конструктивные отличия труб для него категорий В ($m = 0,6$), I–II ($m = 0,75$) и III ($m = 0,9$) из стали класса прочности K55. В скобках приведены соответствующие каждой категории значения коэффициента условий работы m . Для участков МГ категорий В, I–II, III имеем, соответственно, значения: расчетной толщины стенки d – 15 мм, 12 мм, 10 мм; коэффициента запаса прочности k – 2,58; 2,06; 1,72; отношения кольцевых напряжений к пределу текучести стали σ/σ_T^H – 0,58; 0,73; 0,88. При этом $k_B/k_{I-II} = 1,25$; $k_B/k_{III} = 1,5$. Там же приводилась и

обеспечиваемая категориями В, I–II, III частота отказов q , соответственно: до 10^{-8} год⁻¹ (невероятное событие), до 10^{-5} год⁻¹ (неправдоподобное событие), до 10^{-3} год⁻¹ (маловероятное событие).

Здесь можно отметить еще, что в США, Канаде, Австралии, мерами обеспечения безопасности МГ также предусматривается ограничение уровня расчетных кольцевых напряжений величиной $0,72 \pm 0,4$ (в Великобритании $0,72 \pm 0,3$) от нормативного предела текучести металла трубы, увеличение толщины ее стенки [11].

Методика [1] разрабатывалась по хозяйственному № 2015/191 от 27.11.2015 г. с заказчиком ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» с целью предложить альтернативный метод решения данной задачи, исключая замену на участке труб категории III на трубы категории II или В. В качестве корректирующих мероприятий на участке с трубами категории III для сокращения минимальных расстояний по разделу 6 методики [1] предлагается проведение только радиографического контроля 100 % кольцевых сварных стыков в сочетании с увеличенным объемом других методов неразрушающего контроля по сравнению с объемом кон-

троля, обычно выполняемого для возможности продления дальнейшего срока эксплуатации МГ.

Для сравнения результаты по минимальным безопасным расстояниям, полученные по методике [1], по СНиП 2.05.06–85 табл. 4.п. 1, по результатам точного расчета рис. 2 [5, 8] и из табл. 2 и 3 по методике [9, 10] сведены в общую табл. 4.

Рассматривая табл. 4 видно значительное отличие значений минимальных расстояний в первых 4-х строках таблицы от остальных строк таблицы. Стоит разобраться почему так получается.

Сразу возникает вопрос к автору методики [1], как им получено выражение для L_{\min} раздела 5, указанное в первых двух строках табл. 4? И именно с коэффициентом 15, а не больше и не меньше? Далее в этом выражении присутствует расчетный коэффициент f . В СНиП 2.05.06–85* [2] и СП 36.13330.2012 [3] такого названия коэффициента не существует. По значениям 0,72 и 0,6 этого коэффициента, а также значительному его влиянию на безопасность МГ и, соответственно, на минимальные расстояния – это знакомый по [2] и [3] коэффициент условий работы m для труб МГ. Данное название коэффициента характери-

зует его суть. Для МГ категорий I-II: $m = 0,75$, а категории В: $m = 0,6$. Тогда зачем он обозначен и назван иначе?

Этой «махинацией» обосновывается то, что при 100 % радиографическом контроле кольцевых сварных стыков с применением дополнительных методов неразрушающего контроля участок МГ III категории, возле которого «имеется 5 или менее зданий, где могут находиться люди» (класс местности 1) следует считать участком категории II, а если «имеется более 5 и менее 15 зданий, где могут находиться люди» (класс местности 2), то считать его участком категории В?! При этом уже нет необходимости на участке МГ делать переукладку на трубы с увеличенной толщиной стенки, о чем говорилось выше.

В строках 3 и 4 таблицы 4 выше указаны из таблицы 2 [1] минимальные расстояния до «отдельно стоящих жилых зданий одноэтажных и двухэтажных; садовых домиков, дач; гаражей и открытых стоянок для автомобилей индивидуальных владельцев...» для классов местности 1 (количество 5 и менее) и 2 (количество более 5 и менее 15). Результаты следуют из аналогичной махинации!

Табл. 4

№ п/п	Источник для сравнения	Минимальное расстояние от оси МГ, м			
		$D_y 500$	$D_y 700$	$D_y 1000$	$D_y 1200$
1	по [1] $L_{\min} = 15 \cdot \frac{DN}{1000} \cdot p_{\text{доп}} \cdot \frac{1}{f}$ $f = 0,72$ класс местности 1	90(-40%)	90(-55%)	112,5(-55%)	135(-55%)
2	по [1] $L_{\min} = 15 \cdot \frac{DN}{1000} \cdot p_{\text{доп}} \cdot \frac{1}{f}$ $f = 0,6$ класс местности 2	100(-33%)	100(-50%)	135(-46%)	162(-46%)
3	Табл. 2 Методики [1], класс местности 1	90(-40%)	100(-50%)	125(-50%)	150(-50%)
4	Табл. 2 Методики [1], класс местности 2	100(-33%)	125(-37,5%)	150(-40%)	175(-41,7%)
5	СНиП 2.05.06-85 Табл. 4, п. 1	150	200	250	300
6	«Пожар в котловане» по рис. 2 [5, 8] при $v = 2,5$ м/с и до (20÷10)% гибели людей	–	190÷210	295÷310	345÷360
7	«Пожар в котловане» по [9, 10] для $Q_{7\text{кВт}}$ номинальные значения ÷ с учетом ошибки расчета до +15%:	119 ÷ 137	168,7 ÷ 194	243,6 ÷ 280	294 ÷ 338
8	«Пожар в котловане» по [9, 10] для $F_{99} \geq 0,99$ номинальные значения ÷ с учетом ошибки расчета до +15%:	53,4 ÷ 61,4	87 ÷ 100,2	146 ÷ 168	190,5 ÷ 219

Примечание 1.

В скобках строк 1÷4 таблицы 4 у значений минимальных расстояний указан % их уменьшения относительно значений строки 5.

Более того, в примечании 4 к таблице 2 [1] оговорено: «при соответствующем обосновании и выполнении корректирующих мероприятий по разделу 7 допускается сокращать указанные в таблице 2 расстояния еще не более чем на 30 %». В разделе 7 [1] утверждается, что установка защитного стального полукольца-экрана на МГ существенно (по расчетам на 20–30 %?) уменьшает негативные последствия при возможном техногенном отказе (раскрытии) трубы газопровода. Но возникновение пожара при разрыве газопровода такой экран не может предотвратить! Запас прочности МГ он тоже не повышает, что следует из принципа ремонта МГ установкой стальных сварных муфт с обеспечением натяга!

При минимальных расстояниях указанных в строках 1÷4 таблицы 4 из рис. 2 [5, 8] (см. выше) следует, что вероятность гибели людей для класса местности 1 от термического воздействия пожара на МГ DN1200, DN1000 может составить до 100 %, для DN700 – до 95 %, а вероятность гибели людей для класса местности 2 – для МГ DN1200 – до 100 %, для МГ DN1000 – до 95 %, для МГ DN700 – до 85 %, что не допустимо! Это же подтверждают и результаты расчетов согласно [9, 10], приведенные в строке 8 таблицы 4!

Минимальные безопасные расстояния по результатам расчетов согласно [9, 10] для сценария «Пожар в котловане» могут быть заданы из интервала значений, соответствующих интенсивности теплового потока от 7 кВт/м², но не более 10,5 кВт/м².

Согласно ГОСТ Р 12.3.047–2012:

– при интенсивности теплового излучения 7 кВт/м² вертикального факела на человека без защиты специальной термостойкой одеждой он

испытывает непереносимую боль через 20÷30 с; ожог 1-й степени – через 15÷20 с; ожог 2-й степени – через 30÷40 с.

– при интенсивности теплового излучения 10,5 кВт/м² вертикального факела на человека без защиты специальной термостойкой одеждой он испытывает непереносимую боль через 3÷5 с; ожог 1-й степени – через 6÷8 с; ожог 2-й степени – через 12÷16 с.

В таблице 3 выше приведены результаты расчетов по методике [9, 10] для сценария «Струевое пламя» при котором зона термического воздействия характеризуется полудлиной L_{99} , L_1 и полушириной H_{99} , H_1 с вероятностью гибели человека, соответственно, $\geq 0,99$ и $\geq 0,01$, м.

На основании данных таблицы № 5.4 [12], для сценария «Струевое пламя» следует проводить расчеты с учетом отклонения осей двух струй газа от проектного положения оси МГ в горизонтальной плоскости на угол до $\pm 15^\circ$ для всех возможных вариантов: струи в разные стороны от оси МГ, струи в одну сторону от оси МГ. Проведение расчетов на термическое воздействие в этом случае необходимо как на рассматриваемом участке, так и на его границах.

ВЫВОДЫ

1. Сравнительный анализ двух методов для сценария «Пожар в котловане» показывает невозможность уменьшения минимальных безопасных расстояний указанных для МГ в [2, 3] без полного выполнения требований примечания 4 к таблице 4 данных документов.

2. При назначении минимальных безопасных расстояний до МГ $D_y 1200$, $D_y 1000$ и $D_y 700$ является обязательным учет и возможного сценария «Струевое пламя» при возникновении аварии на МГ.

ИСТОЧНИКИ

1. Методика «Определение корректирующих мероприятий с целью уменьшения зон минимальных расстояний отдельных участков магистральных газопроводов, протяженностью не более 1500 метров». Минск - 2016. -12 с.
2. СНиП 2.05.06-85* Магистральные трубопроводы. (С изменением № 1 от 8.01.1987 г., изменением № 2 от 03.07.1990 г. и требованиями к трубопроводам для транспортирования СУГ, действующими на территории Республики Беларусь с датой введения 2005-05-01). - 52 с.
3. СП 36.13330.2012 Свод правил. Магистральные трубопроводы (актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*). М. – 2013. -78 с.
4. В.С. Сафонов, П.Э. Одишария, А.А. Швыряев Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. М., 1996. -208 с.
5. Методические указания по проведению анализа риска при проектировании и эксплуатации опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром». Ответственные исполнители: В.С. Сафонов (д.т.н.), Г.Э. Одишария (д.т.н., проф.), А.А. Швыряев (к.х.н.) Методика согласована Госгортехнадзором России 09.12.2002 г. -385 с. (На их основе вышел документ СТО РД Газпром 39-1.10-084-2003 «Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром». Т. 1, 2 под грифом «Коммерческая тайна». Введен в действие распоряжением ОАО «Газпром» от 12.11.2003 г. № 269).

6. СТО Газпром 2-2.3-351-2009 Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром». (Вариант СТО РД Газпром 39-1.10-084-2003 в свободном доступе). -387 с.
7. СТО Газпром 2-2.3-400-2009 Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром». -332 с.
8. Опыт применения методологии анализа риска объектов газовой промышленности. В.С. Сафонов, С.В. Овчаров (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»), А.А. Швыряев (МГУ им. М.В. Ломоносова). Доклад на тематическом семинаре ДПБ-2008, 21-22.10.2008. М., НТЦ «Промышленная безопасность». -12 с.
9. Экспресс-методика оценки размеров зон потенциального поражения людей при авариях на газопроводах. В.С. Сафонов, А.В. Мельников, А.И. Чупин, Е.Н. Желтиков, Т.В. Митрофанова «Безопасность труда в промышленности» № 5, 2009, с. 66-69.
10. Инженерная методика оценки размеров зон негативного воздействия на людей и потенциального риска их гибели при авариях на магистральных газопроводах. А.В. Завгороднев (к.т.н.), А.В. Мельников (к.т.н.), В.С. Сафонов (д.т.н., проф.) «Безопасность жизнедеятельности», № 5, 2012, с. 45-48.
11. Об установлении минимальных безопасных расстояний до магистральных газопроводов. В.Г. Калиниченко ФТИ НАН Беларуси «Инженер-механик» № 2 (71) 2016, с. 26-30.
12. Руководство по безопасности. Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта газа. Утв. Приказом Ростехнадзора от 26.12.2018 № 647. -141 с.

УДК 69.05–82–229.384

ОБЪЁМНАЯ ГИДРОПЕРЕДАЧА МОНО-АГРЕГАТНАЯ НА БАЗЕ ШЕСТЕРЁННЫХ ГИДРОМАШИН

*Котлобай А.Я., Котлобай А.А.**Белорусский национальный технический университет*

Применение объёмных гидropередач (ОГП) в приводах ходового и технологического оборудования транспортно-тяговых и инженерных машин является одним из прогрессивных направлений. ОГП позволяет реализовать бесступенчатое регулирование скорости пневмоколесного и гусеничного движителя, расширяет возможности компоновочных решений [1], [2], [3]. Современные ОГП реализуются на базе аксиально-поршневых гидромашин. Одним из недостатков ГСТ является малый диапазон регулирования скорости вращения вала гидромотора. Для расширения диапазона регулирования скорости вращения вала гидромотора применяют регулируемые гидромоторы, существенно усложняя конструкцию ОГП [3]. При создании ряда технологических машин для привода ходового оборудования нашли применение гидростатические трансмиссии ГСТ-71, ГСТ-90 [4].

Современные ОГП реализуются на базе аксиально-поршневых гидромашин. Применение ОГП в приводах ходового и технологического оборудования удельная стоимость транспортно-технологических машин существенно нарастает. Это объясняется высокой удельной стоимостью и материалоёмкостью аксиально-поршневых гидромашин, при этом, наличие систем управления аксиально-поршневых гидромашин приводит к увеличению удельной стоимости и материалоёмкости.

При поиске альтернативных направлений развития ОГП транспортно-тяговых машин, анализ показал, что минимальной материалоёмкостью и удельной стоимостью обладают шестерённые гидромашин, широко используемые в системах отбора мощности на позиционирование и привод рабочих органов технологических машин [5], [6]. Для применения шестерённых гидромашин в приводах ходового оборудования транспортно-тяговых ма-

шин авторами предложено оснащение шестерённого насоса постоянного объёма гидрораспределительным модулем обеспечивающим изменение эффективного объёма насосного агрегата в составе шестерённого насоса постоянного объёма и гидрораспределительного модуля [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]. Также, расширение диапазона изменения скорости вращения вала гидромотора обеспечивается тандемированием шестерённых насосов [14], широко применяемым в системах отбора мощности на позиционирование и привод рабочих органов технологических машин

Рассмотрим пример реализации ОГП моноагрегатной на базе шестерённых гидромашин [15] (рис. 1).

