

# ИНЖЕНЕР- МЕХАНИК

№ 2 (63)  
апрель – июнь  
2014

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

Учредитель — Белорусское общество инженеров-механиков

Главный редактор академик С.А. Астапчик

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.,  
Чижик С.А.

Адрес редакции:

220141, Минск, ул. Купревича, 10 (ранее Жодинская, 4)

тел./ факс 203-88-80; 226-73-36

E-mail: mail@boim.by

Свидетельство о регистрации № 1132 от 21.04.1998

Подписной индекс 00139

Компьютерная верстка Н.В. Райченко

Подписано в печать 27.06.2014.

Формат 60×84/8. Бумага офсетная.

Гарнитура «Таймс». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,6. Уч.-изд. л. 4,7.

Тираж 250 экз. Заказ №

Цена номера договорная.

Отпечатано с оригинал-макета заказчика в ГНУ  
«Физико-техническом институте НАН Беларуси».

Лицензия ЛП № 02330/152 от 14.04.2014 г.

220141, г. Минск, ул. Купревича, 10.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Разработки ученых и специалистов

Термически модифицированная древесина: свойства, применение и современное состояние технологии.....	2
Термические способы переработки отходов мягкой кровли.....	6
Автоматизированная коробка передач грузового автомобиля.....	9
Альтернативное топливо из отходов.....	14
Интенсификация добычи нефти.....	19
Утилизация теплоты низкотемпературных альтернативных источников энергии с помощью теплотрансформаторов.....	21
Мгновенное селективное внутриклеточное усиление химиорадиотерапии рака при помощи плазмонных нанопузырьков.....	27
<b>Из истории авиации</b>	
Прерванный полет Т-4.....	40
Прыжок к сверхзвуковому барьеру (окончание).....	43

# ТЕРМИЧЕСКИ МОДИФИЦИРОВАННАЯ ДРЕВЕСИНА: СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ

*Горбачев Н.М., Солнцева Н.Л.*

*Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси*

Повышение эффективности деревообрабатывающих производств и коэффициента использования древесины в настоящее время является одной из актуальных задач. Нужна новая базовая технология переработки древесины, позволяющая пересмотреть вопросы использования древесины, в том числе низкосортной, для нужд деревянного домостроения, мебельного производства, полов и т.д., по-новому посмотреть на привычные для нас конструкции и изделия из древесины, модернизировать их в соответствии с новыми возможностями и современными требованиями.

Древесина как строительный материал обладает множеством положительных свойств, однако относительно недолгий срок эксплуатации, сравнительно малая стабильность формы, а также наличие в ней грибковой инфекции снижают ее конкурентоспособность по сравнению с металлами и синтетическими материалами. До недавнего времени для изменения свойств древесины и повышения биостойкости самым распространенным был метод химической обработки древесины путем пропитки или поверхностной обработки органическими или неорганическими солями, токсичное действие которых прекращает развитие грибка, но при этом оказывает негативное воздействие на окружающую среду. В связи с этим одним из передовых направлений в технологии переработки древесины в последнее время является термомодифицирование древесины, в результате которого получается экологически чистое термодерево, обладающее биостойкостью, долговечностью, стабильностью геометрических размеров, а также привлекательным эстетическим видом.

Термомодифицированная древесина — продукт температурной обработки древесины в ка-

мере при температуре от 180 до 230 °С без доступа кислорода.

Процесс термомодификации древесины состоит из трех основных стадий:

– сушка в камере при температуре от 100 до 130 °С до влажности 8–10 %;

– термообработка при повышенной температуре 180–230 °С в бескислородной защитной среде во избежание воспламенения;

– закаливание, т. е. снижение температуры до 80–90 °С и кондиционирование древесины до оптимальной влажности 4–7 %.

В процессе термической обработки древесины происходит ряд химических изменений с основными компонентами древесины — целлюлозой, гемицеллюлозой, лигнином. Сначала при малых температурах испаряются экстрактивные вещества — терпены, воск, фенолы, жиры. Они не являются структурообразующими и удаляются очень легко. Затем в интервале температур 180–230 °С по мере нагрева происходит разложение гемицеллюлозы с выделением уксусной кислоты, являющейся катализатором процесса гидролиза гемицеллюлозы до растворимых сахаров и глюкозы, которые вымываются из состава древесины. В результате снижается объем материала чувствительного к грибку, т. е. обеспечивается высокая биостойкость термодерева. С разложением гемицеллюлозы концентрация водопоглощающих гидроксильных групп снижается, отсюда очень низкая равновесная влажность материала и отсутствие гигроскопичности, а также высокая формоустойчивость термодерева. Очень важен момент, что разрыв цепочек гемицеллюлозы в отличие от целлюлозы не снижает прочности древесины, а напротив, улучшает ее устойчивость к сжатию и снижает уровень внутренних напряжений в материале. Лигнин транс-

формируется в реактивные молекулы при 200 °С и удаляется из древесины [1].

В качестве защитной среды используется водяной пар, инертные газы, вакуум, органические масла или их комбинации. В зависимости от выбранной защитной среды сформировались основные технологии получения термомодифицированной древесины:

1. Финская технология «*Thermowood*», голландская технология «*Plato*» — использование в качестве защитной среды водяного пара.

2. Французская технология «*Retification*», защитная среда — инертные газы, в частности азот.

3. Немецкая технология термической модификации в жидких органических веществах «*Oil Heat Treated*» (ОНТ), защитная среда различные растительные масла, например льняное, подсолнечное, рапсовое и пр.

4. Эстонская технология термической модификации древесины в вакууме.

Одной из наиболее изученных является финская технология «*Thermowood*». Термообработка древесины осуществляется в среде перегретого пара, которая отличается высокой себестоимостью процесса и дорогостоящим оборудованием, выдерживающим действие агрессивной паровой среды. Себестоимость термомодификации древесины по этой технологии составляет ~ 132 евро/м<sup>3</sup> [2]. Кроме того, существенным недостатком камер, использующих данную технологию, является отсутствие возможности предварительной сушки пиломатериала с высокой начальной влажностью в той же камере, что требует организации дополнительной сушильной камеры.

Сравнительный анализ способов термомодификации древесины показал, что самый длительный процесс — модификация в вакууме, а самый быстрый — в органических веществах. Преимуществом использования технологии термической модификации древесины в жидких средах, в отличие от газообразных, является отсутствие необходимости отвода газов, образующихся при разложении компонентов древесины. Однако эта технология имеет два существенных недостатка: она отличается значительной продолжительностью процесса за счет охлаждения материала естественным образом и не предназначена для обработки твердых пород древесины. При этом можно предположить, что технология термомодифицирования древесины в жидкостях рациональна для твердых пород благодаря их наименьшей пропитываемости.

Корректный сравнительный анализ технологий может быть выполнен только на стадии технологического проектирования производства в целом. В настоящее время технологическое проектирование деревообрабатывающих производств, определение их системной конфигурации производится на основе комплексного подхода, когда согласовываются потоки энергии и материалов различных реализуемых на этих производствах технологий. Это позволяет снизить себестоимость продукции и повысить ее качество.

Производство термомодифицированной древесины в силу ряда причин сдерживается высокими удельными затратами энергии и стоимостью оборудования, а также отсутствием квалифицированной нормативной базы на материал. Известные ТУ и ГОСТ [3] по существу не содержат требований к потребительским свойствам термомодифицированной древесины.

Так, себестоимость термомодификации древесины в расчете на 1 м<sup>3</sup> составляет от 60 до 200 евро, а продолжительность технологического цикла модификации при этом колеблется от 36 до 180 ч.

Для снижения себестоимости производства термомодификации древесины в Институте тепло- и массообмена разработана технология, в которой совмещен процесс сушки и термомодификации древесины, включающий предварительную сушку древесины способом сброса давления до влажности 8–10 % с последующей модификацией ее при температуре 180–230 °С в герметичной камере, заполненной маслом с температурой кипения выше 260 °С, охлаждение путем слива масла, вакуумирования древесины, подачи углекислого газа и повторного вакуумирования в течение 2–3 часов. Предложенная технология позволяет получить термодревесину высокого качества за счет предварительной высокотемпературной сушки методом сброса давления, обеспечивающей процесс без развития существенных внутренних напряжений, и последующей подачи СО<sub>2</sub>, позволяющей снять возникшие в процессе термообработки напряжения, а также сократить продолжительность стадий охлаждения. Снижение энергозатрат на проведение процесса охлаждения обеспечивается отсутствием необходимости дополнительного подвода энергии на получение водяного пара.

В качестве защитной среды на стадии термомодификации использовался также инертный газ, перегретый пар, а на стадии закаливания — углекислый газ [4, 5].

Процесс термообработки древесины проводился по режимам, представленным в табл.

Таблица

Режим термообработки древесины для трех способов модифицирования

Режим обработки	$t, ^\circ\text{C}$	Защитная среда
1 Высокотемпературная сушка методом сброса давления 2 Термомодификация древесины	130 200	Инертный газ
1 Высокотемпературная сушка методом сброса давления 2 Термомодификация древесины	130 200	Перегретый пар
1 Высокотемпературная сушка методом сброса давления 2 Термомодификация древесины	130 200	Растительное масло

После обработки древесина приобретает карамельный оттенок, изменяя свой цвет на более темный при увеличении температуры и времени обработки.

На рис. показано изменение цвета образцов древесины, обработанных при различных временах термообработки.

Для трех вариантов высокотемпературной обработки древесины были определены ее потребительские свойства: водопоглощение по ГОСТ [6], разбухание по ГОСТ [7], биостойкость по ГОСТ [8].

Термомодифицированная древесина обладает повышенной водостойкостью. Так, для образцов термообработанных в среде растительного масла в течение первых двух часов выдержки в воде водопоглощение в 6 раз меньше, чем у исходных контрольных образцов и составляет соответственно 10 % против 62 %. За 24 час выдержки в воде у термообработанной древесины по тому же режиму водопоглощение  $W_{10}$  составило 34 %, что в 2,4 раза меньше, чем для исходной необработанной сосны.

Разбухание древесины представляет собой явление, обратное усушке, и заключается в увеличении размеров и объема древесины при поглощении ею влаги.

Исследование разбухания образцов древесины проводилось согласно ГОСТ [7].

Оценка биостойкости образцов древесины сосны проведена согласно ГОСТ [8]. По окончании испытаний определяли стадию развития грибов

по пятибальной шкале и с учетом характеристик, обозначенных в ГОСТ (0 — абсолютно чистые образцы при визуальном осмотре и под микроскопом; 1 — визуально чистые образцы, при осмотре под микроскопом видны мелкие очаги в виде одного вида грибов, стадия спороношения отсутствует; 2 — поверхностное развитие мицелия отдельных видов грибов, стадия спороношения отсутствует; 3 — обильное разрастание мицелия отдельных видов грибов, начало стадии спороношения одного из видов; 4 — отчетливо виден рост грибов при визуальном осмотре, различные стадии спороношения большинства видов; 5 — глубокое поражение по всей площади образца, интенсивное спороношение).

Из трех исследованных вариантов термомодификации древесины наиболее высокую биостойкость проявил вариант термообработки древесины в среде растительного масла, на образцах которого споры плесневых грибов даже не проросли (0 баллов). В процессе термической обработки в структуре дерева разрушаются вещества, которые служат питательной средой для грибка и плесени, следовательно, термодревесина не гниет, не чернеет, не покрывается грибком и плесенью. Наиболее низкую биостойкость показал вариант необработанной древесины. На поверхности образцов были хорошо видны споры гриба *A. niger*, что свидетельствует о том, что в обычных условиях именно углеводная часть является питательной средой для микроорганизмов.

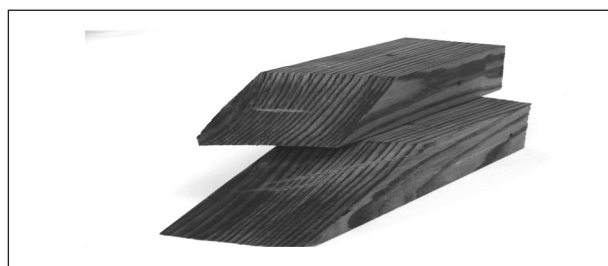
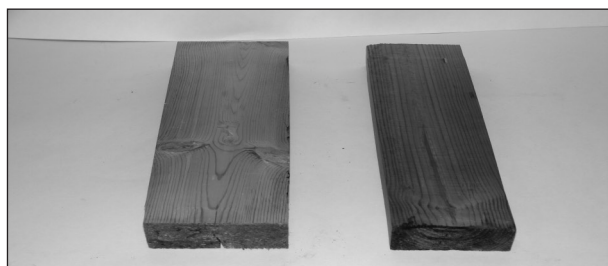


Рис. Изменение цвета сосновой доски в зависимости от времени термообработки

Анализируя полученные результаты по водопоглощению, разбуханию и биологической стойкости образцов термомодифицированной и необработанной древесины, можно сделать следующие выводы:

- интенсивный рост водопоглощения наблюдается в образцах в течение первых 8 ч, далее темп роста снижается и наименьшее водопоглощение наблюдается в образцах термообработанных в среде растительного масла;

- водопоглощение термообработанных образцов древесины в 2,5 раза меньше, чем необработанных;

- термомодификация повышает устойчивость древесины к поражению плесневыми и деревоокрашивающими грибами. На образцах, подвергшихся термомодификации, спороносящие колонии грибов отсутствовали. Наибольшая биологическая стойкость наблюдалась в образцах, термообработанных в среде растительного масла.

Таким образом, термомодифицирование дре-

весины является перспективным способом получения уникального материала, отличающегося экологичностью, абсолютной устойчивостью к биологическим поражениям, повышенной водостойкостью, геометрической стабильностью, а также широкой палитрой оттенков — от светло-желтого до черного.

Эти преимущества термообработанной древесины открывают новые, более широкие горизонты ее использования, позволяют создавать новые, более эффективные и конкурентоспособные изделия из древесины по сравнению с обычной.