ОГП включает двухсекционный шестерённый насос 1 постоянного объёма, гидрораспределительный модуль 2, шестерённый гидромотор 3 постоянного объёма, планетарный редуктор 4.

Первая секция шестерённого насоса 1 содержит шестерни 5, 6, образующие в корпусе 7 всасывающую 8 и напорную 9 полости. Вторая секция шестерённого насоса 1 содержит шестерни 10, 11, образующие в корпусе 7 всасывающую 12 и напорную 13 полости. Шестерни 5, 10 связаны с приводным валом 14. Геометрический объём первой секции шестерённого насоса 1 меньше геометрического объёма второй секции.

Гидрораспределительный модуль 2 обеспечивает регулирование эффективного объёма второй секции шестерённого насоса 1. Гидрораспределительный модуль 2 выполнен в корпусе 15, включает неподвижную распределительную втулку 16, подвижную распределительную втулку 17, установленную с возможностью поворота на угол 180°, и ротор 18, связанный с приводным валом 14.

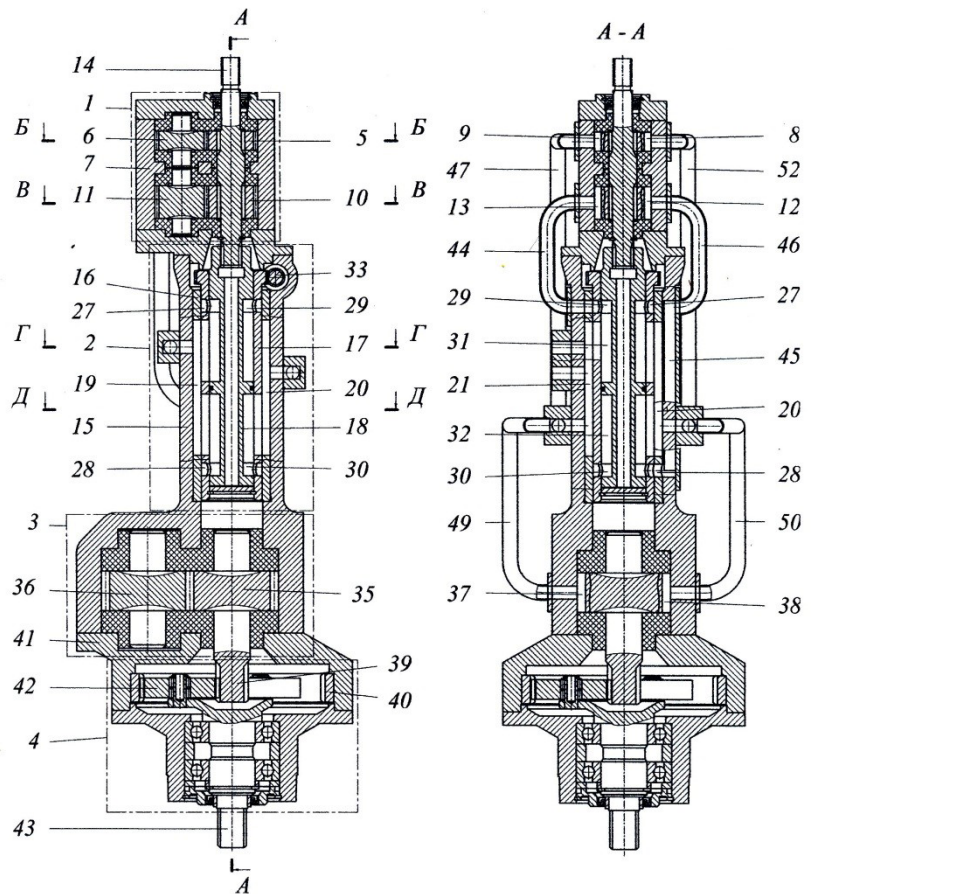


Рис. 1. ОГП моно агрегатная базе шестерённых гидромашин

На цилиндрической поверхности неподвижной распределительной втулки 16 образованы четыре сегментных пазов 19, 20, 21, 22 с центральными углами, составляющими $\approx 90^\circ$. Полости сегментных пазов 19, 21 и 20, 22 связаны попарно и подключены к контуру подпитки (не показан). На цилиндрической поверхности подвижной распределительной втулки 17 образованы четыре группы продольных каналов 23, 24 и 25, 26, и две кольцевые канавки 27, 28. На цилиндрической поверхности ротора 18 образованы две кольцевые канавки 29, 30 и, связанные с ними, две группы продольных каналов 31, 32. Кольцевые канавки 29, 30 образованы в зонах кольцевых канавок 27, 28 и связаны радиальными каналами. Для обеспечения поворота подвижная распределительная втулка 17 оснащена зубчатым венцом червячного зацепления. Привод червяка 33 осуществляется автономным двигателем 34.

Шестерённый гидромотор 3 постоянного объема содержит шестерни 35, 36, образующие в корпусе 15 полости 37, 38.

Планетарный редуктор 4 включает солнечную шестерню 39, выполненную заодно с шестерней 35, коронную шестерню 40, установленную в крышке 41, сателлиты 42, установленные на осях водила, выполненного заодно с ведомым валом 43.

Напорная полость 13 второй секции шестерённого насоса 1 связана трубопроводом 44 с полостью кольцевой канавки 27. Полость кольцевой канавки 28 связана каналом 45, трубопроводом 46 с всасывающей полостью 12.

Напорная полость 9 первой секции шестерённого насоса 1 связана трубопроводом 47, каналом 48 с полостью сегментного пазов 21, связанного с полостью сегментного пазов 19, и трубопроводом 49 с полостью 37 шестерённого гидромотора 3. Полость 38 шестерённого гидромотора 3 связана трубопроводом 50, каналом 51 с полостью сегментного пазов 20, связанного с полостью сегментного пазов 22, и трубопроводом 52 с всасывающей полостью 8 первой секции шестерённого насоса 1.

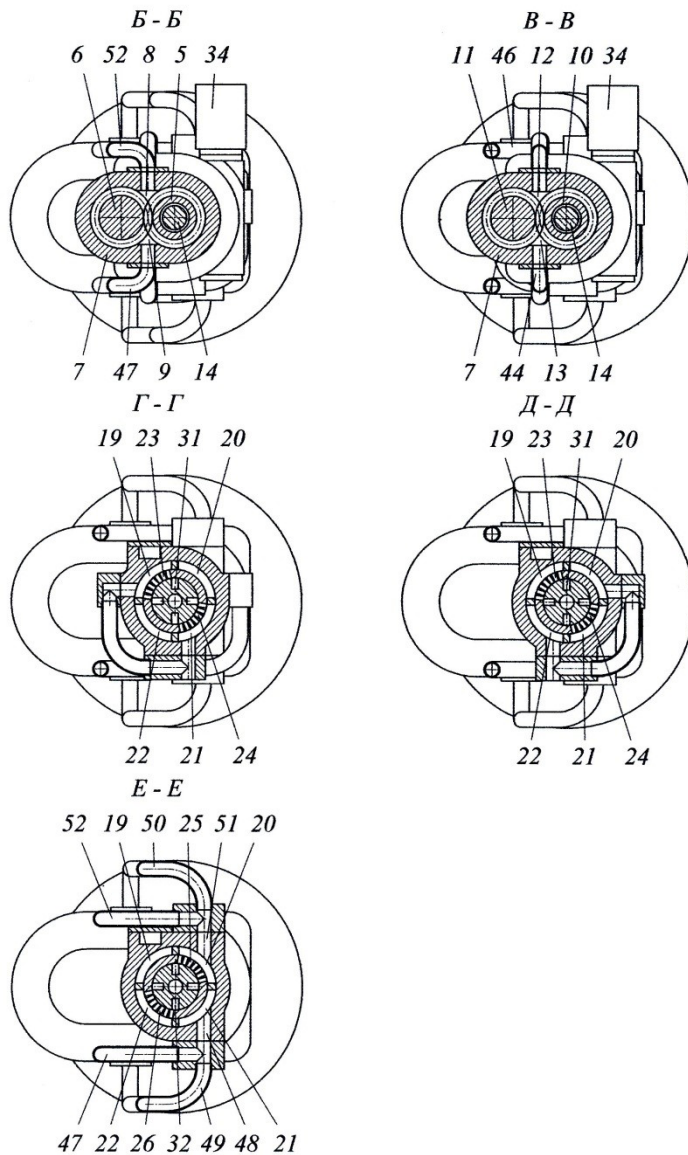


Рис. 1 (продолжение). ОГП моно агрегатная базе шестерённых гидромашин

При подготовке ОГП к работе контур подпитки (не показан) подключается к каналам, связанным с полостями сегментных пазов 19, 21 и 20, 22.

Приводной вал 14 вращается от двигателя (не показан), и приводит во вращение шестерни 5, 6 и 10, 11. Ротор 18 гидрораспределительного модуля 2 приводится во вращение от приводного вала 14. Во всасывающих полостях 8, 12 создается разрежение, а в напорных полостях 9, 13 – напор.

Гидрораспределительный модуль 2 перераспределяет поток рабочей жидкости из напорной полости 13 между полостями 37, 38 и всасывающей полостью 12 при повороте подвижной распределительной втулки 17. При постоянном конструктив-

ном объеме второй секции двухсекционного шестерённого насоса 1 эффективный объем второй секции будет формироваться как разность подачи рабочей жидкости второй секцией в полости 37, 38 и во всасывающую полость 12 при повороте приводного вала 14 на один оборот.

При исходном положении подвижной распределительной втулки 17 рабочая жидкость из полости 38 по трубопроводу 50, каналу 51 поступает в полости сегментных пазов 20, 22 и по продольным каналам 25, 26, 32 в полости кольцевых канавок 30, 28, и по каналу 45, трубопроводу 46 во всасывающую полость 12.

Из напорной полости 9 рабочая жидкость по трубопроводам 47, 49 поступает в полость 37 шестерённого гидромотора 3. Одновременно, рабочая жидкость из полости 38 шестерённого гидромотора 3 через трубопровод 50, канал 51 поступает в полости сегментных пазов 20, 22. Из полостей сегментных пазов 20, 22 рабочая жидкость по каналам групп продольных каналов 25, 26 поступает в полости продольных каналов 32 и кольцевых канавок 30, 28, далее, по каналу 45, трубопроводу 52 – во всасывающую полость 12. Из напорной полости 13 рабочая жидкость через трубопровод 44 поступает в полости кольцевых канавок 27, 29 и продольных каналов 31 ротора 18. Рабочая жидкость через продольные каналы 23, 24 поступает в полости сегментных пазов 19, 21, и по каналу 48, трубопроводу 49 – в полость 37 шестерённого гидромотора 3, вращая шестерни 35, 36 и солнечную шестерню 39 планетарного редуктора 4. Вращаются сателлиты 42 и ведомый вал 43. Направление вращения ведомого вала 56 противоположно направлению вращения приводного вала 14. В данном положении подвижной распределительной втулки 17 обеспечивается максимальный эффективный объем второй секции двухсекционного шестерённого насоса 1, максимальная подача рабочей жидкости в полость 37 шестерённого гидромотора 3, состоящая из постоянной подачи рабочей жидкости первой секцией двухсекционного шестерённого насоса 1 и максимальной подачи рабочей жидкости второй секцией двухсекционного шестерённого насоса 1. Скорость вращения ведомого вала 43 при заданной скорости вращения приводного вала 14 и

передаточное число объёмной гидропередачи без учета объёмного КПД гидромашин:

$$n_{43} = \frac{n_{14}k_1(k+k_2)}{i_4}, \quad i = \frac{i_4}{k_1(k+k_2)}, \quad (1)$$

где $i = \frac{n_{14}}{n_{56}}$ – передаточное число объёмной гидро-

передачи; $i_4 = \frac{n_{39}}{n_{43}} > 1$ – передаточное число пла-

нетарного редуктора 4; n_{14}, n_{39}, n_{43} – скорость вращения приводного вала 14, солнечной шестерни 39, ведомого вала 43; $k = q_{2\phi}/q_{2k}$ – коэффициент, характеризующий отношение текущих значений эффективного объёма и конструктивного объёма второй секции двухсекционного шестерённого насоса 1 с гидрораспределительным модулем 2; $q_{2\phi}, q_{2k}$ – эффективный объём и конструктивный объём второй секции двухсекционного шестерённого насоса 1 с гидрораспределительным модулем 2; $k_1 = q_{2k}/q_{3k}$ – коэффициент, характеризующий отношение конструктивных объёмов второй секции двухсекционного шестерённого насоса 1 и шестерённого гидромотора 3; q_{3k} – конструктивный объём шестерённого гидромотора 3 постоянного объёма; $k_2 = q_{1k}/q_{2k}$ – коэффициент, характеризующий отношение конструктивных объёмов первой и второй секций двухсекционного шестерённого насоса 1; q_{1k} – конструктивный объём первой секции двухсекционного шестерённого насоса 1.

При повороте подвижной распределительной втулки 17 посредством автономного двигателя 34 и червяка 33 на угол 45° , например, по часовой стрелке от исходного положения, половина продольных каналов 23, 24 переместятся в зоны сегментных пазов 20, 22, а половина останется в зоне сегментных пазов 19, 21. Также, половина продольных каналов 25, 26 переместятся в зоны сегментных пазов 21, 19, а половина продольных каналов 25, 26 останется в зоне сегментных пазов 20, 22.

Режим работы первой секции двухсекционного шестерённого насоса 1 не изменяется, поскольку всасывающая полость 8 постоянно связана с полостью 38, а напорная полость 9 – с полостью 37.

Движения рабочей жидкости в магистралях шестерённого гидромотора 3, обеспеченного второй секцией двухсекционного шестерённого насоса, нет. В данном положении подвижной распределительной втулки 17 обеспечивается минимальный (нулевой) эффективный объём второй секции двухсекционного шестерённого насоса 1 и минимальная (нулевая) подача рабочей жидкости в напорную магистраль шестерённого гидромотора 3. При

нулевой подаче второй секции движение рабочей жидкости в полостях 37, 38 обеспечивается первой секцией двухсекционного шестерённого насоса 1. Частота вращения ведомого вала 43 и передаточное число объёмной гидропередачи определяются выражением (1) при значении коэффициента $k = 0$.

При повороте подвижной распределительной втулки 17 посредством автономного двигателя 34 и червяка 33 на угол 90° по часовой стрелке от исходного положения, продольные каналы 23, 24 переместятся в зоны сегментных пазов 20, 22, а продольные каналы 25, 26 – в зоны сегментных пазов 19, 21.

Режим работы первой секции двухсекционного шестерённого насоса 1 не изменяется, поскольку всасывающая полость 8 постоянно связана с полостью 38, а напорная полость 9 – с полостью 37.

В данном положении подвижной распределительной втулки 17 подача рабочей жидкости второй секции двухсекционного шестерённого насоса 1 реверсирована. Обеспечивается максимальный эффективный объём второй секции двухсекционного шестерённого насоса 1. При конструктивных объёмах первой и второй секций двухсекционного шестерённого насоса 1 постоянного объёма $k_2 < 1$, направление вращения ведомого вала 43 совпадает с направлением вращения приводного вала 14. Скорость вращения ведомого вала 43 и передаточное число объёмной гидропередачи без учёта объёмного КПД гидромашин:

$$n_{43} = \frac{n_{14}k_1(-k+k_2)}{i_4}, \quad i = \frac{i_4}{k_1(-k+k_2)}, \quad (2)$$

Параметры режима работы (1), (2) объёмной гидропередачи приведены в табл. 1.

Анализ показывает, что изменяя параметры составляющих ОГП можно получить нужный диапазон изменения передаточного числа при изменении эффективного объёма двухсекционного шестерённого насоса 1 постоянного объёма.

Поворачивая подвижную распределительную втулку 17 гидрораспределительного модуля 2 на необходимый угол относительно заданного положения посредством автономного двигателя 34 и червяка 33, обеспечиваем реверсирование подачи второй секции двухсекционного шестерённого насоса 1 при изменении подачи от нулевого до максимального значений. Это позволяет осуществить плавное изменение скорости вращения ведомого вала 43 в диапазоне прямого хода и реверса. Диапазон изменения определяется соотношением основных параметров секций двухсекционного шестерённого насоса 1, шестерённого гидромотора 3, планетарного редуктора 4.

Передаточное число ОГП

		<i>k</i>							
<i>k₂</i>	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,6	1,0
<i>i(k₁ = 0,2; i₄ = 1)</i>									
0,8	-25,0	∞	25,0	12,5	8,3	6,3	5,0	3,6	2,8
0,6	-12,5	-25,0	∞	25,0	12,5	8,3	6,3	4,2	3,1
0,4	-8,3	-12,5	-25,0	∞	25,0	12,5	8,3	5,0	3,6
0,2	-6,3	-8,3	-12,5	-25,0	∞	25,0	12,5	6,3	4,2
<i>i(k₁ = 0,2; i₄ = 2)</i>									
0,8	-50,0	∞	50,0	25,0	16,7	12,5	10,0	13,2	5,6
0,6	-25,0	-50,0	∞	50,0	25,0	16,7	12,5	8,3	6,3
0,4	-16,7	-25,0	-50,0	∞	50,0	25,0	16,7	10,0	7,1
0,2	-12,5	-16,7	-25,0	-50,0	∞	50,0	25,0	12,5	8,3
<i>i(k₁ = 0,2; i₄ = 3)</i>									
0,8	-75,0	∞	75,0	37,5	25,0	18,8	15,0	10,7	8,3
0,6	-37,5	-75,0	∞	75,0	37,5	25,0	18,8	12,5	9,4
0,4	-25,0	-37,5	-75,0	∞	75,0	37,5	25,0	15,0	10,7
0,2	-18,8	-25,0	-37,5	-75,0	∞	75,0	37,5	18,8	12,5
<i>i(k₁ = 0,4; i₄ = 1)</i>									
0,8	-12,5	∞	12,5	6,3	4,2	3,1	2,5	1,8	1,4
0,6	-6,3	-12,5	∞	12,5	6,3	4,2	3,1	2,1	1,6
0,4	-4,2	-6,3	-12,5	∞	12,5	6,3	4,2	2,5	1,8
0,2	-3,1	-4,2	6,3	-12,5	∞	12,5	6,3	3,1	2,1
<i>i(k₁ = 0,4; i₄ = 2)</i>									
0,8	-25,0	∞	25,0	12,5	8,3	6,3	5,0	3,6	2,8
0,6	-12,5	-25,0	∞	25,0	12,5	8,3	6,3	4,2	3,1
0,4	-8,3	-12,5	-25,0	∞	25,0	12,5	8,3	5,0	3,6
0,2	6,3	-8,3	-12,5	-25,0	∞	25,0	12,5	6,3	4,2
<i>i(k₁ = 0,4; i₄ = 3)</i>									
0,8	-37,5	∞	37,5	18,8	12,5	9,4	7,5	5,4	4,2
0,6	-18,8	-37,5	∞	37,5	18,8	12,5	9,4	6,3	4,7
0,4	-12,5	-18,8	-37,5	∞	37,5	18,8	12,5	7,5	5,4
0,2	-9,4	-12,5	-18,8	-37,5	∞	37,5	18,8	9,4	6,3
<i>i(k₁ = 0,6; i₄ = 1)</i>									
0,8	-8,3	∞	8,3	4,2	2,8	2,1	1,7	1,2	0,9
0,6	-4,2	-8,3	∞	8,3	4,2	2,8	2,1	1,4	1,0
0,4	-2,8	-4,2	-8,3	∞	8,3	4,2	2,8	1,7	1,2
0,2	-2,1	-2,8	-4,2	-8,3	∞	8,3	4,2	2,1	1,4
<i>i(k₁ = 0,6; i₄ = 2)</i>									
0,8	-16,7	∞	16,7	8,3	5,6	4,2	3,3	2,4	1,9
0,6	-8,3	-16,7	∞	16,7	8,3	5,6	4,2	2,8	2,1
0,4	-5,6	-8,3	-16,7	∞	16,7	8,3	5,6	3,3	2,4
0,2	-4,2	-5,6	-8,3	-16,7	∞	16,7	8,3	4,2	2,8
<i>i(k₁ = 0,6; i₄ = 3)</i>									
0,8	-25,0	∞	25,0	12,5	8,3	6,3	5,0	3,6	2,8
0,6	-12,5	-25,0	∞	25,0	12,5	8,3	6,3	4,2	3,1
0,4	-8,3	-12,5	-25,0	∞	25,0	12,5	8,3	5,0	3,6
0,2	-6,3	-8,3	-12,5	-25,0	∞	25,0	12,5	2,8	4,2

Применение простых и мало материалоемких насосного агрегата в составе шестерённого насоса и гидрораспределительного модуля 2 и шестерённого гидромотора 3 позволит существенно уменьшить сложность и материалоемкость ОГП. Применение в составе ОГП двухсекционного шестерённого насоса 1 с регулированием

эффективного объёма одной секции позволяет существенно увеличить диапазон изменения скоростей ведомого вала 43 при заданной скорости приводного вала 14 и диапазон изменения передаточных чисел ОГП при необходимом соотношении передаточных чисел ОГП прямого хода и реверса.

Список литературы

1. Леонович, И.И. Машины для строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог: учебник / И.И. Леонович, А.Я. Котлобай. – Мн.: БНТУ, 2005. – 552 с.
2. Кондратьев, С.В. Машины инженерного вооружения: учебное пособие : учебное пособие для студентов и курсантов учреждений высшего образования по направлению специальности 1-36 11 01-04 «Подъемно-транспортные, строительные дорожные машины и оборудование (управление подразделениями инженерных войск)» : в 3 ч. / С. В. Кондратьев, А.Я. Котлобай, А.М. Витковский, А.Ю. Рогов ; под общ. ред. Ю. Ш. Юнусова. – Минск : БНТУ, 2015 – Ч. 1: Общая характеристика машин инженерного вооружения, средства инженерной разведки, устройства минно-взрывных заграждений и преодоления заграждений. – 2015. – 376 с.
3. Петров, В.А. Гидрообъемные трансмиссии самоходных машин / В.А. Петров. – М.: Машиностроение, 1988. – 248 с.
4. ГСТ-71, ГСТ-90. Гидростатические трансмиссии. Устройство и принцип действия. ОАО «Пневмостроймашина». – Екатеринбург, 10/2009. – 17 с.
5. Котлобай, А.Я. Снижение материалоемкости приводов рабочего оборудования траншейно-котлованной машины / А.Я. Котлобай, А.А. Котлобай, А.И. Герасимюк, В.Ф. Тамело, В.В. Грубеляс // Инженер-механик. – 2017. №1 (74). – С. 10–17.
6. Котлобай, А.А. Направления снижения материалоемкости приводов оборудования дорожно-строительных машин / А.А. Котлобай // Автомобильные дороги и мосты. – 2019. № 1 (23). – С. 73 – 83.
7. Насос шестеренный: пат. 12072 U, Республика Беларусь, МПК F 15B 11/00 (2006.01) / А.И. Герасимюк, С.И. Воробьёв, Е.А. Есмантович, А.Я. Котлобай, А.А. Котлобай (BY). № u 20190067; заявл. 2019.03.21; опубл. 2019.08.30 // Афiцыйны бюл. Нац. центр iнтелектуал. уласнасцi. – 2019. – № 4.
8. Насос шестеренный: пат. 12158 U, Республика Беларусь, МПК F 15B 11/00 (2006.01) / А.И. Герасимюк, С.И. Воробьёв, Д.И. Кузнецов, А.Я. Котлобай, А.А. Котлобай (BY). № u 20190068; заявл. 2019.03.21; опубл. 2019.12.30 // Афiцыйны бюл. Нац. центр iнтелектуал. уласнасцi. – 2019. – № 6.
9. Котлобай, А.Я. Модульное построение насосов гидравлических приводов инженерных машин / А.Я. Котлобай, А.А. Котлобай, А.И. Герасимюк, Ю.Ш. Юнусов, Д.В. Быковский // Инженер-механик. – 2018. №4 (81). – С. 12–18.
10. Котлобай, А.Я. Насосы шестерённые регулируемые гидравлических приводов инженерных машин / А.Я. Котлобай, А.А. Котлобай // Инженер-механик. – 2020. №1 (86). – С. 10–14.
11. Котлобай, А.Я. Модернизация шестеренных насосов приводов оборудования инженерных машин / А.Я. Котлобай, А.А. Котлобай // Инженер-механик. – 2019. №4 (85). – С. 17–20.
12. Насос шестеренный: пат. 12072 U, Республика Беларусь, МПК F 15B 11/00 (2006.01) / А.И. Герасимюк, С.И. Воробьёв, Е.А. Есмантович, А.Я. Котлобай, А.А. Котлобай (BY). № u 20190067; заявл. 2019.03.21; опубл. 2019.08.30 // Афiцыйны бюл. Нац. центр iнтелектуал. уласнасцi. – 2019. – № 4.
13. Котлобай, А.Я. Насосы шестеренные регулируемые гидравлических приводов оборудования инженерных машин / А.Я. Котлобай, А.А. Котлобай // Инженер-механик. – 2020. №1 (86). – С. 10–14.
14. Котлобай, А.Я. Объёмная гидropередача отдельно агрегатная на базе двухсекционных шестеренных гидромашин / А.Я. Котлобай, А.А. Котлобай // Инженер-механик. – 2019. №3 (84). – С. 5–9.
15. Котлобай, А.Я. Гидродифференциальная передача привода ходового оборудования мобильных машин на базе шестеренного насоса / А.Я. Котлобай, А.А. Котлобай, А.И. Герасимюк, Ю.Ш. Юнусов // Инженер-механик. – 2019. №2 (83). – С. 2–8.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ СБОРА И ДОСТАВКИ ТКО

А.В. Вавилов, И.В. Бурмак

Белорусский национальный технический университет

До недавнего времени в окрестностях г. Минска функционировали три полигона для захоронения ТКО:

1. Полигон «Северный» (рис. 1)

Расположен на севере Минска в нескольких километрах от МКАД на площади 23,4 га. Данный полигон эксплуатировался с 1981 г. по 1 октября 2017 г. и в связи с исчерпанием ресурса был закрыт. За это время на полигоне накопилось 66,5 миллиона кубов мусора, при этом высота мусорной насыпи достигла 85 метров. В 2013 году на «Северном» открыли электростанцию мощностью 5,6 МВт для получения электроэнергии из биогаза (метана).

2. Полигон «Прудичье» (рис. 2)

Предназначен для захоронения производственных и строительных отходов и расположен на юге Минска недалеко от микрорайона Чижовка на территории площадью 22 га. Данный полигон эксплуатировался с 1968 г. и в конце 2019 г его эксплуатация была прекращена. За это время на

полигоне накопилось 22,3 миллиона кубов мусора, при этом высота мусорной насыпи достигла 75 метров.

3. Полигон «Тростенецкий» (рис. 3)

«Тростенецкий» – самый молодой полигон, сданный в эксплуатацию в 2007 г. и расположенный на площади 33 га. Он поделен на два участка: первый работал с 2007 по 2016 год, после чего был законсервирован; второй участок заполняется по настоящее время, при этом привозимый сюда мусор частично сортируется путем отбора макулатуры, пластика, стекла и т.д. бригадой рабочих. В дальнейшем планируется развитие данного полигона за счет строительства предприятий по сортировке и переработке твердых коммунальных отходов.