Представленные результаты могут помочь при разработке и реализации эффективных технологий ускоренной сушки и модифицирующей обработки древесины на предприятиях лесной и деревообрабатывающей промышленности.

На основании проведенных исследований нами разработан проект технических условий на термомодифицированную древесину, учитывающий важнейшие ее потребительские свойства.

**Список использованных источников**

1. Finnish ThermoWood association: Справ. «Thermowood». 08.04.2003.
2. Технологии и оборудование производства ТМД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.termodrevesina.ru](http://www.termodrevesina.ru).
3. Древесина и пиломатериалы, стабилизированные по технологии «WEST-WOOD»: ТУ 5331-001-73809-2004.
4. Экспериментальное исследование термомеханической сушки древесины / Н.М. Горбачев [и др.] // Тепло- и массоперенос – 2007: сб. науч. тр.: Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси. – Минск, 2007. – С. 94–101.
5. Исследование процесса термомодифицирования древесины в жидкостях: Н.М. Горбачев [и др.] // Тепло- и массоперенос – 2012: сб. науч. тр.: Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. – Минск, 2012. – С. 75–80.
6. Метод определения водопоглощения: ГОСТ 16483.20-72. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 5 с.
7. Древесина. Метод определения разбухания: ГОСТ 16483.35-88. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 5 с.
8. Средства защиты древесины, экспресс-метод оценки эффективности антисептиков против деревоокрашивающих и плесневых грибов: ГОСТ 30028.4-93. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 5 с.

УДК 628.4.002.2

## ТЕРМИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ МЯГКОЙ КРОВЛИ

*Савчин В.В., Ложечник А.В., Хведчин И.В.,**Грушевский В.В., Никончук А.Н.**Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси*

Растущее количество отходов и нехватка средств для их переработки характерны для многих городов. Отходы разного рода, в том числе городского хозяйства и стройиндустрии, как правило, вывозятся на стихийные свалки, что негативно влияет на экологическую обстановку. Период разложения некоторых отходов, например битумосодержащих, в том числе отслужившей свой срок мягкой кровли достаточно велик. При этом крайне тяжело получить разрешение на их захоронение и стоимость этих услуг высока.

В настоящее время на рынке предлагается большой ассортимент разнообразных современных кровельных и гидроизоляционных материалов, отличающихся высокими качественными характеристиками, тем не менее при устройстве мягкой кровли часто используется рубероид или рубемаст. Однако под действием времени и агрессивных сред верхний слой любой рулонной мягкой кровли довольно быстро приходит в негодность. Не более чем через 2–3 года эксплуатации такого покрытия появляется необходимость проведения текущего наслаивающего ремонта — на старое покрытие укладывается новый слой рулонного материала. Количество слоев старого кровельного «пирога» достигает 15–20, а это огромная нагрузка. С течением времени производится капитальный ремонт данной кровли, при этом старое покрытие полностью убирается, сбрасывается с кровли и превращается в никому ненужный отход, загрязняющий окружающую среду. Зачастую свалки использованного кровельного покрытия возникают около жилых домов, на пустырях, в лесах, создавая пожароопасную ситуацию и серьезную экологическую проблему.

Мягкий кровельный материал, которым покрывают крыши многоэтажек, разлагается более длительное время, чем полиэтилен. При из-

готовлении современных кровельных материалов битум обогащают полимерами до 16–20 %. Переработанный битум не нуждается в обогащении, поэтому его себестоимость примерно в 1,5–2 раза ниже. Такой битум дешевле получаемого при переработке нефти — 65–70 % от объема вторсырья превращается в битум и битумную мастику, остаток составляет 15–30 %.

В связи с этим исследование процессов термической и термокаталитической деструкции полимерных материалов и разработка высокоэффективных промышленных способов переработки отходов полимерных материалов является весьма актуальной задачей.

**Анализ исходного материала.** На рис. 1 представлена дериватограмма образца мягкой кровли в инертной среде (аргоне). Дериватограмма наглядно показывает два основных этапа термолитической деструкции исходного материала, проходящие при характерных температурах 450 и 790 °С. На первом этапе (характерная температура 450 °С) теряется около 46 % массы исходного материала и происходит основной выход летучих соединений. На втором этапе (характерная температура 790 °С) теряется 14–18 % массы исходного материала и происходит деструкция тяжелых углеводородов. Коксозольный остаток составляет 35–37% от исходной массы материала.

**Экспериментальные исследования.** Для проведения исследований на установке с фильтрующим слоем [1] использовался материал мягкой кровли, измельченный до размеров 5×5×2 мм. Температура в реакторе (печь № 1) изменялась от 400 до 500 °С (рис. 2). В качестве транспортирующего газа использовался азот.

Собранные в конденсаторе жидкие продукты исследовались методом хромато-масс-спектрометрии.

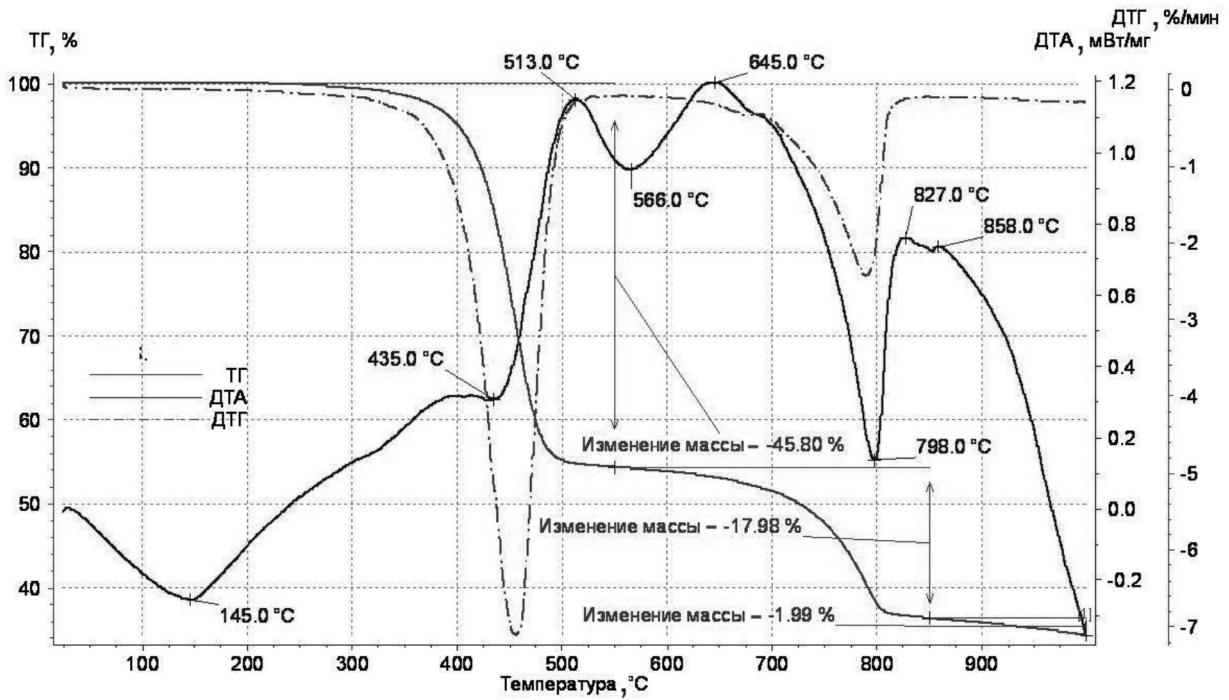


Рис. 1. Дериваторграмма в среде аргона образца мягкой кровли

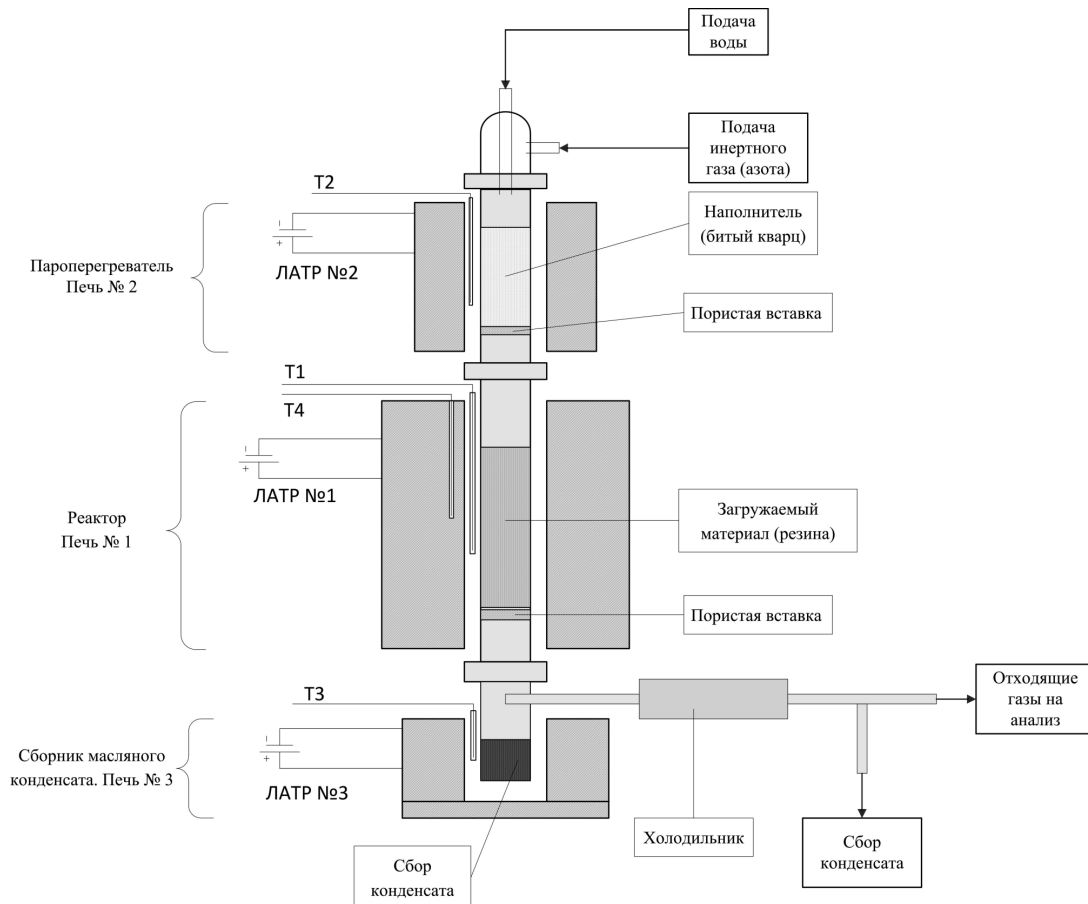


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

По результатам экспериментов можно сделать вывод, согласно которому битумная часть рубероида выплавляется и удаляется из зоны реактора до начала пиролизических процессов, что позволяет считать этот материал малопригодным для переработки в неподвижном фильтрующем слое.

Проведена серия экспериментов по переработке материала мягкой кровли в шнековом термолизном реакторе [2]. В качестве исходного сырья использовались отходы мягкой кровли, измельченные до размеров 5×5×5 мм.

Эксперименты проводились при температуре в реакторе 400–600 °С в среде азота и смеси азота с водяным паром (рис. 3).

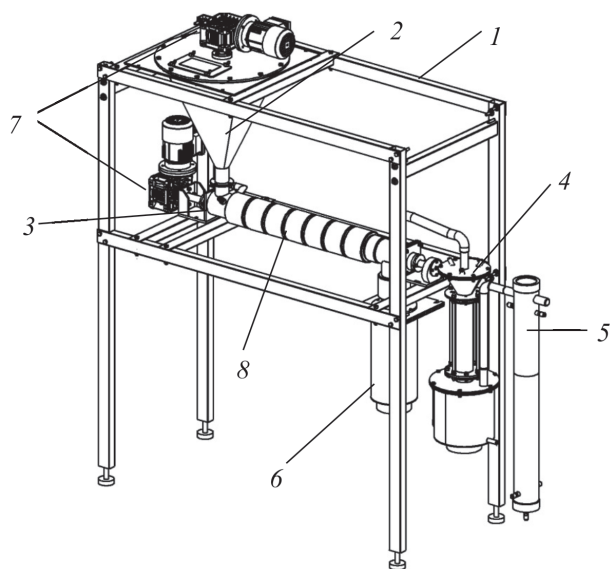


Рис. 3. Схема установки:

1 — опорный каркас; 2 — дозатор; 3 — шнековый реактор; 4 — конденсатор №1; 5 — конденсатор №2; 6 — бак углерода; 7 — мотор-редуктор; 8 — электрические нагреватели

В процессе переработки органическая часть под воздействием высоких температур разлагается и переходит в газообразное состояние. Минеральная часть собирается в баке на выходе из реактора.

**Продукты переработки.** С химической точки зрения полученные материалы характеризуются следующим составом: 20–30 % — асфальтены; 30–40 % — смолы; 20–30 % — масла. Температура размягчения природных битумов — 50 °С, для искусственных — 40 °С.

В конденсаторе № 1 собираются органические вещества с температурой кипения более 100 °С. На рис. 4, а представлен образец материала из

конденсатора № 1. По составу это вязкое маслянистое вещество темно-коричневого цвета с резким запахом. В конденсаторе № 2 собираются летучие органические вещества. Это жидкость светло-коричневого или рыжего цвета (рис. 4, б) с резким запахом.

Наблюдается интенсивный унос части жидкой фракции в виде мелкодисперсных аэрозолей («туман») вместе со смесью транспортирующего, термолизного газа и его неконденсирующейся части. Для предотвращения этого процесса требуется применение специальных методов улавливания мелкодисперсных аэрозолей.

Выполнен анализ химического состава отобранных образцов на хромато-масс-спектрометре Agilent. Далее приведены некоторые основные результаты качественного анализа проб, отобранных на различных стадиях переработки.

В хромато-масс-спектре выделяются две области:

**А** — до  $RT \sim 12$  с почти горизонтальной фоновой линией и неплохим разделением компонентов смеси; **Б** — труднолетучая часть с максимумом огибающей при  $RT \sim 25$ .

Соотношение частей **А:Б**  $\sim 60:40$ . По химической природе достоверно идентифицируемые вещества фракций **А** и **Б** принципиально различны. Если в части **А** основной вклад в спектр вносят замещенные бензолы и фенолы (толуол, ксилол, три-тетраметил бензол, крезол и др.), то в части **Б** — высшие парафиновые и олефиновые углеводороды вплоть до  $C_{20}$  (тетра-, пента- и гексадекан, эйкозан и др.).

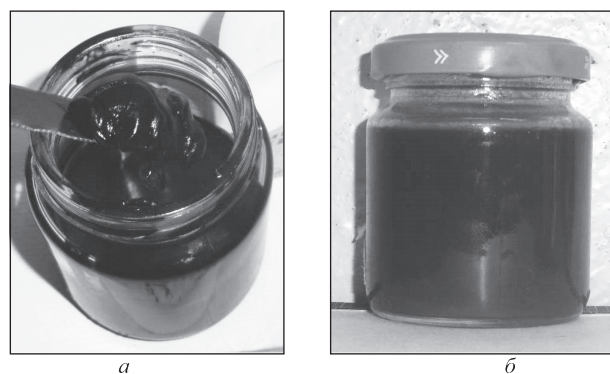


Рис. 4. Пробы из конденсатора № 1 (а) и №2 (б)

**Выводы.** Отходы мягкой кровли могут быть деструктурированы методом термолиза в бескислородной среде с получением углеводородных продуктов более легкой фракции (в основном замещенные бензолы и фенолы) — 45–48 % и более тяжелой фракции (в основном парафиновые



и олефиновые углеводороды) — 14–18 %, а также коксозольного остатка — 35–37 %, который на 75–80 % состоит из минеральных неорганических соединений.

Результаты проведенных экспериментов показали возможность регенерировать часть отходов путем мягкотермической паровой переработки, однако следует иметь в виду, что товарные битумы содержат известное количество неплавких асфальтенов, от содержания которых зависит температура размягчения мягкой кровли. В режиме отгонки с паром асфальтены частично разрушаются, и получаемый регенерат может служить лишь полупродуктом (на уровне мягких нефтепегонных битумов) для получения кровельного материала.

В коксозольном остатке содержится до 80 % минеральных неорганических соединений, и требуется дальнейшая переработка с целью удаления остаточного углерода, например, методом сверхадиабатического фильтрационного горения.

Испытанные технические решения термолитического реактора — с неподвижным фильтрующим слоем и шнековой системой перемещения материала через внутренний объем реактора — недостаточно эффективны из-за слипания исходного материала, что значительно снижает производительность. Для дальнейших исследований предполагается новая конструкция реактора с ленточной системой транспортировки перерабатываемого материала по типу подвижных колосниковых решеток.

#### *Список используемых источников*

1. Паротермолиз резинотехнических отходов с получением энергоэффективного материала / Ложечник А.В. [и др.] // Промышленная экология: тез. докл. науч.-тех. конф., Минск, сентябрь 2012 г. / БНТУ. – Минск, 2012. – С. 40.
2. Шнековый реактор для термолитического разложения резиновых отходов / Ложечник А.В. [и др.] // Тепло- и массообмен – 2012: сб. науч. тр. / Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси. – Минск, 2013. – С. 196–199.

УДК 536.246.2

## **АЛЬТЕРНАТИВНОЕ ТОПЛИВО ИЗ ОТХОДОВ**

*Г. И. Журавский, О. Г. Мартинов, Д. Э. Полесский, Н. С. Шаранда  
Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси*

Анализируя развитие технологий термолитической переработки органических материалов и результаты практического использования оборудования для получения топлив из различных видов отходов, можно сделать вывод о том, что в настоящее время данные технологии достигли высокого уровня совершенства и позволяют подвергать термической переработке практически все виды

органических отходов, включая и смешанные отходы, содержащие органические и неорганические составляющие [1–5].

Сложилось три направления развития термолитических технологий переработки органических материалов, определяющиеся выбором теплоносителя (газообразный, жидкий, твердый) для осуществления процесса термического разложе-

ния. Наиболее широкое распространение получило направление, связанное с использованием различного рода газообразных теплоносителей (продуктов сгорания топлива, инертных газов, водяного пара и их смесей). Создано значительное количество экспериментальных и опытно-промышленных образцов оборудования для переработки органических материалов широкого компонентного состава с получением жидких и газообразных углеводородов.

Анализ опыта строительства и работы оборудования по термолитической переработке органических отходов выявил ряд недостатков. Исследования продуктов переработки отходов путем их термического разложения показали, что жидкая углеводородная фракция, получаемая в результате термолитической переработки органических отходов, в лучшем случае может быть использована в качестве полуфабриката для производства различных аналогов нефтепродуктов. Применение жидкой фракции термолитической переработки автомобильных шин даже в качестве аналога мазута М-100 или аналога печного топлива не представляется возможным из-за ряда присущих ей качественных показателей, например, данная фракция не соответствует требованиям по температуре вспышки в закрытом тигле. Так, например, в зависимости от состава сырья и степени его термического разложения, значение температуры вспышки жидкой фракции вместо требуемого для мазута (жидких видов топлива) значения, равного не менее 92 °С, будет находиться за счет легких компонентов в пределах до 45 °С. Такую фракцию можно использовать в зимний период лишь как разбавитель мазута в объеме до 5 %.

Твердые продукты можно применять в качестве инертных добавок в строительных материалах, полимерах и некоторых других материалах. Из-за высокого содержания тяжелых металлов (цинка, свинца и др.) твердые продукты термолитической переработки автомобильных шин сами непосредственно не могут быть использованы как топливо (в брикетированном и любом другом виде).

В Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси выполнен комплекс исследований по определению физико-химических показателей продуктов термолитической переработки различных видов органических отходов и обоснованию наиболее перспективных направлений практического применения данных продуктов, например получения на их основе топлив.

В настоящей работе рассмотрено получение жидких и газообразных топлив из продуктов тер-

молитической переработки автомобильных шин. Необходимо отметить, что все элементы этого процесса могут быть применены для создания технологий получения топлив из продуктов термолитической переработки и различных других видов органических отходов (древесных, полимерных, сельскохозяйственных).

Одной из инженерных задач при разработке оборудования для термолитической переработки отходов является определение количественных показателей выхода продуктов термического разложения и, в том числе, их удельной теплоты сгорания. В результате экспериментов по термолитической переработке различного рода органических отходов разработана методика расчета выхода и удельной теплоты сгорания жидких, газообразных и твердых продуктов термического разложения отходов. Рассмотрим данную методику на примере термолитической переработки автомобильных шин.

Согласно экспериментальным данным, выход продуктов при термическом разложении автомобильных шин в среде перегретого водяного пара составляет: горючий газ — 8–12 %; жидкая фракция — 35–45 %; твердые продукты — 35–50 %; металлический лом — 8–12 %. Рассмотрим процесс термолитической переработки на основании законов сохранения массы

$$M_g + M_f + M_s = 1 \quad (1)$$

и энергии

$$M_g q_g + M_f q_f + M_s q_s = q_T + q_r = q_{\Sigma}, \quad (2)$$

где  $M_g$  — количество выделяющегося неконденсирующегося газа (кг/кг исходного продукта);  $M_f$  — количество выделяющихся жидких продуктов (кг/кг);  $M_s$  — количество твердых продуктов (кг/кг);  $q_g$  — удельная теплота сгорания неконденсирующихся газов;  $q_f$  — удельная теплота сгорания жидких продуктов;  $q_s$  — удельная теплота сгорания твердых продуктов (без металлического корда);  $q_T$  — удельная скрытая теплота термолитической переработки резины (не более 600 кДж/кг);  $q_r$  — удельная теплота сгорания автомобильных шин (без металлического корда), кДж/кг;  $q_{\Sigma}$  — суммарная энергия (сумма скрытой теплоты термолитической переработки и удельной теплоты сгорания резины).

При образовании продуктов термолитической переработки, а именно жидких и газообразных, между составляющими их химическими элементами образуются новые связи, иные по сравнению с исходной резиной. Разница между совокупными энергиями связей в исходной резине и в продуктах термолитической переработки выступает в роли скрытой теплоты. Этим и объясняется парадоксальность процесса термолитической переработки, заключающаяся в начальном выделении теплоты,

а затем в ее поглощении от внешних источников нагрева с последующим образованием конечных продуктов, даже более калорийных, чем исходное вещество.

Несмотря на то, что величина теплоты термолиты  $q_T = 600$  кДж/кг (0,6 МДж/кг) является малой по сравнению с  $q_r = 36$  МДж/кг и составляет  $(0,6/36) \cdot 100\% = 1,67\%$ , она должна учитываться в балансе энергии (2), как дополнительная энергия к энергии, содержащейся в исходной резине (изношенных шин). Для замыкания системы уравнений введем отношение количества жидких продуктов к количеству твердых  $\beta = M_f/M_s$ . Как установлено на основе экспериментальных данных при термолиты изношенных шин,  $\beta$  изменяется в пределах 0,7–1,0. Для других видов отходов пределы изменения этой величины будут иные, но в диапазоне от 0 до 1.

Решением данной системы уравнений будут соотношения для расчета выхода продуктов термолиты:

$$M_g = \frac{q_\Sigma - \frac{\beta}{1+\beta} \left( \frac{q_s}{\beta} + q_f \right)}{q_g - \frac{\beta}{1+\beta} \left( \frac{q_s}{\beta} + q_f \right)}; \quad (3)$$

$$M_f = \frac{\beta}{1+\beta} - \frac{\beta}{1+\beta} \left[ \frac{q_\Sigma - \frac{\beta}{1+\beta} \left( \frac{q_s}{\beta} + q_f \right)}{q_g - \frac{\beta}{1+\beta} \left( \frac{q_s}{\beta} + q_f \right)} \right]; \quad (4)$$

$$M_s = \frac{1}{1+\beta} - \frac{1}{1+\beta} \left[ \frac{q_\Sigma - \frac{\beta}{1+\beta} \left( \frac{q_s}{\beta} + q_f \right)}{q_g - \frac{\beta}{1+\beta} \left( \frac{q_s}{\beta} + q_f \right)} \right]. \quad (5)$$

В уравнении (1) не учитывается металлический корд (шины без металлокорда). В шинах с металлокордом (при учете металлического корда) уравнение (1) примет вид

$$M_g + M_f + M_s + M_m = 1, \quad (6)$$

где  $M_m$  — количество металлического лома в изношенных шин (кг/кг).

В этом случае в приведенных выше решениях (4) и (5) появится коэффициент  $(1 - M_m)$ .

$$M_f = \frac{(1 - M_m)\beta}{1+\beta} - \frac{\beta}{1+\beta} \left[ \frac{q_\Sigma - \frac{\beta}{1+\beta} \left( \frac{q_s}{\beta} + q_f \right)}{q_g - \frac{\beta}{1+\beta} \left( \frac{q_s}{\beta} + q_f \right)} \right]; \quad (7)$$

$$M_s = \frac{(1 - M_m)}{1+\beta} - \frac{\beta}{1+\beta} \left[ \frac{q_\Sigma - \frac{\beta}{1+\beta} \left( \frac{q_s}{\beta} + q_f \right)}{q_g - \frac{\beta}{1+\beta} \left( \frac{q_s}{\beta} + q_f \right)} \right]. \quad (8)$$

Рассмотрим следующий вариант. По данным компании «Альфа Рецикляж» (Франция) удельная теплота сгорания неконденсирующегося газа составляет  $q_g \approx 30$  МДж/кг. Определим, какой будет выход продуктов в этом случае при условиях

$$q_\Sigma = q_T + q_r = 36,6 \text{ МДж/кг};$$

$$q_s = 34 \text{ МДж/кг};$$

$$q_f = 42 \text{ МДж/кг};$$

$$\beta = 35/40 = 0,875;$$

$$M_m = 0,1 \text{ кг}.$$

Из расчетов следует, что выход горючего неконденсирующегося газа с удельной теплотой сгорания 30 МДж/кг составляет 14,7%; жидкой фракции с удельной теплотой сгорания 42 МДж/кг — 35,2%, твердых продуктов — 40,1%, выход металлического корда — 10%. Сравнение расчетных данных с экспериментальными показывает, что погрешность не превышает 1%.

На фото 1 показана шнековая установка для термолиты измельченных изношенных шин с получением жидкого топлива и твердого углеродного остатка. Установка разработана и изготовлена ООО «Модум – Техно» (г. Минск) по заказу компании «Альфа Рецикляж». С использованием данной установки получены продукты (жидкие и твердые) термолиты изношенных шин, которые исследовались для определения физико-химических показателей и возможности практического применения их в качестве топлив, или компонентов топлив. Полученные с использованием данной установки экспериментальные данные по выходу продуктов с погрешностью не более 1% совпадают с расчетными величинами, что подтверждает корректность принятых допущений при получении соотношений (7, 8).

Таким образом, приведенные выше соотношения могут быть использованы как для расчета количественных показателей выхода продуктов термолиты отходов, так и для определения их удельной теплоты сгорания.

Вследствие высокого содержания компонентов с низкой температурой вспышки получаемые из отходов путем термолиты жидкие углеводоро-

ды также имеют низкую температуру вспышки в закрытом тигле. При выпаривании части легких фракций температура вспышки жидких углеводородов, как показали эксперименты, увеличивалась. В состав экспериментальной установки входил стеклянный сосуд, размещенный в емкости с водой, установленной на электрическом нагревателе, позволяющем плавно регулировать количество подводимой тепловой энергии. Величина значения подводимой энергии определялась расчетным путем на основании измеренных значений величины тока и напряжения с поправкой на тепловые потери. Температура жидкости измерялась посредством термометра, а ее масса — весами.