Однако уже через несколько лет работы свободное место на «Тростенецком» закончится и тогда, если говорить о перспективе, очевидно, что даже с учетом рачительного отношения к бытовым отходам строительство нового полигона для



Май 2018 г

Январь 2020 г

Рис. 1. Полигон «Северный»



Сентябрь 2018

Май 2019

Рис. 2. Полигон «Прудитше»



Рис. 3. Полигон «Тростенецкий»

Минска неизбежно. Одновременно с этим, необходимо менять и отношение граждан к выбросу мусора, т.е. если в контейнер для вторсырья попадают только «нужные» отходы (бумага, пластик, стекло), то работники сортировочного завода могут извлекать до 50 % полезных материалов, но пока же из-за того, что граждане выбрасывают туда все подряд, спасти удастся около 14 %.

Вывод: на данный момент времени столицу и часть Минского района обслуживает только один полигон ТКО, свободные площади на котором тают катастрофически быстро. Поэтому для снижения нагрузки на данный полигон необходимо:

1) осуществлять сортировку ТКО (начиная с граждан) и в дальнейшем перерабатывать во вторичные востребованные продукты; при этом за-

траты на сбор и переработку таких отходов должны быть минимально возможными.

2) строить новые полигоны с учетом современных экологических стандартов. Главным недостатком данного варианта является большая отдаленность свалок от городской территории, т.е. увеличение плеча доставки, что вызывает необходимость в модернизации ныне существующей одноэтапной системы сбора и транспортирования ТКО с целью снижения финансовых затрат.

Одноэтапная система сбора и транспортирования ТКО (рис. 4) функционирует следующим образом:

1) Организация временного хранения ТКО в несменяемых контейнерах объемом 0,75 м³; количество контейнеров должно быть пропорционально количеству жильцов, их обслуживающих;

2) Доставка ТКО с территорий домовладений на мусорные полигоны посредством мусоровозного транспорта. Каждый мусоровоз движется согласно индивидуальному маршрутному графику по своим адресам (пунктам сбора), количество которых варьируется примерно от 30 до 80; различно также и количество контейнеров в данных пунктах, их может быть как 1...2 для мелких организаций, школ и т.д., так и в разы больше – ЖЭУ, общежития и т.д.;

При средней плотности ТКО (100...200 кг/м³) для полной загрузки одного мусоровоза с объемом кузова около 15,5 м³ требуется около 60...70 контейнеров объемом 0,75 м³. В среднем, за один рабочий день одним мусоровозом вывозится около 12 тонн ТКО, т.е. для выполнения всего объема работ один водитель совершает 3 рейса до мусорного полигона.

Одноэтапная система сбора и транспортирования ТКО с несменяемыми контейнерами

Организация временного хранения ТКО в контейнерах объемом 0,75 м³



Мусоровоз МБ-15 с механизированной боковой загрузкой кузова объемом 15,5 м³ с помощью гидроманипулятора

Рис. 4. Одноэтапная система сбора и транспортирования ТКО

На территории г. Минска сбором и вывозом ТКО занимаются несколько организаций. Одной из них является УП «Спецкоммунавтотранс», в котором эксплуатируется ряд мусоровозов с механизированной боковой загрузкой кузова с помощью гидроманипулятора:

МАЗ-5902А2-390 (рис. 5);

МБ-15 (рис. 6);

МАЗ-490343-390 (рис. 7).

Основные показатели рассматриваемых мусоровозов приведены ниже в табл. 1.



Рис. 6. Мусоровоз МБ-15



Рис. 5. Мусоровоз МАЗ-5902А2-390



Рис. 7. Мусоровоз МАЗ-490343-390

Табл. 1

Основные показатели мусоровозов с механизированной боковой загрузкой кузова с помощью гидроманипулятора УП «Спецкоммунавтотранс»

Марка мусоровоза Основные параметры	МАЗ-5902А2-390	МБ-15	МАЗ-490343-390
Емкость кузова, м ³	18,5	15,5	10
Коэффициент уплотнения при плотности ТКО 135 кг/м ³	4	3	4
Максимальная скорость с грузным кузовом, км/ч	60	60	60
Масса полная, кг	19000	16000	10100
Габаритные размеры, мм	6670x2630x3600	7650x2550x3750	5900x2500x3400

Предлагается усовершенствовать рассмотренную выше систему сбора и доставки ТКО. Совершенствование должно идти в следующем направлении. Учитывая, что сбор ТКО во дворах затруднен из-за стоянки личного транспорта, базовая машина для сбора должна быть легко проезжаемой и маневренной во дворах. Технологическая ее часть должна иметь бункер для сбора ТКО, манипулятор для захвата контейнера и выгрузки из него содержимого, а также устройства для уплотнения выгружаемого в контейнер ТКО.

Все перечисленные конструктивные особенности имеют вышерассмотренные машины, эксплуатируемые в УП «Спецкоммунавтотранс». Но учитывая то, что вместимость кузова таких машин невелика (табл. 1), а транспортировать ТКО придется в недалеком будущем все дальше и даль-

ше от города на несколько десятков километров, возникает необходимость в оборудовании промежуточного пункта сбора ТКО (рис. 8) и перегрузки таких отходов в контейнеры объемом свыше 30 м³ большегрузных транспортных автомобилей, оборудованных системой «Мультилифт» с крюковым захватом. Тогда транспортная составляющая не будет серьезно ощутимой при постоянно растущем плече доставки ТКО к местам хранения или переработки.

Еще большую массу ТКО можно перевозить на таких машинах, если на промежуточных пунктах сбора ТКО использовать устройства для уплотнения отходов (пресс) внутри контейнеров.

В качестве транспортных мусоровозов можно использовать машины как отечественных, так и зарубежных производителей (табл. 2).

Двухэтапная система сбора и транспортирования ТКО с перегрузочным пунктом



Рис.8. Двухэтапная система сбора и транспортирования ТКО с перегрузочным пунктом

Табл. 2

Основные показатели транспортных мусоровозов, оборудованных системой «Мультилифт»

Основные параметры	Марка	МАЗ-6950С5- 1104000-001	PALFINGER PH T20Pi
Базовое шасси		МАЗ-6312С5-0008529-012	КАМАЗ 6520-3072-73
Грузоподъемность, кг		14800	20000
Емкость кузова, м³		34	36
Двигатель		ЯМЗ-53603 (Евро-5)	КАМАЗ 740.73-400 (Е-4)
Максимальная транспортная скорость, км/ч		85	90
Масса снаряженная, кг		15600	12850
Габаритные размеры, мм		9900×2550×4000	6600×1900×2000

Вывод

Внедрение данной технологии позволит повысить эксплуатационную производительность

комплекта машин для сбора и транспортирования ТКО, и, следовательно, снизить расходы на их эксплуатацию.

Литература

- Щемелев, А.М. Машины для коммунального хозяйства / А.М. Щемелев, А.В. Вавилов, В.М. Пилипенко; под ред. А.М. Щемелева. – Минск: НПО «Стринко», 2003. – 375 с.
- Вавилов, А.В. Сбор ТКО должен стать эффективным / А.В. Вавилов // Живи как хозяин. – 2015. – № 11. – С. 84–85.
- Шубов, Л.Я. Технологии отходов (Технологические процессы в сервисе): Учебник / Л.Я. Шубов, М.Е. Ставровский, Д.В. Шехирев. – ГОУВПО «МГУС». – М., 2006. – 411 с.
- <https://www.google.com/maps/place/>
- <http://www.kommashpro.ru/musorovozy-s-bokovoi-zagruzkoj/osipovichskii-zavod-kommash-mb-15>
- <http://maz-55.ru/shop/spectehnika/mysorovoz-maz-s-bokovoi-zagruzkoj/%D0%BC%D0%B0%D0%B7-490343-390/>

НОВЫЕ ДВИЖИТЕЛИ ВОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Северянин В.С.

Брестский государственный технический университет

Введение

Двигатель – это устройство для преобразования работы двигателя или другого источника энергии в механическую энергию движения транспортных объектов. При перемещении на или в воде движителями являются вёсла, паруса, гребные колёса, винты, водомёты. Транспортное средство – суда различного типа и конструкции. Двигатель представляет собой отдельный элемент общей схемы судна, скомпонованный определённым образом с двигателем, корпусами, передаточными механизмами, органами управления движением. Многообразие движителей обусловлено условиями обеспечения движения, энерговооружённостью, материальными затратами. В историческом обзоре можно найти множество образцов таких устройств – от простого весла до управляемых компьютером аппаратов. Однако природа, животный мир в результате неисчислимых вариантов создали способы и приёмы движения, существующие миллионы лет, которые являются базой для подражания в технике. Ниже даётся краткое описание некоторых принципиальных схем движителей, аналогами которых в живой природе проявляются такие организмы как дельфины, кальмар, медуза. Эти предложения изготовлены и опробованы в макетном исполнении и показали реальную возможность создания принципиально новых типов движителей. Новизна и полезность идеи подтверждается патентной защитой.

Двигатель «Дельфин»

Движение в воде дельфинов, как и большинства рыбообразных животных, осуществляется благодаря периодическим взмахам хвоста (плавники и изгибы тела менее энергичны). Гидродинамика явления заключается в волнообразном отталкивании от массы воды. При этом горизонтальная составляющая усилия и движения существенно превосходит вертикальную благодаря «конструкции» хвоста и некоторым другим особенностям. Так достигается скоростное плавание.

На рис. 1 показана принципиальная схема реализации такого движения, т.е. механического аналога дельфина. Основное отличие – использование не гибкого мускулистого тела, а плоской твёрдой пластины (для упрощения и удешевления устройства). Такие колеблющиеся, поворачивающиеся пластины имитируют взмахи хвоста и изгибы тела. Реализуется движущая волна и отталкивание на конце (здесь - справа). Для колебания пластин применяется (не показанный на чертеже) любой энергоисточник – двигатель или какой-то внешний механизм.

Пластины 1 (оргстекло, пластик, алюминий и т.п.), здесь их три, поворачиваются на осях в шарнирах 2, закреплённых на общей раме 3, связанной с корпусом судна. При поворотах пластин 1, в крайних положениях, открывающийся зазор между ними предотвращается затвором 4, в котором находится закрылок 6, способный поворачиваться на шарнире 5 соседней пластины. Связь с двига-

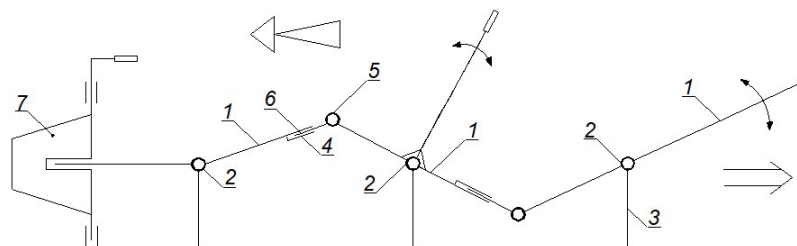


Рис. 1. Двигатель «Дельфин»

телем через соответствующий механизм производится при помощи рычага 8, прикреплённого к одной из пластин 1. На раме 3 имеется руль 7.

Действует движитель Дельфин следующим образом. Колебания рычага 8 передаются средней пластине 1, которая поворачивает соседние пластины в обратном направлении. Соотношения плеч поворота (расстояние от оси до краёв) выбираются так, чтобы больший ход был в обратную сторону направления движения судна (широкая стрелка). Вдоль конструкции (здесь – слева направо) идёт волна, и последняя пластина 1 – «хвост» - выбрасывает поток воды (двойная стрелка), создавая движущий импульс.

Описанный движитель Дельфин весьма целесообразен для спортивных судов типа катамаранов. Он устанавливается между двумя корпусами катамарана, рычаг 8 имеет рукоятки для ручного привода (патент РБ №12117).

Движитель «Кальмар»

Головоногое морское животное – кальмар (крупные кальмары – это спруты) имеет торпедообразное полое тело, периодически заполняемое водой, которое мускулистым усилием выбрасывается назад, создавая движущий реактивный импульс.

Рис. 2 даёт механическую аналогию действию природного организма. В корпусе 1, являющемся объёмом накопления воды (это канал с плоским дном и крышкой) расположена пластина 2 шириной от одной до другой боковой стенки, длиной по условиям её действия (должна перекрывать поперечное сечение при максимальных поворотах). Пластина имеет на одном конце рычаг 3, способный поворачивать, наклонять, поднимать и опускать пластину 2.

Действует движитель Кальмар следующим образом. Исходное положение – пластина 2 на дне корпуса 1 (пунктирное изображение пластины 2 и рычага 3). Рычаг 3 поднимается с наклоном, пла-

стина 2 поворачивается, её один конец остаётся на дне корпуса 1 (точечное изображение). Система из положения «а» переходит в положение «б». В полость под пластиной 2 засасывается вода слева, а над пластиной 2 вода идёт направо. Далее рычаг 3, предварительно поднятый, наклоняется налево, поднимая пластину 2 до крышки корпуса 1, до горизонтального её положения, вода над ней интенсивно сливается направо (штрих-пунктирное положение), система переходит в состояние «в». Затем рычаг 3 наклоняется налево и опускается, пластина 2 поворачивается, её правый конец остаётся на крышке корпуса 1, а левый опускается на дно (изображение на схеме сплошной линией), система из «в» переходит в «г». При этом в полость над пластиной 2 вода засасывается, под ней - выбрасывается, всё движение воды – слева направо. Заключительный ход цикла – наклон рычага 3 направо, пластина 2 ложится на дно, интенсивно выдавливая воду направо, и засасывая воду слева. Система из «г» перешла в «а», и цикл повторяется. Важно отметить, что при всех перемещениях пластины 2 вода движется слева направо (двойная стрелка), создавая движение корпуса (судна) налево (широкая стрелка).

Конец рычага 3 (треугольника на рис.) совершает подобие кругового движения (круговая стрелка), легко реализуемого в механическом исполнении (например, штыри в копире) или ручную (как концы ручников вёсел при обычной гребле). При указанном на рис. 2 направлении движения судна, круговое движение конца рычага 3 идёт против часовой стрелки, т.е. для обратного хода достаточно лишь изменить направление этого движения на-по часовой стрелке. Изменение курса даёт также руль 4.

Простота аппарата и его действия обеспечивают высокую надёжность и дешевизну устройства. Идея и конструкция зафиксированы патентом РБ №12288.