Эксперименты проводились следующим образом. Сосуд с определенным количеством залитой в него жидкости (100 г) устанавливался в емкость с предварительно нагретой до 100 °С водой. По изменению температуры жидкости в сосуде фиксировался момент времени выхода на стационарный режим (при 100 °С). Затем при этой температуре сосуд с жидкостью выдерживался в течение 2–3 часов. Далее сосуд снимали с нагревателя и производили взвешивание. Количество испарившейся жидкости определялось как разность между исходным и остаточным количеством жидкости.

Результаты экспериментального исследования процесса испарения жидких углеводородов приведены в табл. 1.

*Таблица 1*

Скорость испарения жидких углеводородов в зависимости от температуры жидкости

Температура жидкости, °С	40	50	60	70	80	90
Скорость испарения, г/(м <sup>2</sup> ·с)	0,8	0,95	1,05	1,10	1,30	1,42

У полученных при разных температурах выдержки исходной жидкости проб температура вспышки определялась стандартным методом.

В табл. 2 представлены экспериментальные данные зависимости температуры вспышки от количества испарившихся углеводородов.

*Таблица 2*

Зависимость температуры вспышки от количества испарившихся углеводородов

Количество испарившихся углеводородов, % масс.	3	5	8	18
Температура вспышки, °С	37	39	50	80



*Фото 1. Шнековая установка термоллиза резиновых отходов:*

*1 — реактор термоллиза; 2 — система конденсации продуктов термоллиза; 3 — оборудование разделения жидких продуктов; 4 — топка для сжигания газов термоллиза; 5 — пульт управления*

Данные табл. 2 указывают на рост температуры вспышки в зависимости от количества испарившихся углеводородов. При этом необходимо отметить корреляцию температуры вспышки с температурой нагрева жидких углеводородов. В отдельных случаях при длительной выдержке (10–12 часов) температура вспышки жидких углеводородов практически равнялась температуре (82–85 °С), при которой жидкость выдерживалась в сосуде.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о возможности получения жидких углеводородов с заданной температурой вспышки посредством смешивания определенных фракций в требуемом количественном соотношении.

Одной из проблем термолитической переработки отходов является наличие в продуктах непредельных углеводородов и серы. Предлагаемый технологический вариант решения данной проблемы представлен на рис. 1. При этом для полу-

чения газа, содержащего восстановительные компоненты (СО и Н<sub>2</sub>), применяется газогенератор с использованием в качестве топлива твердых продуктов термолитической переработки.

В реактор 1 из емкости 16 через кран 17 подают жидкую фракцию и создают слой 2, в который из емкости 5 через решетку 3 подают газ, регулируя его расход краном 4. В емкость 5 газ закачивают с помощью компрессора 6, который подключен к газогенератору 7.

В газогенераторе 7 из бункера 8 постоянно загружают твердые продукты термолитической переработки отходов. Температуру в реакторе 1 контролируют по показаниям датчика 9. Подвод тепла в газогенератор 7 осуществляют через рубашку 10, в которую подают продукты сгорания из горелки 11, выводимые далее в дымовую трубу 15. От парогенератора 13 через кран 12 в газогенератор в необходимом количестве подают водяной пар, необходимый для получения водяного газа (смесь СО и Н<sub>2</sub>О).

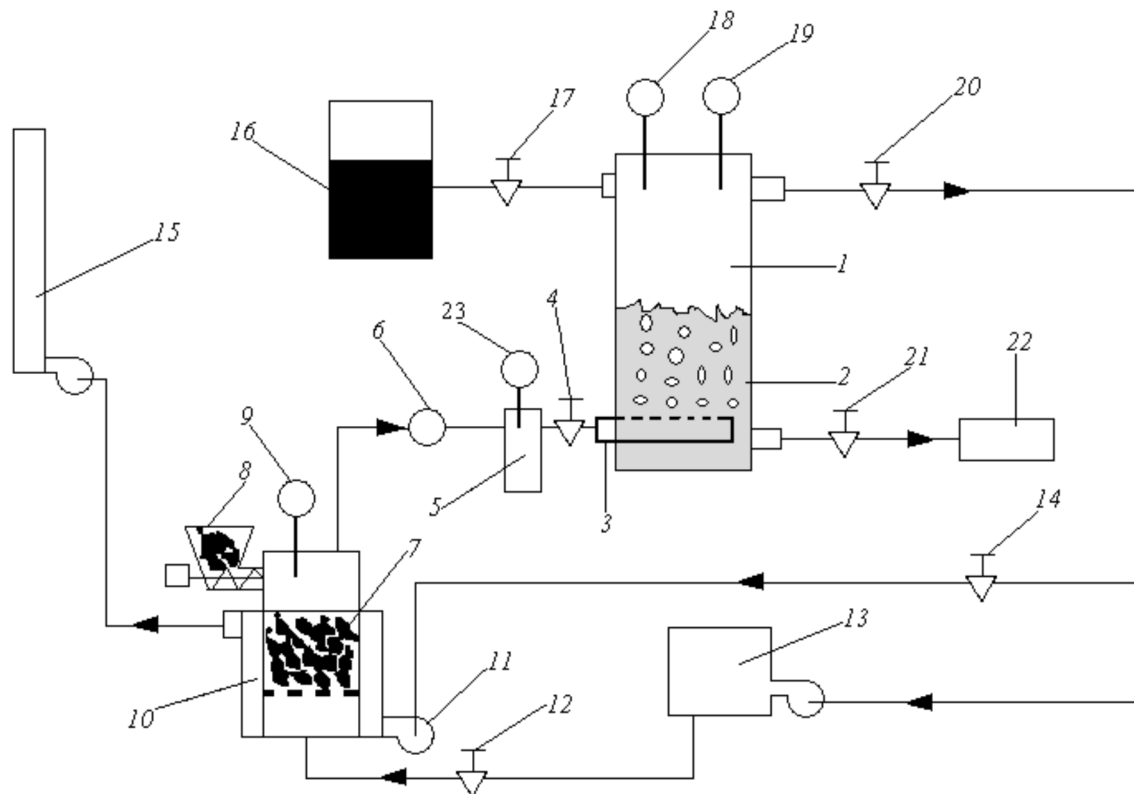


Рис. 1. Технологическая схема очистки жидкой фракции термолитической переработки шин от серы и непредельных углеводородов:

- 1 — реактор; 2 — жидкая фракция; 3 — барботер; 4 — кран; 5 — емкость с газом; 6 — компрессор; 7 — газогенератор; 8 — бункер со шнеком; 9 — датчик температуры; 10 — нагревательная рубашка; 11 — горелка; 12 — кран; 13 — парогенератор; 14 — кран; 15 — дымовая труба; 16 — емкость с жидкой фракцией термолитической переработки отходов; 17 — кран; 18 — датчик температуры; 19 — датчик давления; 20 — кран; 21 — кран; 22 — емкость-накопитель для обработанной жидкой фазы; 23 — датчик давления

В качестве топлива для работы горелки *II* используются выводимые из реактора *I* через краны *14* и *20* пары легких углеводородов. Температуру и давление в реакторе *I* контролируют по показаниям датчиков *18* и *19*. При барботаже водяного газа через слой жидкости

в реакторе *I* разрушаются непредельные соединения и снижается содержание серы (образуется  $H_2S$ ). Обработанную таким образом жидкость через кран *21* выводят в накопитель *22*. Давление газа в емкости *5* контролируют по показаниям датчика *23*.

**Список использованных источников**

1. Паровой термолиз органических отходов / Д.В. Аристархов [и др.]. – Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2001.
2. Железная, Т.А., Гелетуха, Г.Г. Современные технологии получения жидкого топлива из биомассы быстрым пиролизом. Обзор. Часть 1 / Т.А. Железная, Г.Г. Гелетуха // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т. 27, № 4. – С. 91–100.
3. Железная Т. А., Гелетуха Г. Г. Современные технологии получения жидкого топлива из биомассы быстрым пиролизом. Обзор. Часть 2 // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т. 27. – № 5. – С. 79–90.
4. Rubber: Types, Properties and Uses / Н. Zhuravski [etc.] // Nova Science Publishers. – 2011. – 670 p.
5. Аристархов, Д.В., Журавский, Г.И. Технологии и оборудование для переработки резинотехнических отходов / Д.В. Аристархов, Г.И. Журавский // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Germany. – 2012. – 124 с.

## **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ КОРОБКА ПЕРЕДАЧ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ**

*О.С. Руктешель, В.А. Кусяк, С.А. Сидоров*

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Развитие электроники и создание микропроцессоров нового поколения, появление высокоскоростных коммуникационных бортовых сетей и разработка стандартов ISO по передаче данных между встроенными электронными модулями дали мощный толчок к созданию и внедрению на автотранспортные средства высокоэффективных мехатронных систем управления силовым агрегатом.

Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является разработка автоматизированной мехатронной системы управления силовым агрегатом на базе сухого фрикционного сцепления и механической ступенчатой коробки передач.

За рубежом проблеме автоматизации управления силовым агрегатом уделяется огромное внимание. На сегодняшний день над созданием и совершенствованием автоматизированных мехатронных систем работают исследовательские центры ведущих мировых автомобиле-

строительных концернов и специализированных фирм: Daimler-Chrysler (Германия-США), Volvo (Швеция), Scania (Швеция), ZF Friedrichshafen AG (Германия), Eaton (США). Современные АМСУСА Mercedes Telligent, Scania Opticruise, Iveco Euro Tronic automated, Volvo Geartronic, Volvo I-Shift, ZF AS-Tronic, Eaton Fuller Auto/UltraShift серийно устанавливаются на грузовые автомобили, автобусы и автопоезда, улучшая их тягово-скоростные показатели и топливную экономичность [1, 2, 3, 4, 5].

По данным концерна Daimler-Chrysler AG (Германия – США) разработка электронно-диагностической системы Telligent позволила на 3–7 % повысить топливную экономичность грузовых автомобилей нового поколения Mercedes-Benz ACTROS (рис. 1), значительно снизить затраты на их ремонт и обслуживание, а также уменьшить износ силового агрегата.



Рис. 1. Mercedes-Benz ACTROS полной массой 40 т

Межсервисный интервал автомобилей нового модельного ряда, по сравнению с грузовиками Mercedes-Benz серии SK выпуска до 1996 г., увеличен вдвое и составляет 100000 км, моторесурс возрос до 1000000 км. Добавлен третий год гарантии на трансмиссионные узлы и агрегаты автомобиля (двигатель, сцепление, КП, мосты) при ограничении по пробегу до 450 тыс. км.

Эффект от использования только электронно-пневматической системы переключения передач Telligent GearShift automated для механических 16-ступенчатых коробок составил около одного литра топлива на 100 км пробега. Что объясняется, помимо более высокого КПД механических КП, использованием оптимальных законов и алгоритмов переключения передач с центральной синхронизацией, позволяющих сократить до минимума разрыв потока мощности и осуществить переключение в области минимальных удельных расходов топлива. Кроме того, в конструкции КП отсутствуют синхронизаторы, за счет чего существенно снижены масса и уменьшены габариты коробки передач. Электронное ограничение передаваемого коробкой передач крутящего момента в процессе трогания и маневрирования позволяет разгрузить зубчатые зацепления, валы и подшипники трансмиссии, что также уменьшает габаритные размеры и массу коробки передач, исключает перегрузку и преждевременный износ силового агрегата.

Учитывая перспективность вышеописанного направления, специалисты кафедры «Автомобили» БНТУ разработали макетный образец мехатронной системы управления 10-ти ступенчатой коробкой передач КамАЗ-14 в комплексе с двухдисковым фрикционным сцеплением и дизельным двигателем КамАЗ-740. Информационно-управляющий комплекс меха-

тронной системы (рис. 2) обрабатывает информацию, поступающую от датчиков:

- частоты вращения коленчатого вала ДВС, промежуточного и выходного валов КП;
- положения рычага регулятора ТНВД;
- положения педали акселератора;
- положений ИМ переключения передач основной и дополнительной КП;
- положения рычага выключения сцепления;
- срабатывания рабочей и вспомогательной тормозных систем
- положения селектора режимов.

На основании полученной от датчиков информации электронные блоки АМСУСА обеспечивают при отработке программы автоматическое или командное управление узлами силового агрегата автомобиля:

- управление КП при трогании, маневрировании и переключении передач;
- управление топливоподачей дизельного двигателя, в том числе и на переходных процессах;
- управление сухим фрикционным сцеплением;
- управление исполнительными механизмами вспомогательной тормозной системы (пневмоцилиндрами моторного тормоза и останова двигателя).

В командном режиме водитель инициирует момент, направление и шаг переключения посредством воздействия на селектор 27 (рис. 2), а сам процесс переключения передач осуществляется автоматикой в соответствии с управляющим алгоритмом.

В случае автоматического управления обеспечиваются следующие режимы работы силового агрегата:

- трогание автомобиля с места;
- маневрирование с низкими скоростями;
- выбор направления и момента переключения передач;
- организация процесса переключения на высшую передачу;
- организация процесса переключения на низшую передачу;
- предохранение двигателя от заглохания;
- выбор передачи после торможения автомобиля или движения накатом;
- автоматическое поддержание заданной водителем скорости движения.

Исполнительный механизм (ИМ) 25 (рис. 2) базовой коробки передач разработан в Проблемной НИЛ БПИ-БГПА-БНТУ [6] и представляет собой два силовых пневматических цилиндра, оси которых расположены под углом 90 градусов друг к другу (рис. 3). Конструкция поршней пневмо-

цилиндров — ступенчатая. Один из цилиндров осуществляет выбор штока требуемой передачи, а другой отвечает за перемещение выбранного ползуна и включение передачи.