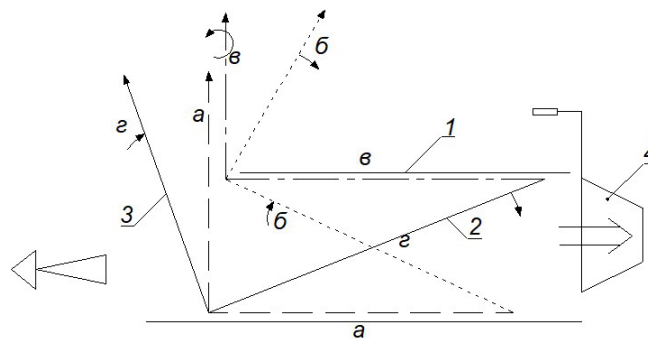


Рис. 2. Движитель «Кальмар»

Двигатель «Медуза»

Медуза по своей форме (диаметр существенно больше толщины) в основном совершает движение по горизонтали, выдерживая глубину погружения реактивной водяной струей широкого сечения. Поэтому механический аналог должен иметь движущий орган большой площади с малым рабочим ходом.

Рис. 3 иллюстрирует идею поддержания обслуживаемого объекта (судно, подводная лодка, временный мост, паром, наплавные сооружения) на заданном уровне и глубине. Устройство состоит из корпуса 1 кольцевой или прямоугольной в плане формы, внутри которого смонтированы две большие пластины 2. Они имеют отверстия (показаны два на каждой, может быть больше). Отверстия снизу прикрыты свободно поворачивающимися (или поджаты пружиной) клапанами 3 (свободный ход вниз, вверх перекрыт пластиной 2). Каждая пластина 2 имеет рычаг 4, который может наклонять эти пластины. Рычаги движутся до вертикали и назад, пластины – до горизонтали и назад (штрих-пунктирная линия и стрелки). Пластины 2 надеты на общую ось 5 на их середине (как крепление дверей), могут сходиться/расходиться. Ось 5 закреплена в корпусе 1 и отдельно несёт руль 6, управляемый извне.

Действует двигатель Медуза следующим образом. При противоположном колебании рычагов 4 от вертикали, одновременно налево и направо (это функция передаточного механизма от двигателя, или ручные усилия) пластины 2 поднимают/опускают клапаны 3. Движущийся вниз клапан 3 проталкивает воду вниз, нижний клапан 3 пропускает её, создавая реактивный поток. Когда края пластин расходятся, нижний клапан давит

на воду, верхний – засасывает воду в межпластиночный объём. Так действуют обе половины пластин, обеспечивая непрерывный поток воды вниз, поддерживая судно в заданном режиме. Двойная стрелка – реактивный поток воды, широкая – усилие поддержки или движение из глубины вверх.

Идея и конструкция описанного двигателя запатентована (патент РФ №12219).

Заключение

Энергетический и конструкционный расчёт представленных двигателей основан на известных зависимостях гидравлики, энергетики, сопротивления (уравнения движения, гидравлическое сопротивление, периодические течения, анализ импульсов, прочность материалов). Мощность привода подбирается по условиям ускорения массы воды, т.е. зависит от габаритов и расчётной скорости обслуживаемого транспортного средства.

Принципиальные схемы предусматривают разработки вспомогательных приспособлений для конкретных практических задач. Это касается расположения, компоновки, крепления двигателей на судне, механизмов связи с двигателем, органов управления. Такие мероприятия являются уже вторичными относительно базовых энергетических схем, работоспособность которых несомненна.

Практическому применению способствуют простота конструкции, отсутствие сложных механических устройств, надёжность действия.

Описанные двигатели могут выполнять функции не только перемещения по воде обслуживаемых объектов, но и как другие энергоагрегаты. Например, в качестве низконапорных насосов с большим расходом воды в системах водоснабжения. Приводом для них могут быть ветро- или гидродвигатели.

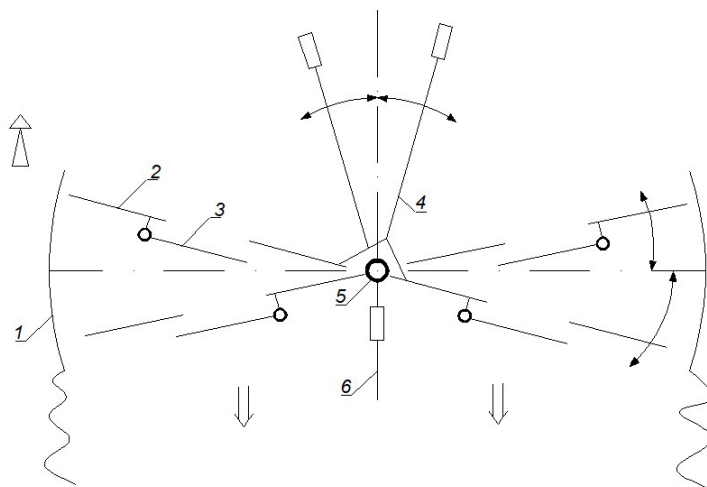


Рис. 3. Двигатель «Медуза»

МЕХАНИКА БЛОЧНОГО ЛУКА.

Ч.1. ТРАЕКТОРИЯ ТОЛЧКА СТРЕЛЫ

К.В. Доброго

*Д.ф.-м.н., профессор, заместитель Председателя высшей аттестационной комиссии
Республики Беларусь, г. Минск*

Статья посвящена рассмотрению блочного лука как механической системы, обсуждению некоторых аспектов «идеального» выстрела с точки зрения физики.

В первой части рассматривается вопрос о траектории толчка стрелы как основного фактора стабильности и точности выстрела. Показано, что конструкционные особенности блочного лука не позволяют осуществлять идеальную, совпадающую с осью стрелы траекторию толчка. Оцениваются соответствующие параметры. Даются рекомендации по улучшению этой составляющей выстрела.

Статья носит научно-популярный характер и адресована любителям лучного спорта, желающим углубить понимание механических процессов, происходящих в луке и их влияние на качество стрельбы.

Введение

Лучный спорт – интересный технический вид спорта получивший широкое распространение в европейских странах, в Республике Корея, США, в Китае и других странах и несколько меньшее в странах СНГ. Это олимпийский вид спорта, требующий не только физической и технической подготовки, но и развивающий позитивные психические способности человека. При этом для занятий лучной стрельбой практически отсутствуют возрастные ограничения и они отлично подходят для активного отдыха. Именно по этим причинам он привлек мое внимание. Ознакомившись с азами лучного дела по интернету, я приобрел простой блочный лук. Почему блочный? Потому, что для неискушенного любителя, такого как я, не существовало эстетики традиционного лука и традиций олимпийского лучного спорта, но вполне ощутимо представлялась мощь и технологичность блочного лука.

Сразу после приобретения, опробования лука и приятного впечатления от его «боевых» возможностей, проявилась вторая, не менее увлекательная для меня, сторона лучного дела. Как физик я принялся анализировать, что помогает точности выстрела, а что мешает, как можно усовершенствовать лук, сделать его «идеальным». Конечно, существует большое количество практических рекомендаций и инструкций по настройке лука и технике стрельбы, учитывающих опыт спортсменов и производителей луков, на-

пример, руководство по настройке лука и стрел компании EASTON [1]. Имеется литература для желающих освоить данный вид спорта, например, книга Брайна Дж. Споллера «Стрельба из лука для начинающих» [2], в которой автор вводит читателя в мир лучной стрельбы, дает программу отработки навыков стрельбы, затрагивает вопросы выбора инвентаря, техники стрельбы и участия в соревнованиях. Вопросы механики лука рассматриваются и в научной литературе. Так в диссертации [3] разработана модель разгона стрелы в рекурсивном луке основанная на уравнениях механики упругих деформируемых сред. Изучается влияние геометрии плеч на динамику разгона и скорость вылета стрелы, делаются рекомендации по конструкции и геометрии лука, обеспечивающей большую скорость вылета стрелы. К сожалению, узконаправленные, хотя и детальные исследования, зачастую не дают ясных рекомендаций спортсменам для повышения стабильности и точности стрельбы.

В данной статье вопрос «идеального» выстрела рассматривается с общих позиций физики и механики, а затем сводится к решению конкретных задач и нахождению конкретных параметров – характеристик лука. Такой путь, на наш взгляд, понятен и новичкам и опытным спортсменам и позволит лучше «понять» лук и, надеемся, улучшить результаты стрельбы.

Данная статья носит научно-популярный характер, поэтому читатели, для которых трудно

восприятие формул, могут внимательно изучить рисунки, обратить внимание на численные оценки некоторых характеристик лука и ознакомиться с выводами.

Общий взгляд на проблему «идеального» выстрела

В настоящее время интернет дает возможность ознакомиться с любым предметом, тем не менее приведем краткое описание блочного лука и составляющих его элементов. Основу лука составляет жесткая рама, называемая райзером, с прикрепленным к ней упругими силовыми элементами – плечами и иными устройствами и конструктивными элементами, рис. 1.

Основными конструктивными параметрами лука являются расстояние от оси до оси и база лука (рис. 1), а также длина растяжки (иногда используется жаргонизм «вытяг») и сила натяжения. Последние два параметра, как правило, настаиваются под стрелка.

Система блоков и модулей служит для создания равномерного усилия натяжения тетивы и ослабления (сброса) усилия в конце фазы натяжения. Отвод тросов – стержень отводящий тросы от плоскости лука и таким образом освобождающий пространство для свободного пролета стрелы. Тормоз тетивы предотвращает заброс тетивы вперед и уменьшает вибрации тетивы после выстрела. Полочка и седло тетивы служат для позиционирования стрелы. Натяжение лука осуществляется за петельку с помощью специального приспособления – релиза, а прицеливание – совмещением цели, указателя (пина) прицела и

отверстия пип-сайта. Также лук снабжается демпфирующими элементами, снижающими вибрации и шум при выстреле. Стандартная терминология по луку и арбалету приведена в [4].

Лук – это аппарат для метания стрелы. Его назначение: 1 – максимально полно передать запасенную (в деформации упругих элементов) энергию в кинетическую энергию стрелы; 2 – обеспечить максимальную стабильность и точность направления полета стрелы.

Обе задачи – сложные технические задачи, для их решения надо рассматривать единую физическую систему «человек – лук – стрела», поскольку каждый элемент этой системы взаимодействует с другими. Однако детальное рассмотрение этой системы с точки зрения физики слишком сложно. Ведь возможности человека учесть сложно, а изменить их – тем более. Стрела наоборот, – практически идеальный метательный снаряд (если, конечно, она прямая:), характеризуется малым числом параметров и совершенствовать ее некуда. Поэтому следует обратить внимание на лук, как на механическую систему, и разобраться как добиться его максимально эффективной и точной работы.

Предполагаем, что человек в данной системе это жесткая (неподвижная) опора, фиксирующая лук, а точнее точку опоры А на рукоятке лука, и хвостовик стрелы В, рис. 2. Считаем, что масса стрелы мала по сравнению с массой лука (25–40 г против 2–3 кг), тогда в первом приближении вылет стрелы не оказывает влияния на движение самого лука, а движение тетивы лука полностью определяет вылет стрелы.

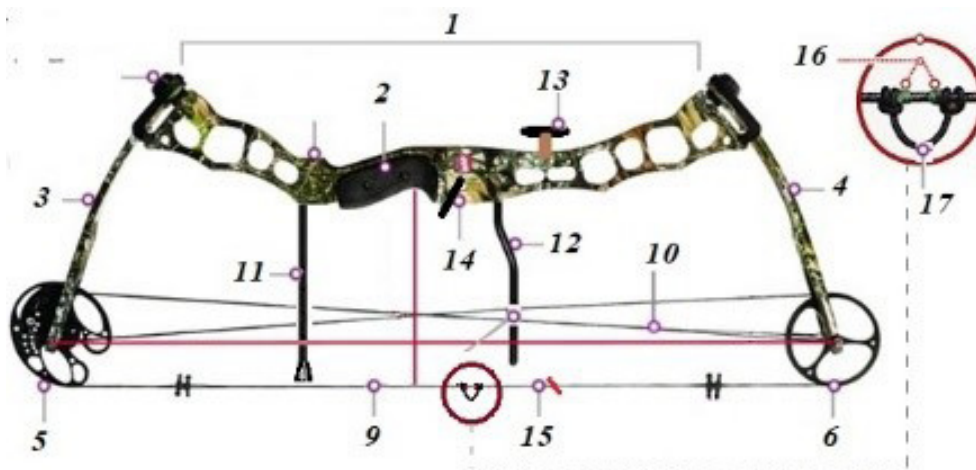


Рис. 1. Устройство и основные элементы блочного лука:

1 – райзер; 2 – рукоятка; 3, 4 – нижнее и верхнее плечо; 5, 6 – нижний и верхний блок; 7, 8 – нижний и верхний модуль блока; 9 – тетива; 10 – тросы модулей; 11 – тормоз (успокоитель) тетивы; 12 – отвод тросов; 13 – прицел; 14 – полочка; 15 – пип-сайт; 16 – седло тетивы; 17 – петелька

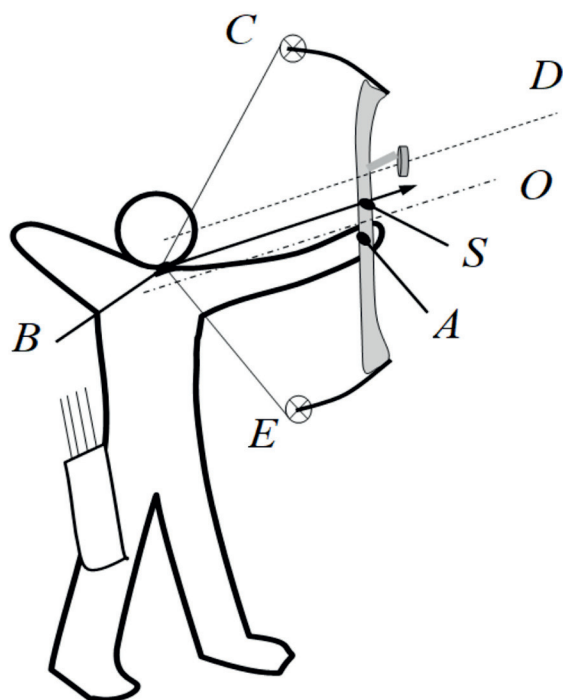


Рис. 2. Система «человек – лук – стрела»:
A – точка опоры лука, O – ось лука, D – линия прицеливания, ACBE – плоскость лука, B – точка удержания хвостовика стрелы (точка опоры стрелы, петелька, гнездо тетивы), BS – ось стрелы

Независимо от того как рассматривается система в целом, идеальным может считаться такое метание стрелы, когда она вылетает, первое, с импульсом строго коаксиальным оси стрелы (везде рассматривается система координат земли) т.е. без разворота самой стрелы (как сказали бы физики – без момента количества движения перпендикулярного оси), и, второе, без поперечных колебательных возбуждений. На практике, если посмотреть на вылет стрелы в замедленном видео (которые доступны в интернете), можно увидеть горизонтальные и вертикальные изгибания стрелы (так называемые «рыбка» и «дельфинчик») – это и есть колебательные возбуждения стрелы, полученные ею при выпуске из лука. Очевидно, что избавиться от таких возбуждений не удастся даже профессиональным спортсменам. О некоаксиальности импульса при вылете косвенно говорит различие полета оперенной и неоперенной стрелы, неровный разрыв бумаги при выстреле через бумажный экран, что используется в разных методиках настройки лука [1,2].

По сути, две указанные характеристики вылета определяют необходимые и достаточные

условия стабильности и точности полета стрелы к которым надо стремиться при настройке лука и выборе техники стрельбы. Третьим условием является постоянный импульс (скорость) стрелы при вылете, которое вполне удовлетворительно достигается за счет четкого сброса усилия натяжения («стенки») в качественных луках, малого трения элементов лука, неизменности свойств тетивы и плеч лука во время стрельбы и других технических решений.

Чтобы обеспечить коаксиальный импульс стрелы и отсутствие колебаний необходимо, чтобы траектория точки опоры (хвостовика) стрелы, или траектория толчка, была строго прямолинейной и совпадала с осью стрелы. Также необходимо, чтобы во время разгона стрела не испытывала усилий в перпендикулярном направлении со стороны полочки, плунжера, других направляющих элементов лука (воздействие со стороны полочки, если оно строго равно силе тяжести, действующей со стороны стрелы, не дает поперечного импульса).

Казалось бы все просто – необходимо взять ровную стрелу, избегать боковых толчков при спуске тетивы и взаимодействия стрелы с направляющими устройствами, например, используя падающую полочку – и условия выполнены. Но это не так, – всплывает «родовой» дефект лука – непрямолинейность траектории толчка (движения точки опоры, хвостовика стрелы, гнезда стрелы, или петельки – под этим подразумевается одно и то же).

Родовой дефект лука

Траектория движения точки толчка стрелы, напоминает раскачивание «качелей», при различии высот h_2 и h_3 на рис. 3. Источник этого дефекта – смещение оси стрелы вверх относительно оси симметрии плечей лука и потеря, в связи с этим, симметрии верх-низ в системе лук-стрела. Действительно, рука лучника, создающая опору, располагается ниже оси симметрии, приблизительно на 2–7 см, а стрела, для обеспечения свободного пролета оперенья располагается выше оси симметрии, приблизительно на 2 см. (Заметим, что в арбалета аналогичная симметрия сохранена.)

Что же следует из такой асимметрии системы? «Интуитивно» кажется, что по мере натяжения тетивы асимметрия должна уменьшаться, седло тетивы – приближаться к оси. Поэтому, подобрав высоту седла (петельки) на тетиве можно добиться достаточно хорошей траектории точки толчка, близкой к оси стрелы. К сожалению, в данном

случае интуиция дает сбой. Покажем это, решив соответствующую физико-геометрическую задачу. Примем геометрическую модель согласно рис. 3. Рассчитаем траекторию точки опоры стрелы, полагая, что выход тетивы с блока пропорционален силе ее натяжения, и что сила натяжения тетивы в верхнем и нижнем плече одинакова.

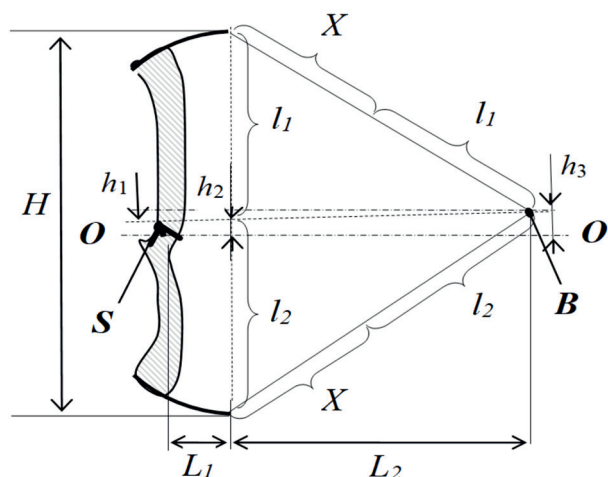


Рис. 3. Геометрическая модель лука для расчета траектории точки опоры стрелы BS: O – ось симметрии, S – полка, BS – ось стрелы, h_1 – высота полки, h_2 – высота точки опоры (гнезда, петельки) в начальном состоянии, h_3 – высота точки опоры в натянутом состоянии, L_1 – база лука, L_2 – рабочий ход тетивы, l_1 – начальная длина тетивы до седла сверху, l_2 – начальная длина тетивы до седла снизу, X – упругий выход тетивы с блока, $H=l_1+l_2$ – расстояние между осями

Искомым в данной задаче является высота точки опоры (петельки) в натянутом состоянии в зависимости от ее высоты в начальном состоянии и рабочего хода тетивы L_2 или величина $\Delta h = h_3 - h_2$. Данная величина определяется решением системы уравнений

$$\begin{cases} (l_1 - \Delta h)^2 + L_2^2 = (l_1 + X)^2 \\ (l_2 + \Delta h)^2 + L_2^2 = (l_2 + X)^2 \end{cases} \quad (1)$$

Обозначения величин даны в подписи к рис. 3.

Аналитически решить систему трудно. Однако легко показать, что в пределе большой растяжки $X \rightarrow \infty$ величина Δh задается формулой

$$\Delta h \cong X \frac{2h_2}{H} \approx 2h_2 \frac{L_3}{H}$$

$$\Delta h \cong X \frac{2h_2}{H} \approx 2h_2 \left(\frac{L_3}{H} \right)^2$$

можно рекомендовать формулу.

$$\Delta h = 2h_2 \frac{(L_3/H)^2}{1 + L_3/H} \quad (2)$$

Согласно (2), в пределе большого растяжения лука седло тетивы отодвигается от оси лука пропорционально величине выхода тетивы X (или растяжения лука), пропорционально начальному удалению от оси h_2 и обратно пропорционально размаху дуги (расстоянию между осями) лука H. Формула (2) объясняет известное среди лучников утверждение о том, что чем больше размах плеч лука тем стабильнее стрельба.

Численное решение системы (1) для параметров лука ManKung CB50 (далее – МК CB50), табл. 1, представлено на рис. 4. На данном рисунке гнездо тетивы (точка опоры стрелы) совершает движение по линии, справа налево. Как видно, траектория движения гнезда тетивы «проваливается» во время толкания стрелы на величину порядка 12 мм, что существенно ухудшает качество вылета стрелы и, соответственно, стабильность выстрела.

Табл. 1

Значения параметров лука, использованные для расчета, рис. 4

Параметр	Обозначение	Значение
Длина тетивы от блока до гнезда сверху	l_1	340 мм
Длина тетивы от блока до гнезда снизу	l_2	376 мм
Рабочий ход тетивы	L_2	500 мм
Высота гнезда от оси	h_2	18 мм

Ввиду качелеобразного движения седла тетивы создаются условия для трения (или удара) стрелы о полочку и ее колебательных возмущений в вертикальной плоскости («дельфинчик»). Принципиальной проблемой является то, что никаким выбором начальной высоты петельки невозможно привести траекторию толчка к прямой линии совпадающей с осью стрелы.

(Интересно отметить, что опустив петельку немного ниже оси симметрии можно добиться лучшего совпадения оси стрелы и траектории толчка «в среднем». Не даром на некоторых древних рисунках лучников стрелы рисовали под углом к самому луку. Это могло обеспечивать лучшую стабильность стрельбы)

Как бороться с данной проблемой? Несколько исправить ситуацию можно применив пле-

чи различной жесткости. Предположим, что жесткость верхнего плеча на 5 % ниже жесткости нижнего и рассчитаем траекторию точки опоры в этом случае, рис. 5. Как видно, траектория толчка в этом случае гораздо ближе к идеальной прямолинейной.

Другим методом корректировки траектории может быть смещение плечей вперед – назад относительно друг друга. В предложенной модели можно промоделировать такое смещение плеч лука. Так параллельное смещение верхнего плеча назад приводит уменьшению амплитуды прогиба траектории толчка, как показано на рис. 6. Данная манипуляция может использоваться для настройки лука совместно с регулировкой жесткости плеч.

Использованная нами модель является приближенной и не учитывает сближения осей при натяге, не учитывает геометрии блоков и переменность коэффициента упругости плеч, однако, как показывают эксперименты, она достаточно хорошо описывает характер траектории толчка стрелы.

Второй «родовой дефект»

Блочный лук обладает вторым «родовым дефектом», менее очевидным, чем первый. После быстрого натяжения тетивы всегда (или почти всегда) возникает поперечная вибрация плеч лука. В чем причина этой вибрации. Ее можно связать с лево-правой асимметрией массы лука, а также со смещением точки упора руки (в пределах ширины рукоятки). Однако после проведения нескольких экспериментов можно убедиться, что это не главные факторы. Основным источником данного возбуждения является асимметрия системы модулей и тросов

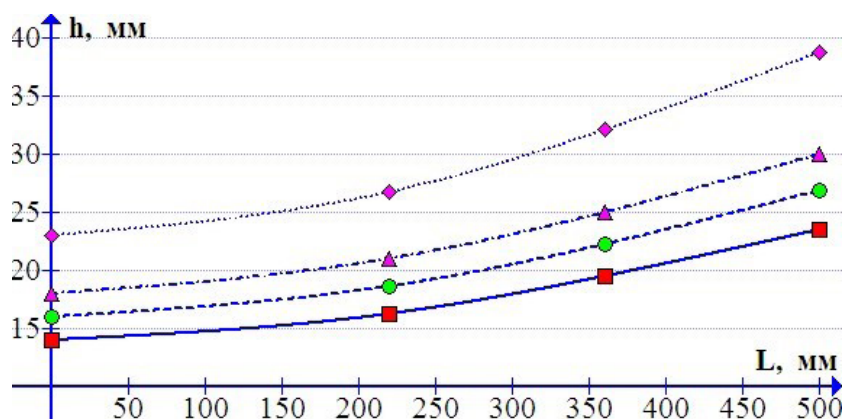


Рис. 4. Зависимость высоты точки опоры h_3 от рабочего хода тетивы L_2 (траектория толчка) при различных значениях высоты гнезда h_2 . Расчет по модели (1) – (2) для параметров лука МК СВ50

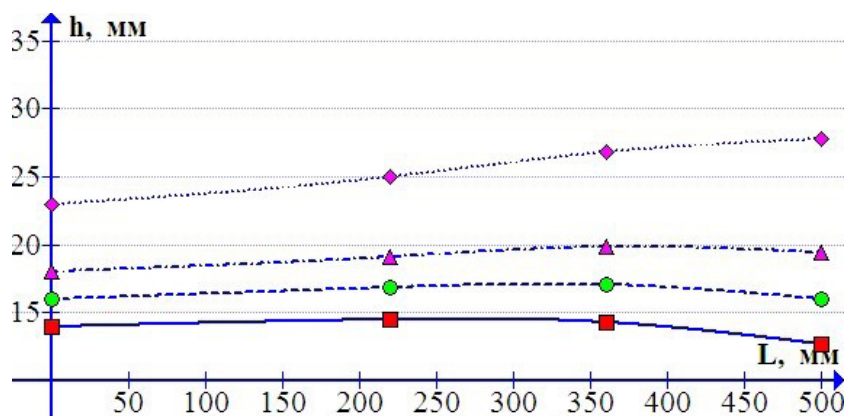


Рис. 5. Зависимость высоты точки опоры h_3 от рабочего хода тетивы L_2 (траектория толчка) при различных значениях высоты гнезда h_2 . Расчет по модели (1) – (2). Жесткость нижнего плеча на 5 % выше жесткости верхнего. Параметры лука МК СВ50

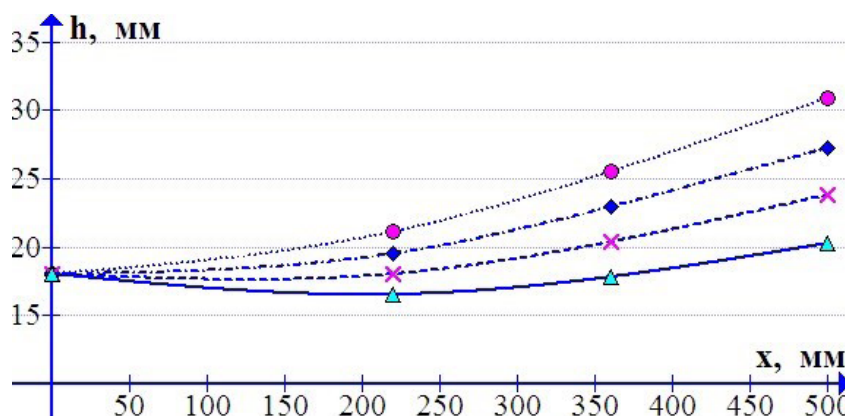


Рис. 6. Траектория толчка стрелы при различных величинах параллельного смещения верхнего плеча назад. Начальная высота гнезда $h_2 = 18$ мм. Верхняя кривая – без смещения, последующие – смещение плеча на 5, 10 и 15 мм. Параметры лука МК СВ50

и работа механизма сброса усилия. Рассмотрим это подробнее.