Основными элементами исполнительного механизма [6] переключения передач (рис. 4) являются корпус 8 пневмоцилиндра, кольцевые поршни 37 и 40 с уплотнениями, шток 15 с поршнями 38 и 41. На рычаге 14, жестко связанном со штоком 15, нарезан зубчатый сектор, введенный в зацепление с зубчатой рейкой штока 13 пневмоцилиндра выбора передачи.

Пневмоцилиндр выбора штока требуемой пе-

редачи имеет такую же конструкцию, но расположен под прямым углом к пневмоцилиндру включения передачи. Шток-поршень 13 (рис. 4) перемещаясь, поворачивает рычаг 14, осуществляя выбор необходимого ползуна 17 коробки передач.

Вышеописанный исполнительный механизм устанавливается непосредственно на крышку КП (рис. 5) без каких-либо ее конструктивных изменений. Включение требуемой передачи происходит за счет подачи сигнала на определенную комбинацию электропневмоклапанов 3 (рис. 5), последовательно соединяющих с атмосферой рабочие полости цилиндров выбора 1 и включения 2 передач.

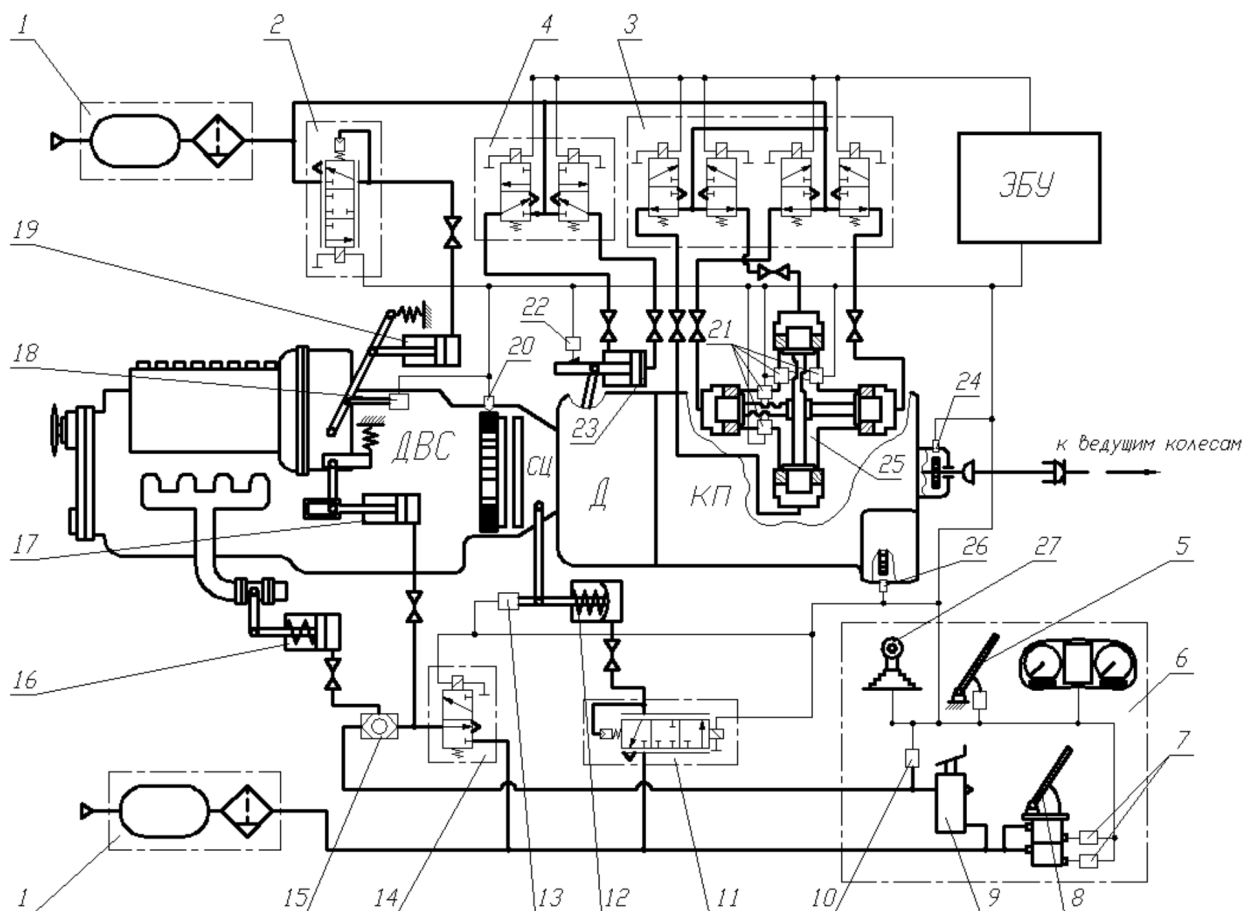


Рис. 2. Принципиальная схема автоматизированного силового агрегата:

- 1 — питающая часть пневмопривода; 2, 11 — пропорциональные ЭМК управления соответственно топливоподачей ДВС и сцеплением; 3 — блок ЭМК управления исполнительным механизмом КП; 4 — ЭМК управления делителем; 5 — педаль акселератора с датчиком положения; 6 — органы управления и панель приборов; 7, 10 — датчики давления; 8 — педаль тормоза с двухсекционным тормозным краном; 9 — клапан останова двигателя; 12, 16, 17, 19, 23, 25 — исполнительный механизм соответственно сцепления, моторного тормоза, выключения подачи топлива, рычага регулятора ТНВД и делителя; 13, 18, 22 — датчики перемещения; 14 — ЭМК управления моторным тормозом и выключением подачи топлива; 15 — двухмагистральный клапан; 20, 24, 26 — датчики частоты вращения; 21 — концевые выключатели; 25 — исполнительный механизм КП; 27 — селектор режимов



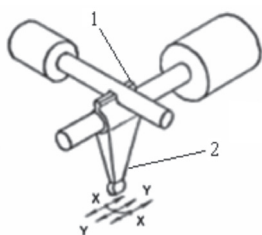


Рис. 3. Расположение пневмоцилиндров ИМ:  
1 — зацепление рейка — зубчатый сектор,  
2 — палец исполнительного механизма, 3 — шток  
вилки переключения; 4 — головка штока;  
5 — вилка переключения передачи

Переключение ступеней двухступенчатого повышающего делителя осуществляется с помощью штатного пневматического цилиндра 4 (рис. 5), установленного на общем со сцеплением картере [7, с. 84] (рис. 6) при подаче напряжения от контроллера на один из двух электромагнитных клапанов, дополнительно установленных на рампе 3 (рис. 5). При этом одна из рабочих полостей силового пневмоцилиндра 4 сообщается с нагнетательной магистралью, другая — с атмосферой, за счет чего происходит автоматическое включение прямой или повышающей ступени делителя.

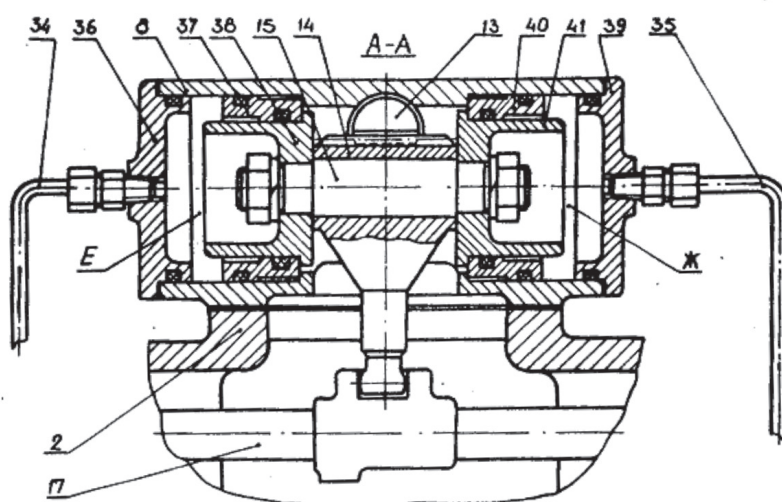


Рис. 4. Разрез пневмоцилиндра включения передачи:  
2 — крышка КП; 17 — шток КП (ползун с поводком); 34, 35 — трубопроводы со штуцерами;  
36, 39 — крышки с уплотнительными кольцами; Е, Ж — рабочие полости пневмоцилиндра

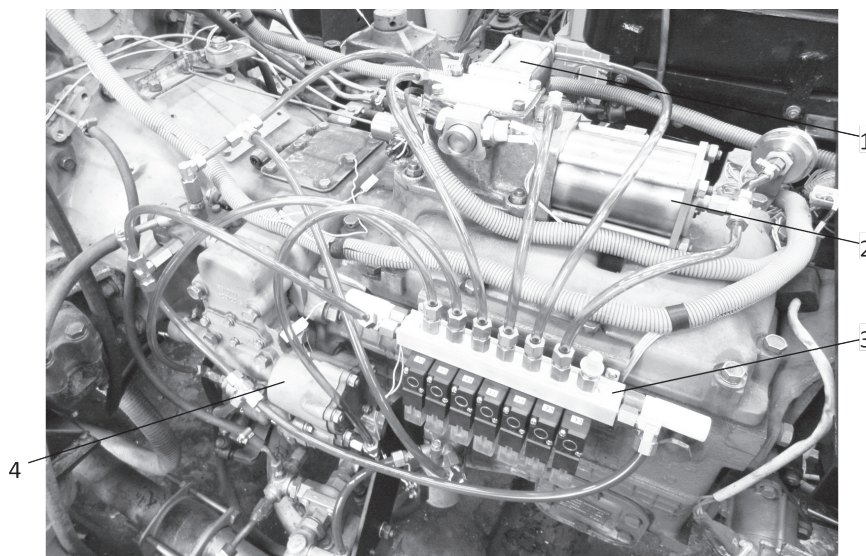


Рис. 5. Исполнительный механизм КП с рампой ЭМК:  
1 — пневмоцилиндр выбора штока (ползуна); 2 — пневмоцилиндр включения передачи;  
3 — рампа с электромагнитными клапанами; 4 — исполнительный механизм делителя

Работоспособность исполнительных механизмов автоматизированной коробки передач (рис. 2) была подтверждена полунатурным экспериментом. Управление силовым агрегатом осуществлялось оператором в командном режиме. Отдельные результаты экспериментов приведены на рис. 6.

Как видно из представленной осциллограммы большую часть времени (1,4 с) занимает процесс переключения в основной КП. Переход с повы-

шающей на прямую ступень делителя занимает 0,4 с. Общее время переключения передач (от момента перевода селектора до полного выключения сцепления) составляет 1,95 с (рис. 6).

Таким образом, представленные результаты полунатурного эксперимента подтверждают функциональность разработанного алгоритма, работоспособность спроектированной мехатронной системы и целесообразность автоматизации силовых агрегатов автотранспортных средств.

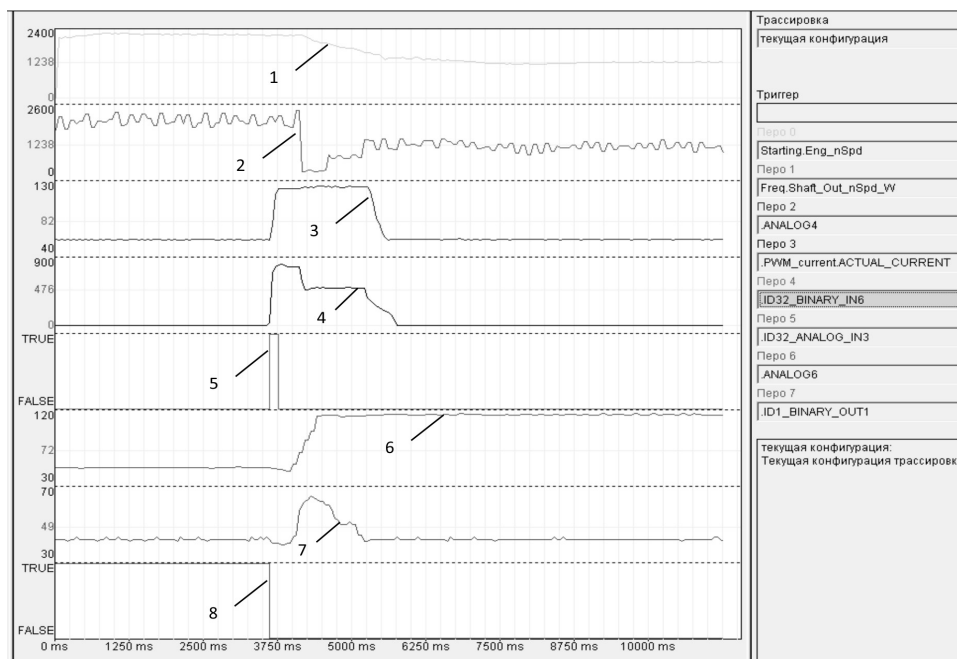


Рис. 6. Осциллограмма процесса переключения с II-й на III-ю передачу:

- 1, 2 — частота вращения соответственно коленвала ДВС и выходного вала КП в приводе к первичному валу, об/мин; 3 — перемещение рычага выключения сцепления, бит; 4 — ток ПЭМК управления сцеплением, мА; 5 — сигнал уровня «I» от перемещения рычага селектора в позицию «+»; 6 — перемещение вилки переключения делителя, бит; 7 — перемещение вилки включения передачи в базовой КП, бит; 8 — сигнал на управление электромагнитным клапаном делителя

**Список использованных источников**

1. Fuller®Automated Transmissions: AutoShift™ 18-Speed / Eaton tech. information: condensed specifications TRSL-0285 806 2M/WP. – Eaton Corporation, USA, 2006. – 2 p.
2. Fuller®Automated Transmissions: Fuller®UltraShift® LST -LHP, -LEP / Eaton tech. information: condensed specifications TRSL-0300, -0318 807 2.5M/WP, TRSL – 0314 807 2M/WP. – Eaton Corporation, USA, 2007. – 6 p.
3. Opticruise: description of operation and work description / Scania tech. information 05:05-02, Sheet-No. 1 585 369. – Scania CV AB, Sweden, 1995. – 84 p.
4. ZF AS Tronic и ZF AS Tronic mid: техническое руководство по установке, работе и вводу в эксплуатацию / ZF tech. information, Sheet-No. 1328 765 901f21. – ZF Friedrichshafen AG, Germany, 2005. – 105 p.
5. Тенденции развития автоматизированных систем управления механическими коробками передач большегрузных автомобилей / О.С. Руктешель [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2006. – № 2. – С. 50–54.
6. Механизм переключения передач транспортного средства: а. с. 1498643 СССР, МПК В60К 20/00 / С.Г. Стаскевич, [и др.]; заявл. 09.12.87; опубл. 07.08.89. – 3 с.
7. Автомобили КамАЗ-5320, КамАЗ 5410, КамАЗ-5541: руководство по ремонту автомобилей. – М.: автоэкспорт, 1990. – 237 с.