По своей сути действие механизма сброса усилия сводится к тому, что в конце стадии натяжения тетивы, усилие, передаваемое на плечи перераспределяется между тросами и тетивой, - тросы получают дополнительную нагрузку, а тетива – отдает часть своей нагрузки. При отпуске тетивы в начале движения стрелы происходит обратное перераспределение усилий – нагрузка тросов облегчается, а тетивы увеличивается. И все это было бы незаметно, если бы система блоков модулей и тросов была симметричной. Но тросы, сдвинутые отводом (рис. 1), находятся правее тетивы и усилие тросов направлено под углом (α_1, α_2) к плоскости лука, рис. 7. Поэтому перераспределение усилий между тетивой и тросами сопровождается толчком осей лука вбок. Поперечная составляющая силы легко может быть оценена по углу отхода тросов и составляет величину около 1 кг. Если скорость толчка близка к резонансным частотам лука, то лук начинает раскачиваться. (В случае лука МК СВ50 после быстрого натяжения тетивы вибрация достаточно сильная и затухает в течение приблизительно 1–2 секунды.) Кроме того, при сбросе усилия и при отпуске тетивы на оси будет действовать момент сил равный разности сил натяжения тросов и тетивы умноженной на расстояние между блоком и модулем $\vec{M} = \Delta\vec{r} \times \Delta\vec{F}$, стремящийся повернуть плоскость блока, что также приводит к поперечному сдвигу тетивы и соответствующему толчку стрелы вбок.

Избавиться от данного дефекта полностью невозможно поскольку для этого необходимо создать полностью симметричный лук. Но можно минимизировать этот эффект различными путями, например, 1) делая конструкцию плеч лука более жесткой в поперечном направлении (соединяя отдельные пластины плеч в единый

элемент); 2) сближая модуль и блок, или располагая их симметрично; 3) уменьшая угол отхода тросов, или создавая специальный механизм роликовой обводки тросов вокруг стрелы. Именно этими путями и идут, насколько я понимаю, разработчики высококлассных спортивных луков.

Проверка траектории толчка стрелы и выхода модулей

Получив такие важные данные (рис. 4, 5, 6) из простых физических и геометрических расчетов я был очень рад и думал, что уж половину всех лучных проблем я точно скоро решу. Однако все теоретические расчеты требуется проверять. Для этого был собран испытательный стенд, рис. 8, представляющий из себя плоское основание с надежно закрепленным на нем луком и определенными средствами для прорисовки траектории седла тетивы.

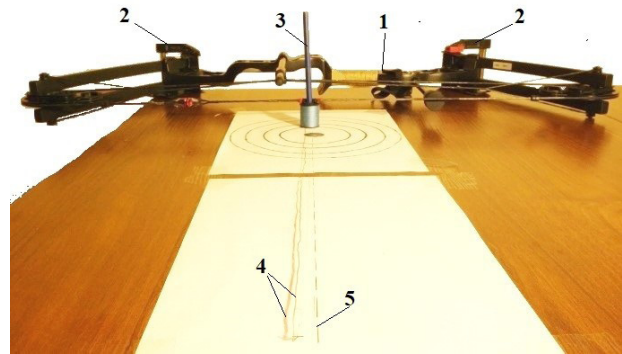


Рис. 8. Стенд для отображения траектории толчка стрелы (гнезда тетивы). 1 – райзер, 2 – струбины, 3 – карандаш, продетый через петельку и зафиксированный в вертикальном положении, 4 – линии траекторий опоры (гнезда) стрелы, 5 – линия начальной высоты седла

Прежде чем приступить к испытаниям, нужно принять меры страхующих вас от каких-либо неожиданностей. Первое, - дополнительно застраховать лук от срыва с исходной позиции при

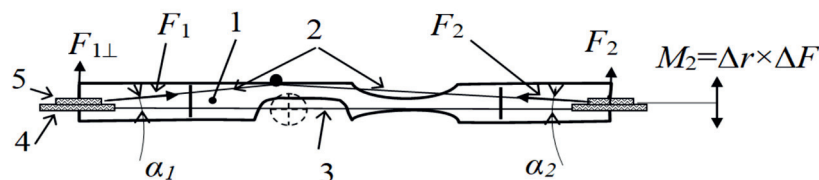


Рис. 7. Лево-правая асимметрия блочного лука и боковой толчок при выходе модулей

1 – райзер, 2 – тросы, 3 – тетива, 4 – блок, 5 – модуль блока, α_1, α_2 – углы отхода тросов от верхнего и нижнего модулей, $F_1, F_{1\perp}$ – сила натяжения троса и ее перпендикулярная составляющая на верхнем модуле, $F_2, F_{2\perp}$ – то же на нижнем модуле, \vec{M}_2 – разворачивающий момент сил на нижнем блоке

помощи прочной липкой ленты, дополнительных упоров позади рукоятки, либо шурупами через отверстия рукоятки. Второе, необходимо прикрепить к релизу или надежно зафиксировать на запястье страховочный карабин на ремешке и работать с луком предварительно захватив тетиву карабином как показано на рис. 10. Начиная опыты, я чуть не поплатился луком (обошлось раздробленным пип-сайтом и слегка потрепанной тетивой) после случайного холостого выстрела с полунатянутой тетивой, и окончательно понял, что без страховки работать с луком нельзя.

После фиксации лука, при помощи линейки прочерчивается центральная (осевая) линия лука, строго перпендикулярная вертикали его плеч а также параллельная ей линия начальной высоты петельки (h_2 на рис. 3), которая, по сути, является идеальной траекторией толчка. Для прочерчивания траектории толчка продеваем карандаш через петельку, фиксируем его вертикально при помощи направляющей втулки (мною использовалась катушка ниток) и аккуратно взводим и отводим тетиву, сохраняя направление тяги перпендикулярно вертикали лука.

Прочерченная траектория гнезда тетивы (рис. 9) оказалась, на удивление, близкой к расчетной кривой рис. 4 однако на ней обнаружилось существенное возмущение – горб (кривая 5 на рис. 9), природу которого я понял, внимательно отслеживая движения блоков и модулей.

Выяснилось, что горб на траектории вызывает небольшая разница в моменте прихода нижнего и верхнего модулей в свое крайнее положение. Я долго искал, где же «схалтурили» производители лука, какие элементы верхней и нижней части лука отличаются, где скрыта асимметрия?

Более того, разница прихода модулей не только дает возмущение траектории толчка, но и «размазывает» делает менее четким сброс усилия лука, что также мешает прицеливанию и стабильности стрельбы.

Некоторое время я боролся с этим «дефектом» самыми причудливыми способами, пытаясь «исправить» положение модулей, пока случайно не узнал, что небольшие настройки длины тетивы и тросов в луке делаются путем их подкручиванием или раскручивания. Поскольку тросы модулей крепятся асимметрично их длина может по-разному сказываться на ход верхнего и нижнего модуля. Я попробовал и, о чудо, этим способом удалось отлично настроить выход модулей и ликвидировать «горб» на траектории толчка стрелы (линия 4 на рис. 9).

Могут быть предложены и другие способы контроля траектории толчка стрелы. Достаточно легко реализовать, например, контроль движения стрелы относительно рейки-указателя жестко прикрепленной к рукоятке лука, рис. 10. Относительное движение стрелы и контрольной точки на рейке (рост или уменьшение зазора, движение влево- вправо) при взводе и возвращении тетивы, однозначно связано с движением точки опоры стрелы и является индикатором нелинейности траектории толчка. Удобно, если наблюдение за движением стрелы над стрелкой-указателем ведет помощник, использующий для этой цели миллиметровую линейку или видео регистрацию. Основная регулировка траектории толчка в этом случае производится положением петельки. При работе с контрольной рейкой, ОБЯЗАТЕЛЬНО используем страховку релиза, рис. 10.

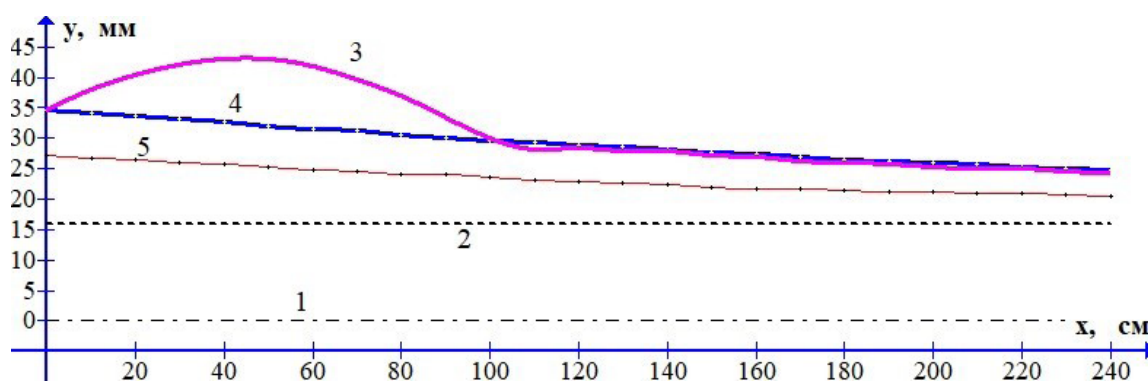


Рис. 9. Конечный участок (25 см) траектории толчка стрелы, полученный на стенде:
 1 – осевая линия лука, 2 – линия начальной высоты петельки h_2 («идеальная» траектория),
 3 – первоначальная траектория (лук из магазина), 4 – траектория идентичная 3, но с исправленным приходом модулей, 5 – лучшая полученная траектория



Рис. 10. Определение траектории толчка стрелы по контрольной рейке

Такой контроль можно легко проводить непосредственно перед тренировкой. В случае, если отход стрелы от контрольной точки не превышает 1–2 мм, можно говорить о хорошей линейности траектории толчка стрелы. Конечно, такой контроль не заменяет традиционные методы контроля вылета стрелы [1,2].

Влияние отдачи лука на траекторию толчка стрелы

Согласно первому закону Ньютона, сила, разгоняющая стрелу, толкает лук в противоположную сторону. Лук получает импульс равный импульсу стрелы, но направленный в противоположную сторону – отдачу. Поскольку во время выстрела лук удерживается не абсолютно жестко, отдача искривляет траекторию толчка. Оценим этот эффект решив задачу о динамике поступательно-вращательного движения лука относительно точки опоры А при приложении импульса к точке, смещенной относительно А вверх на расстояние r , рис. 11.

Исходные данные для решения задачи:

Масса стрелы: $m_a = 30 \cdot 10^{-3}$ [кг].

Скорость стрелы на вылете: $v_0 = 60$ [м/с].

Импульс стрелы на вылете: $p_0 = m_a v_0 = 1.8$ [кг·м/с].

Рабочий ход тетивы: $L = 0.5$ [м].

Высота лука: $H = 0.2$ [м].

Считаем движение стрелы равноускоренным, тогда легко определить:

ускорение: $a = 3600$ [м/с²],

время толчка: $t_0 = 1/60 = 1.7 \cdot 10^{-2}$ [с].

Время толчка, оцененное по средней скорости: $t_0 \approx 2L/v_0 \approx 1.8 \cdot 10^{-2}$ [с].

Средняя сила отдачи: $f_r = \frac{p_0}{t_0} \approx \frac{1.8}{1.8} 10^2 \approx 10^2$ [Н]

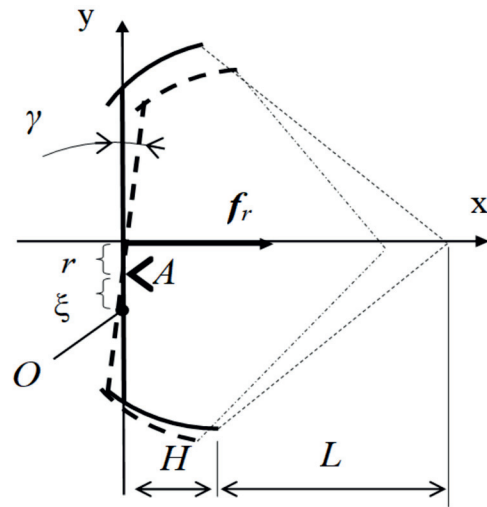


Рис. 11. Схема поворота лука относительно опоры А в вертикальной плоскости

Плечо силы относительно точки опоры А: $r = 4 \cdot 10^{-2}$ [м]

Момент силы: $F_A = f_r r = 4$ [Н·м].

Поворот лука относительно точки опоры на угол γ найдем интегрированием уравнения вращательного движения [5] $I_A \ddot{\gamma} = F_A$, считая момент силы и момент инерции постоянными

$$\gamma = \frac{F_A}{2I_A} t^2 \quad (3)$$

Траекторию движения седла тетивы с учетом поворота лука найдем в параметрическом виде

$$\begin{cases} x(t) = L - \frac{at^2}{2} \\ y(t) = r - \gamma(H + L - \frac{at^2}{2}) \end{cases} \quad (4)$$

Из (3) и (4) получаем зависимость $y(x)$

$$y(x) = r - \frac{F_A}{I_A} (L - x)(H + x) \quad (5)$$

На рис. 12 построены графики функции $y(x)$ для значений параметров приведенных выше $r = 4 \cdot 10^{-2}$ [м], $F_A = 4$ [Н·м], для нескольких значений момента инерции I_A , соответствующих различным нагрузкам лука МК СВ50.

Из рис. 12 видно, что отдача относительно слабо искривляет траекторию толчка стрелы, особенно при достаточно больших моментах инерции лука, поэтому утяжеленный лук с разнесенным от точки А грузом слабо «чувствует» отдачу выстрела. Данный эффект имеет сходный характер с эффектом «качелей» толчка, рассмотренный в первой части статьи, но существенно (на порядок) меньшей амплитуды.