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ

*Суходольский А.В.*

*Главный государственный инспектор Госпромнадзора*

Большинство эксплуатируемых нефтяных месторождений в Беларуси находятся на последних стадиях разработки. Многие методы повышения нефтеотдачи пласта уже во многом себя исчерпали, а различные геолого-технические мероприятия зачастую оказываются малоэффективными и добыча снижается.

Одним из способов интенсификации таких процессов, а также увеличения коэффициента полезного действия является создание системы глубокопроникающих каналов фильтрации в продуктивном пласте. При относительно скромных затратах это позволяет интенсифицировать процесс добычи, увеличивать зону дренирования скважины.

РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» совместно с компанией СЗАО «Новинка» разработали комплекс оборудования для создания сети глубокопроникающих каналов фильтрации КФ40, позволяющий формировать несколько радиально расположенных отверстий в обсадной колонне и затем (это очень важно) с помощью гидромониторного размыва создать сеть радиальных каналов в продуктивном пласте с использованием колонны гибких труб.



Комплекс оборудования включает наземную миниколтюбинговую установку, оснащенную

БДТ диаметром 12,7 мм, комплектом насосного оборудования и станцией управления, а также компоновки подземного оборудования СК140А и СК146.



Данные компоновки спускаются на колонне насосно-компрессорных труб и состоят из:

- коллектора, предназначенного для заделки геофизического кабеля и компенсации осевого смещения компоновки;
- отклоняющего башмака, служащего для направления гидромониторной насадки в просверленное отверстие эксплуатационной колонны;
- блока сверления с механизмами привода вращения и перемещения режущего инструмента, обеспечивающего сверление обсадной колонны инструментом диаметром 20 мм;
- блока электроники, обеспечивающего прием/передачу информации на устье скважины, работу электродвигателей компоновки, связанного с оборудованием на устье скважины посредством геофизического кабеля, закрепленного на наружной поверхности насосно-компрессорной трубы;
- блока поворота и перемещения, обеспечивающего поворот компоновки на заданный угол для сверления следующего отверстия и перемещение

ее для совмещения выходного отверстия отклоняющего башмака с просверленным отверстием в эксплуатационной колонне;

– двустороннего механического якоря осевого действия с опорой на колонну.

Общая длина компоновки без якоря составляет 7,3 м, наружный диаметр 113 мм с увеличением до 114 или 119 мм (в зависимости от диаметра эксплуатационной колонны) на участке длиной 100 мм в зоне расположения шпиндельного узла механизма сверления.

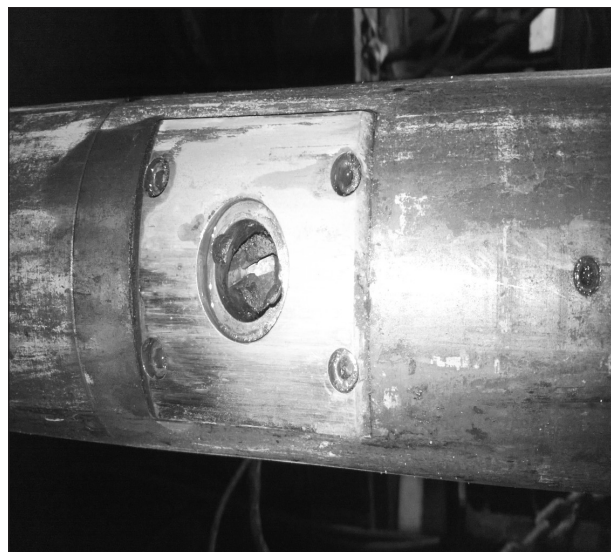
Компоновка предназначена для работы в эксплуатационных колоннах диаметром 139,7 и 146 мм с толщиной стенки до 10,5 мм, изготовленной из стали группы прочности Р-110.

В ходе проведения данной научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы проводились заводские испытания компоновки с участием представителя Госпромнадзора.

После успешных заводских были проведены опытно-промышленные испытания компоновки внутрискважинного оборудования СК146 на соответствие своему функциональному назначению в реальных условиях эксплуатации.

Работы проводились на добывающей скважине № 76 Вишанского месторождения на глубине 2687 м. Было выполнено сверление четырех отверстий с полным контролем хода работ в режиме реального времени. После перемещения отклоняющего башмака и совмещения его выходного отверстия с первым просверленным отверстием были поочередно промыты четыре канала фильтрации, каждый длиной 100 метров.

В процессе испытаний успешно была выполнена проверка работоспособности компоновки в реальных условиях эксплуатации и получены положительные результаты, в настоящее время скважина дает нефть. Комиссией подтверждено (установлено), что КФ40 сконструирован и изготовлен в соответствии с действующими в Беларуси техническими нормативными правовыми актами промышленной безопасности, в том числе правилами безопасности в нефтегазодобывающей промышленности, ГОСТами, СТБ. Уровни звука и звукового давления, создаваемые КФ40, соответствуют требованиям СанПиН от 16.11.2011 г. № 115, уровни вибрации



(общей и локальной) — требованиям СанПиН № 2.2.4/2.1.8.10-33, уровень концентрации вредных веществ в воздухе на рабочем месте оператора не превышает предельно допустимых, указанных в ГОСТ 12.1.005 и СанПиН от 31.12.2008 г. № 240.

Вращающиеся и движущиеся части механизмов ограждены защитными ограничениями, соответствующими требованиям ГОСТ 12.2.062. Комплекс оснащен органами управления технологическим оборудованием, соответствующим требованиям ГОСТ 12.2.064.

Конструктивно обеспечены также требования пожарной безопасности и безопасности электрооборудования.

Параметры микроклимата КФ40 соответствуют требованиям СанПиН 9-80.

Установка устройств освещения и световой сигнализации соответствует международным Правилам ЕЭК ООН № 48 (03), уровни шума — ЕЖКООН № 51.

Также обеспечены другие параметры безопасности, предусмотренные действующими нормативами по промышленной безопасности и охране труда.

На технологию создания сети глубокопроникающих каналов фильтрации получены патенты Беларуси и России, что позволит в дальнейшем выходить с предложением сервисных услуг для нефтяных компаний всех стран СНГ.

УДК 536.24:532.52

## УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОТРАНСФОРМАТОРОВ

*Л. Л. Васильев, В. В. Соловей\*, Д. Х. Харлампиди\*, В. А. Тарасова\*,  
А. С. Журавлев, Л. А. Драгун, А. П. Цитович*

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси  
\*Институт проблем машиностроения имени А. Н. Подгорного НАН Украины,  
г. Харьков, Украина*

В условиях ограниченных запасов ископаемого топлива и высоких мировых цен на углеводородное сырье поиски решения проблем энергосбережения и использования возобновляемых источников энергии для Беларуси и Украины, испытывающих дефицит энергоресурсов, не только актуальны, но и жизненно необходимы.

Одним из перспективных направлений энергетики может стать применение экологически безопасных тепловых машин, использующих источники тепла с низкотемпературным потенциалом (водные бассейны, грунт, грунтовые воды, отработанные воду и пар промышленных производств и т.д.). В развитых странах они составляют стратегический потенциал роста экономики. Для извлечения энергии из возобновляемых источников и эффективного ее использования необходимо специальное оборудование — аппараты для трансформации тепла (тепловые насосы, солнечные холодильники), которые позволяют экономить до 15–20 % первичной энергии (топлива) при производстве электричества, теплоты и холода.

Создание тепловых машин, использующих энергию источников низкопотенциального тепла, сопряжено с необходимостью решения сложных фундаментальных научных задач, в связи с чем целесообразно объединение усилий специалистов, занимающихся аналогичными либо смежными проблемами. В Институте тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (г. Минск)

и Институте проблем машиностроения имени А. Н. Подгорного НАН Украины (г. Харьков) проводятся исследования, направленные на создание теплонасосных установок сорбционного типа. Белорусской стороной выполняются эксперименты, украинские коллеги занимаются решением проблемы с помощью теоретических методов, используя методики синтеза схемных решений термотрансформаторов с учетом влияния вида низкопотенциального теплоносителя и условий энергопотребления объекта.

Разновидностью термотрансформаторов сорбционного типа являются металлогидридные термопреобразователи. В основу их работы положена особенность термодинамических свойств металлогидридов, заключающаяся в значительных удельных величинах энергии фазового перехода водорода из свободномолекулярного состояния в химически связанное и детерминированном соотношении между температурой и давлением в сорбционных процессах, что позволяет осуществить термосорбционный способ трансформации теплоты, изучаемый в Институте проблем машиностроения имени А. Н. Подгорного НАН Украины [1].

Если металлогидридный трансформатор теплоты предназначен для переноса теплоты с температурного уровня окружающей среды на более высокий температурный уровень, представляет интерес удельный расход теплоты высокого потенциала, отнесенный к единице теплоты средне-

го потенциала, теоретическое значение которого может быть определено по соотношению

$$\mathfrak{E}_c^B = \frac{Q_B}{Q_c} = \frac{q_{s,II}}{q_{s,II} + q_{s,I}}, \quad (1)$$

где  $q_s$  — энергия фазового перехода для металлгидридов I и II.

В реальных условиях в результате наличия изобарного гистерезиса уравнение (1) приобретает вид

$$\mathfrak{E}_c^B = \frac{Q_B}{Q_c} = \frac{(T_C - T_H)/T_C - (T_H - T_H^\delta)/T_H^\delta}{T_B - T_H/T_B - (T_H - T_H^\delta)/T_H^\delta}, \quad (2)$$

где  $T_H^\delta = (T_H - \Delta T)$  — значение действительной температуры сорбции водорода с учетом влияния гистерезиса, обусловленного упругой деформацией кристаллической решетки при внедрении водородной компоненты в структуру металлгидрида.

Выбор металлгидридов, используемых для реализации цикла теплового насоса, связан с температурными уровнями термотрансформации соотношением

$$\ln p_0 = \frac{\Delta S_{I(1)}}{R} - \frac{q_{s,I}}{RT_I} = \frac{\Delta S_{II(1)}}{R} - \frac{q_{s,II}}{RT_C}. \quad (3)$$

Важной составляющей при разработке конструкции термосорбционных устройств и выборе режимов их работы является наличие данных о термодинамических параметрах взаимодействия водорода с гидридообразующими материалами, которые наглядно могут быть представлены в виде диаграмм фазовых равновесий [2]. Построение таких диаграмм можно осуществить путем моделирования фазовых переходов между неупорядоченными фазами для гидридов индивидуальных металлов и гидридов интерметаллических соединений (ИМС) с различным изотопным составом посредством применения единого метода термодинамической теории возмущений как для молекулярной фазы  $H_2(D_2)$ , так и для водородной подсистемы гидридов. В последнем случае в рамках модели неидеального решеточного газа атомарного водорода, метод теории возмущений позволяет адекватным образом учесть влияние водород-водородного взаимодействия внедренных атомов в кристаллическую решетку ИМС [3].

Для корректного описания водородной подсистемы необходимо учитывать прямое взаимодействие между атомами водорода и косвенные «деформационные» вклады в потенциальную

энергию вследствие расширения кристаллической решетки при внедрении водорода. Если тип структуры металлической матрицы в гидридных фазах не отличается от кристаллической структуры ИМС, то определить избыточный химический потенциал, обусловленный внедрением водородного компонента, можно по формуле

$$\beta \mu_i^+(\theta, T) = \ln \frac{\theta}{1-\theta} + \frac{W_1 \theta}{T(1+\alpha c_s \theta)} + \frac{W_2 \theta^2}{T^2(1+\alpha c_s \theta)^2}. \quad (4)$$

Здесь  $\theta = C/C_s$  — относительная концентрация водорода, где  $C = n_{\text{ИМС}} \times c$  — концентрация водорода в виде отношения Н/ИМС;  $n_{\text{ИМС}}$  — число атомов в формульной единице;  $c$  — концентрация Н в единицах Н/Ме, т. е. на один атом матрицы;  $\alpha = c^{-1}(\Delta V(c)/V)$  — коэффициент дилатации решетки ИМС при растворении водорода. Величины  $C_s$  [Н/ИМС] — сорбционная емкость ИМС или максимальное число позиций внедрения Н-атомов в исследуемой фазовой области и  $c_s$  [Н/Ме] — максимальная концентрация  $c$  — связаны соотношением  $C_s = n_{\text{ИМС}} \times c_s$ .

Постоянные  $W_1$  и  $W_2$  обеспечивают связь между макроскопическими свойствами растворов внедрения ИМС — водород и микроскопическими (атомными) характеристиками водородной подсистемы и металлической матрицы ИМС и могут быть вычислены по следующим соотношениям:

$$W_1 = 2I_1 n_M (\sigma_1^3 / v_0) E_1 c_s, \\ W_2 = (3I_2 / 4I_1^2) W_1^2, \quad (5)$$

где  $I_1 = -5,585$ ,  $I_2 = 1,262$  — параметры модели в схеме метода теории возмущений (МТВ). Величины  $E_1 = \epsilon_1 / k$  ( $\epsilon_1$  — глубина потенциальной ямы) и  $\sigma_1$  (параметр длины) характеризуют потенциал  $u_H(r)$  парного (Н–Н)-взаимодействия.