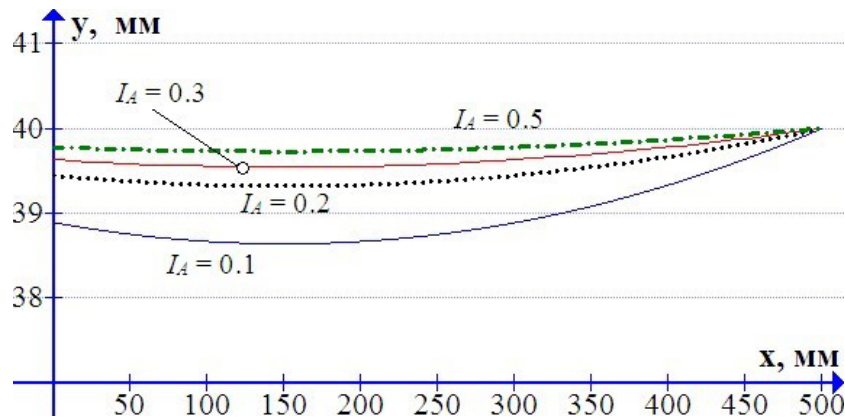


Рис. 12. Траектория толчка искаженная отдачей лука для различных I_A .
Снизу вверх: $I_A=0.1, 0.2, 0.3, 0.5$ кг·м². Движение седла тетивы справа налево

Отдача при упругой опоре

Приведенный выше анализ справедлив в случае неподвижной опоры лука. В действительности опора (рука) сдвигается под действием импульса отдачи, что усложняет задачу и приводит к необходимости учитывать расположения центра масс в системе.

Пусть при усилии в 100 Н (10 кг) опора сдвигается на 0,5 см. Тогда коэффициент упругости опоры Гука $k = \frac{f}{\Delta x} = 2 \cdot 10^4$ [Н/м]. Центр масс обозначен буквой О на рис. 11. В общем случае он может располагаться как ниже, так и выше точки опоры А.

Движение центра масс выражено через движение точки А и угол поворота γ : $\ddot{X}_O = \ddot{x} - \xi \ddot{\gamma}$ или $\ddot{X}_O = \ddot{x} + \xi \ddot{\gamma}$ – для расположения центра масс О ниже и выше А соответственно. Приписываем ξ знак «+» если О выше А и «-» если ниже и запишем уравнения вращательного (относительно центра масс) и поступательного движения (центра масс) [5].

$$\begin{cases} \ddot{\gamma} = -\frac{f_r(\xi - r)}{I_0} + x \cdot \xi \cdot k / I_0 \\ \ddot{x} + \xi \ddot{\gamma} = f_r / m - x \cdot k / m \end{cases} \quad (6)$$

Здесь x – координата точки А.

Подставляем первое уравнение системы во второе переписываем в виде

$$\ddot{x} + x \cdot A = B, \quad (7)$$

где введены обозначения .

Для $A > 0$ с учетом начальных условий решение (7) имеет вид

$$x = \frac{B}{A} (1 - \cos(\sqrt{A}t)) \quad (8)$$

Учитывая (8) получаем уравнение для угла поворота лука γ :

$$\ddot{\gamma} = -C \cos(\sqrt{A}t) + D, \quad (9)$$

где $C = \frac{\xi \cdot k \cdot B}{I_0 A}$, $D = \frac{f_r(r - \xi)}{I_0} + \frac{\xi \cdot k \cdot B}{I_0 A}$.

Прямым интегрированием (9) с учетом начальных условий получаем

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{C}{A} (\cos(\sqrt{A} \cdot t) - 1) + \frac{Dt^2}{2} \approx \\ &\approx -\frac{C}{2} t^2 + \frac{D}{2} t^2 + \frac{CA}{24} t^4 = \frac{f_r(r - \xi)}{I_0} t^2 + \frac{CA}{24} t^4 \end{aligned} \quad (10)$$

Используя решения (8) и (10) записываем уравнение траектории толчка

$$\begin{aligned} y(x) &= r - \left[\frac{C}{A} (\cos(\sqrt{A} \cdot \sqrt{2(L-x)/a}) - 1) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{D(L-x)}{a} \right] [H + x]. \end{aligned} \quad (11)$$

На рис. 13 представлена расчетная траектория толчка стрелы для положения центра масс выше и ниже точки опоры. Значений параметров соответствующую принятым в данной статье для лука МК СВ50.

Зависимость траектории от коэффициента упругости опоры k для заданных положения центра масс и момента инерции приведены на рис. 14.

Из рис. 15 видно, что момент инерции лука сильнее влияет на искажение траектории, чем коэффициент упругости опоры или расположение центра масс. Расчет, проведенный при увеличенной до 3 кг массы лука показал, что траектория по сравнению со случаем $m = 2$ кг практически не изменилась.

Как показывают данные рис. 16, расстояние от точки опоры А до оси стрелы однозначно, но не очень существенно влияет на прогиб траектории

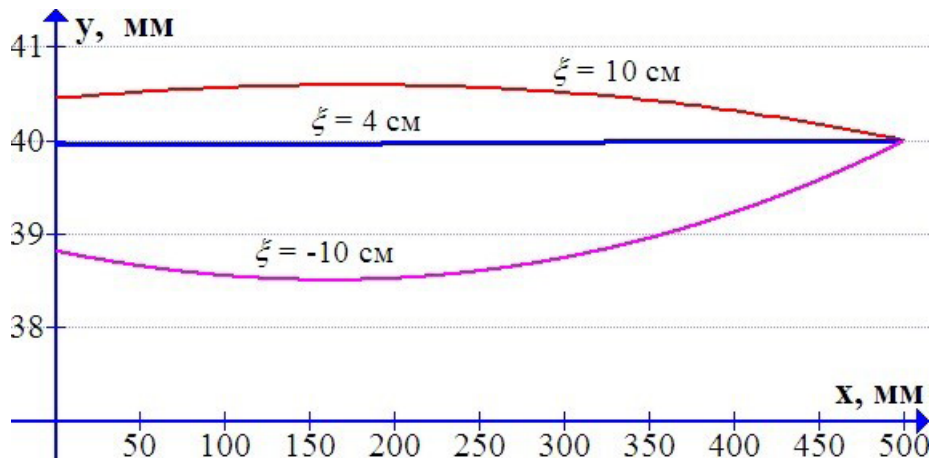


Рис. 13. Траектория толчка искаженная отдачей лука для положений центра масс $\xi = -10, 4, 10$ см (снизу вверх). Другие параметры $k = 10^4, I_A = 0.3$

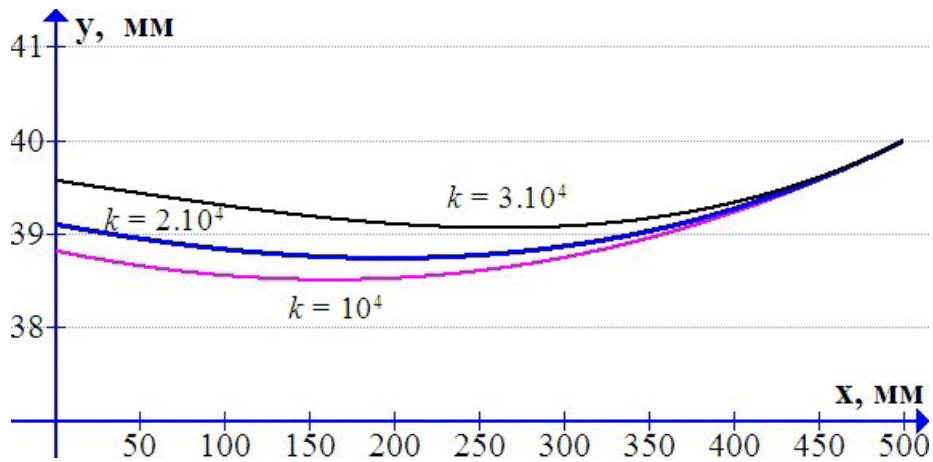


Рис. 14. Траектория толчка искаженная отдачей лука для коэффициентов упругости опоры $k = 3 \cdot 10^4, 2 \cdot 10^4, 10^4$. Другие параметры: $\xi = -10$ см, $I_A = 0.3$

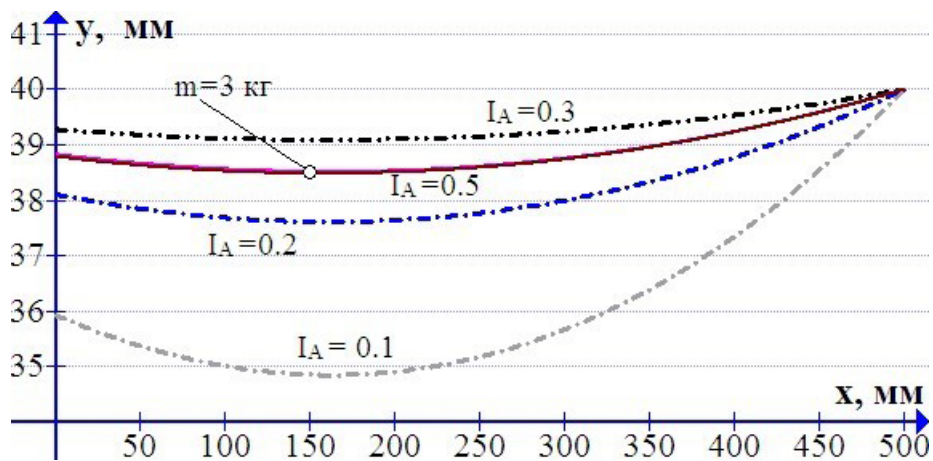


Рис. 15. Траектория толчка искаженная отдачей лука для моментов инерции $I_A = 0.1, 0.2, 0.3$. Другие параметры: $k = 10^4, \xi = -10$ см. Красная линия – масса лука $m = 3$ кг

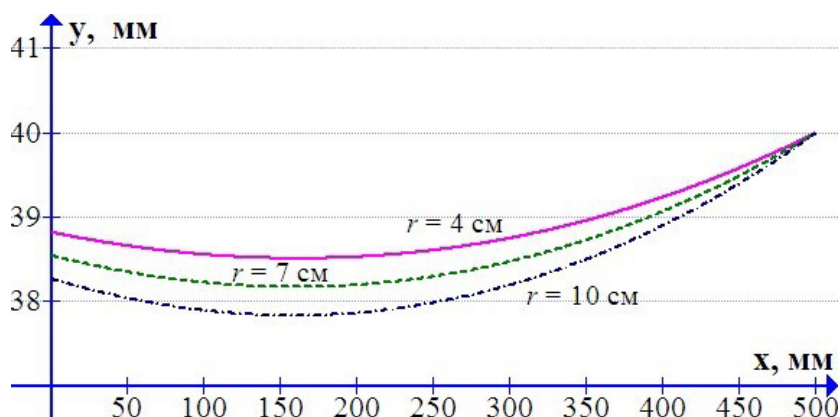


Рис. 16. Траектория толчка искаженная отдачей лука для различных высот положения стрелы над точкой опоры $r = 4, 7$ и 10 см. Другие параметры: $k = 10^4$, $\xi = -10$ см

толчка. Разница в погibe траектории при очень высоком захвате рукоятки (4 см) и при обычном упоре основанием ладони (10 см) составляет около 1 мм (для достаточно большого момента инерции). Для малых моментов инерции разница будет больше. При этом изменение высоты упора (хвата лука) может использоваться для тонкой коррекции траектории толчка.

Таким образом отдача лука относительно слабо искажает траекторию толчка по сравнению с эффектом «качелей», вызванным асимметричным положением стрелы (родовой дефект лука). При расположении центра массы ниже точки опоры траектория прогнута вниз приблизительно на 1 мм. При значительном выносе стабилизатора и увеличении момента инерции прогиб меньше миллиметра. Масса лука, в отличие от момента инерции, почти не влияет на траекторию толчка.

При переносе центра масс выше оси стрелы возможно незначительное повышение траектории толчка и даже ее выгиб вверх. Однако повышение центра массы приводит к неудобству удержания лука, и нецелесообразно при обычной стрельбе. Изменение положения точки опоры не сильно, приблизительно линейным образом влияет на глубину прогиба траектории.

Заключение

В статье рассмотрен блочный лук как механическая система, которая должна обеспечивать

высокую стабильность и точность выстрела. Принципиально важным условием стабильного выстрела является толчок стрелы по прямой траектории, совпадающей с ее осью, поскольку только в этом случае обеспечивается отсутствие вращательного момента стрелы при вылете (тангаж, рысканье) и колебательных возбуждений, выражающихся в изгибной вибрации стрелы в полета.

Показано, что особенности конструкции блочного лука не позволяют произвести «идеальный» в вышеуказанном смысле выстрел. Предложена модель и сделаны оценки отклонения траектории толчка от линейной в связи с так называемым родовым дефектом лука – отсутствием зеркальной симметрии верх- низ в системе «лук – стрела».

Также исследовано влияние отдачи при выстреле на траекторию толчка стрелы. Показано, что данный эффект является относительно слабым. Указаны другие факторы, оказывающие влияние на качество разгона стрелы.

Проведенный анализ, результаты моделирования и полученные оценки позволяют сделать выводы о путях улучшения стабильности выстрела блочного лука.

В следующей части статьи будут проанализированы свойства лука как колебательной системы и на основе этого рассмотрены вопросы инерционной стабилизации (оптимального нагружения) лука.

Источники

1. Easton. Руководство по настройке лука и стрел. Изд. BigMichel 2008, 14 с.
2. Сорреллс, Б.Дж. Стрельба из лука для начинающих / Б.Дж. Сорреллс. – М.: АСТ, Астрель. – 2006. – С.140
3. Лужин, А.А. Моделирование выстрела из лука: дисс. на соискание уч. степени канд. физ.-мат. наук / А.А. Лужин. –М.: МГУ, 2008.
4. ГОСТ Р 51549-2000. Оружие метательное. Арбалеты и луки спортивные. Арбалеты и луки для отдыха и развлечения. Термины и определения
5. Сивухин, В.Д. Общий курс физики. Т.1.Механика / В.Д. Сивухин. – 6-изд. – М.: Физматгиз. –2019. –С. 520.