Учитывая, что при термодинамическом равновесии системы «металлогидрид – водород» в области плато давления кроме условий равенства  $\mu_H^+(\theta)$  на границах  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз выполняется также равенство  $\mu_{Me}^{(\alpha)} = \mu_{Me}^{(\beta)}$ , причем учитывая  $\mu_{MH}^{(x)} = \mu_{Me}^{(x)} + c_x \mu_H^{(x)}$ , можно получить зависимость основных параметров процессов взаимодействия в виде

$$\ln p_{H_2}(\theta, T) = \ln p_{H_2}^{(PL)}(T) + 2\beta[\mu_H^+(\theta, T) - \mu_H^{+(PL)}(T)]. \quad (6)$$

где  $\mu_H^{+(PL)}(T)$  — координата плато на диаграмме «давление – концентрационная зависимость изотерм»  $\mu_H^+(\theta)$ .

Выбор в качестве фиксированной температуры в критической точке  $T_0$  позволяет получить

аналитическое выражение для определения величин изменения энтальпии и энтропии процессов  $\beta \rightarrow \alpha$ -перехода, необходимых для выбора металлгидридов согласно уравнению (3)

$$\beta \mu_H^{+(c)} = \beta \mu_H^+ (\theta_-, T_c) = -2,15 - \ln(1 + \alpha c_s). \quad (7)$$

С учетом изложенного подхода были получены параметры критической точки  $\beta \rightarrow \alpha$ -перехода для ряда металлгидридов, наиболее предпочтительных при использовании в теплонасосной технике.

Полученные данные по расчету диаграмм «давление – концентрация – температура» для широкого спектра гидридообразующих материалов позволяют применять их для определения термодинамических характеристик водородных теплонасосных установок сорбционного типа. Возможный вариант практической реализации конструкции металлгидридного теплового насоса представлен в [4].

Одним из видов теплового аппарата на твердых сорбентах является сорбционный холодильник, в испарителе которого поддерживается температура ниже температуры окружающей среды. Эти устройства не нуждаются в электрической энергии, поскольку в них происходит прямое преобразование тепла. Холодильники, использующие солнечную и другие виды альтернативных источников энергии, обеспечивают экономию топливных ресурсов и экологическую безопасность. Их конструкция должна обеспечивать не только заданные технические характеристики, но и определенные потребительские свойства: компактность, небольшую массу, невысокую стоимость, возможность изготовления и обслуживания в стране использования.

Эффективность сорбционного холодильника определяется выражением

$$COP = \Delta H_{по} / \Delta H_{нс},$$

где  $\Delta H_{по}$  — расход энтальпии на парообразование,  $\Delta H_{нс}$  — энтальпия на подогрев сорбента.

Высокая эффективность термодинамического цикла и, как следствие, увеличение преобразуемой за отдельный цикл удельной энергии адсорбционных машин достигаются путем применения в адсорберах композитных сорбентов, обладающих улучшенными характеристиками по сравнению с исходными материалами, создания более благоприятных условий теплообмена в испарителях/конденсаторах за счет покрытия их внутренних поверхностей пористым слоем, что повышает теплоотдачу при испарении жидкого

хладагента. Большое значение имеют удельная емкость сорбента и правильный выбор пары адсорбент/адсорбат (наиболее часто используется активированный уголь в сочетании с метанолом либо аммиаком [5–7]), интенсивность тепло- и массообмена внутри сорбента и между сорбентом и стенкой адсорбера, корпусом адсорбера и окружающей средой. В ряде стран мира разработаны и применяются в серийном производстве сорбционные холодильники на твердых сорбентах с холодопроизводительностью более 100 кВт. Используемые в настоящее время конструкции сорбционных холодильников обладают производительностью суточного получения льда 4–7 кг на 1 м<sup>2</sup> поверхности солнечного коллектора, при этом эффективность получения холода составляет 0,1–0,5 [8, 9].

В Институте тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси ведутся работы по созданию и исследованию аппаратов на твердых сорбентах, в которых для выработки холода и теплоты в дневное время применяется солнечная энергия, ночью — электрическая [10–13]. Процессы адсорбции и десорбции происходят при охлаждении и нагреве пористого тела соответственно и являются обратимыми. Для непрерывного получения холода необходимо четное количество адсорберов. Холодильник состоит из двух заполненных сорбентом адсорберов и системы терморегулирования на тепловых трубах. Энергия солнца нагревает испаритель тепловой трубы, горячий пар используется для десорбции попеременно в каждом из адсорберов. Тепловые трубы заправлены водой, в низкотемпературном контуре в качестве хладагента используется аммиак. Система терморегулирования на тепловых трубах позволяет обойтись для перекачки теплоносителя без механических насосов.

Нагрев блоков твердого сорбента осуществляется пародинамическими двухфазными термосифонами, для которых характерны следующие достоинства:

- способность транспортировать большие тепловые потоки при малых температурных перепадах благодаря высоким значениям коэффициентов теплопередачи —  $10^3$ – $10^5$  Вт/(К×м<sup>2</sup>);
- возможность обеспечивать быстрый нагрев сорбента в адсорбере в нестационарных режимах при условии, что корпус имеет низкую теплоемкость.

Пародинамические термосифоны являются очень гибкими и удобными устройствами для терморегулирования рабочих процессов. Они легко монтируются внутри сорбента.

Непрерывность работы сорбционного холодильника обуславливается наличием двух одинаковых контуров, функционирующих в противофазе (рис. 1). В состав каждого контура входит адсорбер/десорбер (2, 6). Два контура холодильника действуют в противофазе при постоянно включенной газовой горелке 12. Тепловая система отрегулирована для попеременного осуществления процесса десорбции в каждом контуре холодильника за счет поочередного включения термоэлектрических клапанов 5 и 10 через определенный промежуток времени. В процессе десорбции происходит нагрев адсорберов и охлаждение конденсаторов. Адсорберы/десорберы 2 и 6 заполнены активированным углеволокном «Бусофит», который для повышения сорбционных свойств насыщен химикатами — хлоридами металлов. Данные композитные сорбционные

материалы имеют увеличенную сорбционную емкость по сравнению с исходным углеволокном при сохранении высокой скорости сорбции и, соответственно, более высоких характеристик сорбции.

На рис. 2 представлены изотермы химической и физической сорбции аммиака на хлориде кальция и углеволокне, умноженные на соответствующий коэффициент, выражающий массовую долю данного сорбента в композиционном материале —  $\chi_1 = 0,32$  либо  $\chi_2 = 0,68$ .

Сумма графиков физической и химической сорбции для каждой из температур (в экспериментах — 20 и 40°C) дает изотерму адсорбции аммиака на компаунде «Бусофит – CaCl<sub>2</sub>». Этот результат указывает на то, что процессы физической и химической сорбции аммиака в данном материале проходят независимо, и объясняет

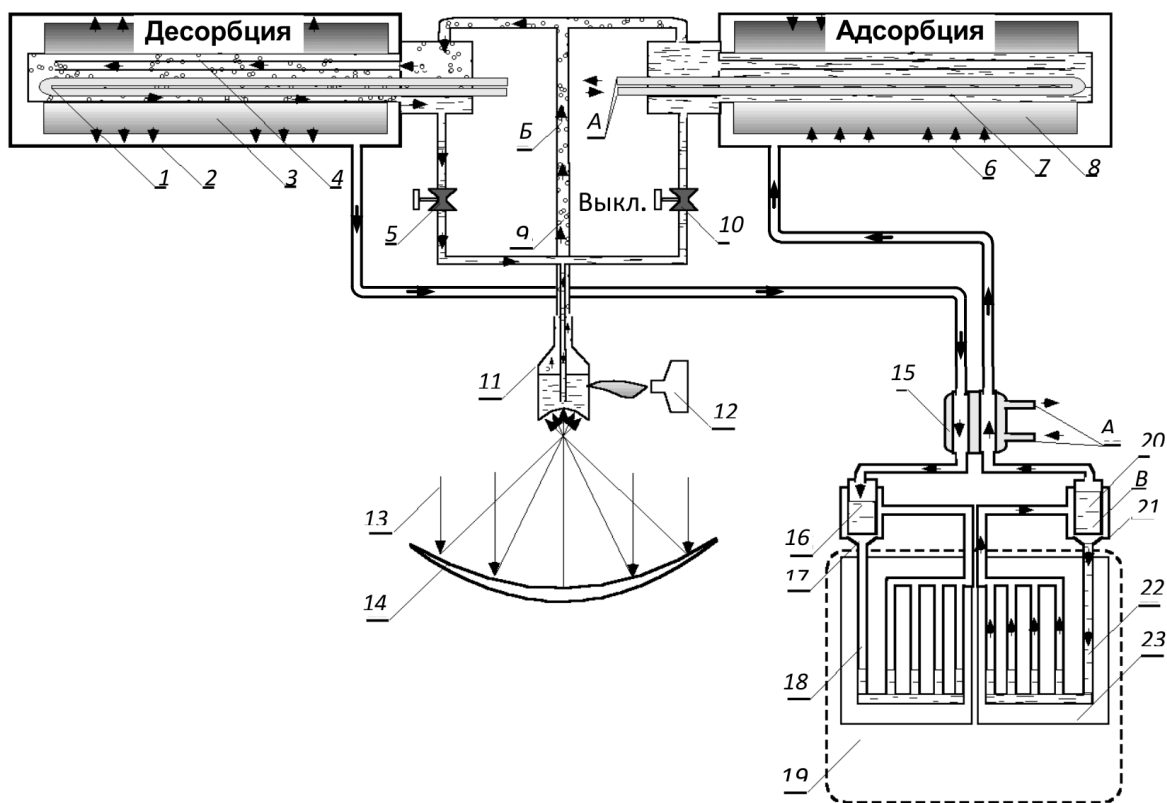


Рис. 1. Солнечный холодильник на твердых сорбентах:

- A* — рекуперационный контур охлаждения сорбента; *B* — двухфазная теплопередающая система (пародинамический термосифон); *B* — аммиачный (низкотемпературный) контур; 1 — теплообменник охлаждения сорбента; 2, 6 — адсорберы/десорберы; 3, 8 — сорбент; 4 — конденсатор термосифона; 5, 10 — термоэлектрические клапаны; 7 — конденсатор высокотемпературного контура; 9 — паровой канал; 11 — бойлер системы нагрева сорбента; 12 — газовая горелка; 13 — инсоляция; 14 — концентратор солнечной энергии; 15 — конденсатор; 16, 20 — ресиверы аммиачного контура; 17 — диффузор; 18, 22 — каналы холодильной панели; 19 — холодильный шкаф; 21 — конденсатор низкотемпературного контура; 23 — холодильная панель



поведение («ступеньки») изотерм на начальном участке. Наличие двух независимых механизмов сорбции обеспечивает высокую адсорбционную способность синтезированного материала.

Для трехадсорберного варианта холодильника целесообразно использовать хлориды бария, марганца и никеля, для двухадсорберного — бария и никеля.

Низкотемпературный адсорбер наполняется активированным углеволокном, пропитанным  $BaCl_2$ , высокотемпературный адсорбер — активированным углеволокном, пропитанным  $NiCl_2$ .

Время цикла «адсорбция/десорбция» составляет ~12 мин. Изменения температуры бойлера синхронны с колебаниями температуры адсорберов. На протяжении всего цикла средняя температура бойлера была около 110 °С (рис. 3). Для управления работой холодильника нет необходимости включать и выключать систему подвода тепла, нужно лишь периодически охлаждать и нагревать слой сорбента, изменяя его температуру с помощью жидкостного контура охлаждения А (рис. 1).

Применение адсорбционной солнечной холодильной машины позволяет получить холод без использования дополнительных преобразований энергии, например, в электричество. Внедрение в практику солнечных адсорбционных холодильных систем не только снижает уровень энергозатрат, антропогенное воздействие на среду обитания, но и позволяет комплексно решать задачи теплохладоснабжения и кондиционирования воздуха. Объединенное действие физической сорбции и химических реакций в едином пространстве и в одно и то же время для производства холода может существенно повысить коэффициент эффективности COP системы.

Потребителями адсорбционных солнечных холодильников могут быть сельское хозяйство (молочные фермы — охлаждение молока), жи-

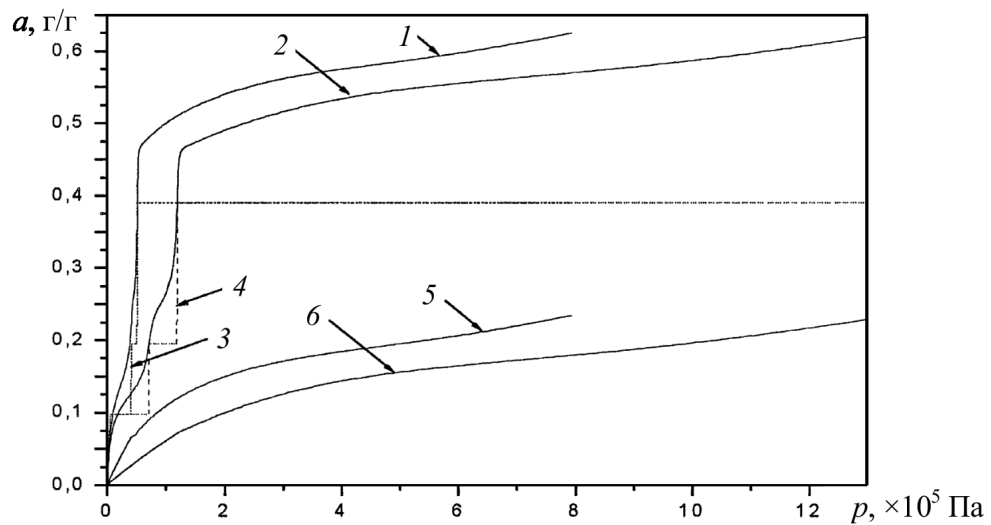


Рис. 2. Изотермы адсорбции аммиака при  $T = 20$  °С (1, 3, 5) и 40 °С (2, 4, 6):  
1, 2 — синтезированным композитным сорбентом «Бусофит+ $CaCl_2$ »;  
3, 4 — композитным сорбентом  $CaCl_2 \times \chi_1$ ; 5, 6 — «Бусофитом»  $\times \chi_2$

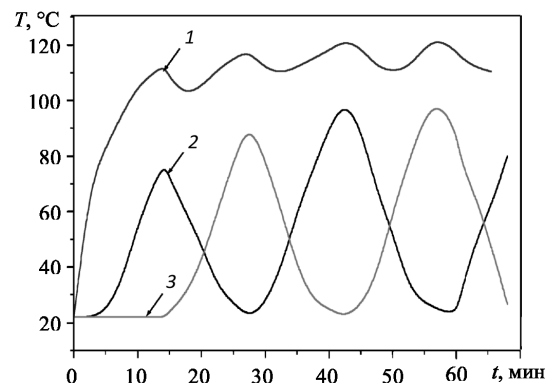


Рис. 3. Изменение температуры поверхностей в течение цикла: 1 — бойлера 11; 2 — адсорбера 2; 3 — десорбера 6 (рис. 1)

лищно-коммунальный сектор (системы кондиционирования) в регионах с большим количеством солнечных дней в году.

Работа выполняется при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект № Т13К-081 от 16.04.2013 г., и Государственного фонда фундаментальных исследований Украины, проект Ф54.2/018.

**Обозначения**

$a$  — величина сорбции, г/г; COP — коэффициент эффективности по холоду;  $H$  — энтальпия, Дж/моль;  $p$  — давление, Па;  $T$  — температура, °С;  $t$  — время, мин.

**Список использованных источников**

1. Абрамов, Ю. А. Системы хранения и подачи водорода на основе твердых веществ для бортовых энергетических установок / Ю. А. Абрамов, В. И. Кривцова, В. В. Соловей. – Харьков: Фолио, 2002. – 277 с.
2. Научные основы создания газотурбинных установок с термохимическим сжатием рабочего тела / Ю. М. Мацевитый [и др.]. – Киев: Наукова думка, 2011. – 251 с.
3. Шмалько, Ю. Ф. Фазовые равновесия в системах «водород – металлгидриды» / Ю. Ф. Шмалько, В. С. Маринин, К. Р. Умеренкова. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, Ин-т проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, 2007. – 136 с.
4. Металлогідридний тепловий насос періодичної дії: пат. UA 62180A України, F25B15/02. / В. В. Соловей, О. І. Івановський, Ю. Ф. Шмалько. – 2003. – Бюл. № 12.
5. Wang, R. Z. Performance improvement of adsorption cooling by heat and mass transfer recovery operation / R. Z. Wang // *Int. J. of Refrigeration*. – 2001. – Vol. 24. – No. 7. – Pp. 602–611.
6. Critoph, R. E. The use of the thermosyphon heat pipes to improve the performance of a carbon-ammonia adsorption refrigerator / R. E. Critoph // *Proc. of the IV Minsk Int. Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators”*. Minsk (Belarus). – 2007. – Pp. 35–41.
7. Solar powered solid adsorption ice maker / Ph. Grenier [ets.] // *J. of Solar Energy Engineering*. – 1988. – Vol. 108. – Pp. 332–337.
8. Wang, L. W. A review on adsorption working pairs for refrigeration / L. W. Wang, R. Z. Wang, R. G. Oliveira // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2009. – Vol. 13, No. 3. – Pp. 518–534.
9. Saha, B. B. Solar/waste heat driven two-stage adsorption chiller: the prototype / B. B. Saha, A. Akisawa, T. Kashiwagi // *Renewable Energy*. – 2001. – Vol. 23. – Pp. 93–101.
10. Jr. Solar-gas solid sorption refrigerator / L. L. Vasiliev [ets.] // *Int. J. Adsorption*. – 2001. – No. 7. – Pp. 149–161.
11. Васильев, Л. Л. Современное состояние проблемы тепловых насосов и холодильной техники / Л. Л. Васильев // *Энергосбережение. Практикум*. – 2009. – № 3. – С. 45–51; № 4. – С. 26–31.
12. Васильев, Л. Л. Современное состояние проблемы тепловых насосов и холодильной техники / Л. Л. Васильев // *ИФЖ*. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 763–778.
13. Васильев, Л. Л. Сорбционные тепловые насосы и охладители / Л. Л. Васильев // *Промышленная теплотехника*, 2011. – Т. 33, No. 7. – С. 79–81.

# МГНОВЕННОЕ СЕЛЕКТИВНОЕ ВНУТРИКЛЕТОЧНОЕ УСИЛЕНИЕ ХИМИОРАДИОТЕРАПИИ РАКА ПРИ ПОМОЩИ ПЛАЗМОННЫХ НАНОПУЗЫРЬКОВ

*Е. Лукьянова-Глеб<sup>1</sup>, К. Рен<sup>1</sup>, Р. Савант<sup>3</sup>, К. Ву<sup>1</sup>, В. Торчилин<sup>3</sup>, Д. Ланотко<sup>1,4</sup>*

<sup>1</sup>*Факультет Биохимии и Биологии Клеток, Университет Райс, г. Хьюстон, Техас, США*

<sup>2</sup>*Факультет клинической профилактики рака, Университет Техаса,  
Медицинский Раковый Центр Андерсона, г. Хьюстон, Техас, США*

<sup>3</sup>*Центр Фармацевтических Биотехнологий и Наномедицины,  
Северо-Восточный Университет, г. Бостон, Массачусетс, США*

<sup>4</sup>*Факультет физики и астрономии, Университет Райс, г. Хьюстон, Техас, США*

Основным ограничением эффективного и безопасного лечения агрессивных форм рака является их устойчивость к химио- и радиотерапии. Мы предложили и апробировали метод селективного внутриклеточного усиления химио- и химиорадиотерапии рака при помощи наночастиц золота и внутриклеточного взрывного воздействия, вызванного действием короткого лазерного импульса. Агрессивность опухоли является основополагающим фактором, определяющим эффективность формирования смешанных кластеров золотых наночастиц и наноносителей лекарств внутри раковых клеток. В результате воздействия короткого лазерного импульса и рентгеновского излучения на такой внутриклеточный кластер, происходит генерация плазмонного нанопузырька, вызывающего впрыск лекарства в цитоплазму клетки, и усиление рентгеновского излучения. Внутриклеточный синергизм взрывного воздействия плазмонного пузырька, впрыснутого лекарства и локального усиления рентгеновского излучения повышает эффективность химиорадиотерапии устойчивого к стандартному лечению агрессивного рака головы и шеи в 100 раз *in vitro* и в 17 раз *in vivo* при существенном снижении используемых в клинической практике доз лекарств до 2–3 % и рентгеновского излучения до 6 %. Кроме того, локальный характер используемых явлений и процессов существенно понижает неспецифическую токсичность воздействия на

нормальные клетки и ткани. Предложенный метод был назван квадрупля и включает в себя четыре клинически- апробированные компоненты и трансформирует стандартную макро-терапию в мгновенную внутриклеточную диагностико-терапевтическую процедуру с многократным усилением терапевтического эффекта и высокой селективностью.

## ВВЕДЕНИЕ

Высокая смертность от рака вызвана, в первую очередь, агрессивностью некоторых его форм (рака головы и шеи, мозга, простаты, легких и др.) и их устойчивостью к химио- и радиотерапии, особенно в тех случаях, когда дозы используемых лекарств ограничены их неспецифической токсичностью. Полное удаление таких опухолей часто невозможно из-за их близости с жизненно важными здоровыми тканями, что приводит к опасной остаточной микроскопической болезни (ОМБ) [1]. Отсутствие возможности безопасного удаления или эффективной химиотерапии подобных агрессивных форм рака, в конечном счете, сокращает процент выживания пациентов и существенно ухудшает качество их жизни [2]. Именно поэтому крайне необходимо разработать инновационный подход, который позволит: (i) локально усилить эффективность стандартной терапии только в раковых клетках, (ii) сохранить функциональность локализованных здоровых

тканей и органов, и (iii) уменьшить неспецифичную токсичность и время лечения.

Предложенный нами метод внутриклеточного усиления химио- и радиотерапии, основан на внутриклеточном совместном применении четырех клинически- апробированных компонент (рис. 1): инкапсулированного лекарства, наночастиц коллоидного золота (ЗНЧ) [3, 4], лазерного излучения в ближнем инфра-красном спектральном диапазоне и рентгеновского излучения. Разработанный нами новый метод был назван «квадрапия». Мы предположили, что совместное применение четырех вышеуказанных компонент стимулирует новые терапевтические механизмы внутри раковых клеток (рис. 1). Во-первых, клетки самостоятельно интернализируют функционализированные антителами золотые наночастицы и наноносители лекарств и формируют, таким образом, смешанные внутриклеточные кластеры за счет опосредованного рецепторами эндоцитоза. После этого, короткий лазерный импульс и рентгеновское излучение активируют вышеупомянутые кластер и запускают несколько локализованных внутриклеточных терапевтических процессов: взрывное механическое воздействие парового плазмонного нанопузырька (ПНП), мгновенный впрыск лекарства в цитоплазму клетки из механически разрушенных наноносителей и локальное усиление рентгеновского излучения. Внутриклеточный синергизм этих трех локальных, нестационарных и очень быстрых процессов усиливает терапевтический эффект стандартной химиорадиотерапии исключительно в раковых клетках.

Агрессивные и устойчивые к стандартной химио- и радиотерапии клетки плоскоклеточной карциномы головы и шеи были использованы нами для апробации квадрапии *in vitro* и *in vivo* с использованием клинически апробированных наночастиц коллоидного золота, инкапсулированного доксорубина и паклитаксела, пикосекундных лазерных импульсов и рентгеновского излучения.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### Внутриклеточный, индуцированный плазмонными нанопузырьками, впрыск инкапсулированного лекарства

В работе использовались клетки плоскоклеточной карциномы головы и шеи HN31.

Основным биомаркером этих клеток является рецептор эпидермального фактора роста (РЭФР), поэтому мы использовали клинически апробиро-

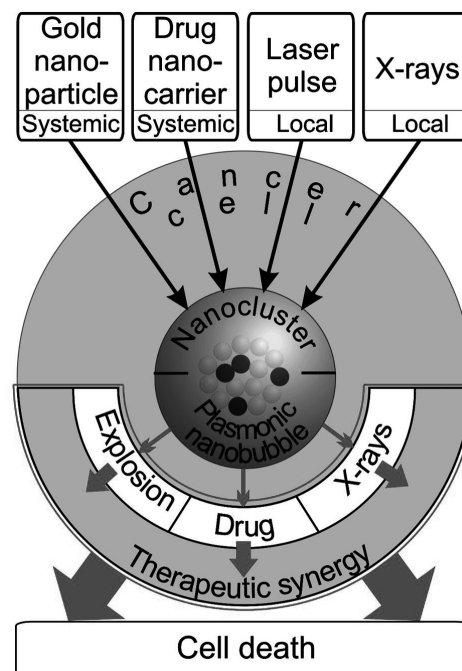


Рис. 1. Принцип квадрапии: четыре компонента – золотые наночастицы, инкапсулированное лекарство, короткий лазерный импульс с безорасной для нормальных тканей плотностью энергии и рентгеновское излучение – доставляются в простом трехшаговом протоколе: 1) раковые клетки формируют внутриклеточные нанокластеры из функционализированных антителами золотых наночастиц и наноносителей лекарств за счет опосредованного рецепторами эндоцитоза; 2) мгновенная активация нанокластеров с помощью короткого лазерного импульса и рентгеновского излучения запускает локализованные внутриклеточные процессы: генерацию плазмонных нанопузырьков (ПНП), мгновенный впрыск лекарства в цитоплазму клетки, локальное усиление рентгеновского излучения; 3) пороговый характер и внутриклеточный синергизм этих трех процессов селективно усиливает терапевтический эффект стандартной химиорадиотерапии только в раковых клетках

ванное к РЭФР антитело C225 [5] для селективной доставки золотых наночастиц и наноносителей лекарств в раковые клетки. На первом этапе работы, мы использовали функционализированные антителами золотые наночастицы диаметром 60 нм и липосомы, содержащие зеленый флуоресцентный краситель, для исследования механизма внутриклеточного, индуцированного плаз-

монными нанопузырьками, впрыска инкапсулированного в липосомы вещества (красителя или лекарства). Высокий уровень экспрессии РЭФР в клетках HN31 обеспечил формирование в них смешанных внутриклеточных кластеров золотых наночастиц и липосом, которые были визуализированы методом рассеяния света ЗНЧ (рис. 2, а, слева), однако детектирование флуоресцентного красителя в интактных липосомах практически невозможно из-за его квенчинга (рис. 2, а, в центре и справа). Далее, клетки были однократно облучены коротким лазерным импульсом (длительность импульса 70 пс, длина волны 532 нм, плотность энергии 40 мДж/см<sup>2</sup>) с одновременным детектированием ПНП в рассеянном ими свете дополнительного пробного лазерного импульса (рис. 2, б, в центре). Положение ПНП совпадало с положением кластеров золотых наночастиц в клетках (рис. 2, б, слева) и, согласно регистрируемому термо-оптическому отклику (рис. 2, б, справа), время жизни ПНП составляло 50–60 нс. Известно, что время жизни плазмонных нанопузырьков характеризует их максимальный диаметр [7]. Немедленно после генерации ПНП, трехмерные конфокальные изображения облученных клеток свидетельствовали о впрыске зеленого флуоресцентного красителя из липосом в цитоплазму клеток: яркая флуоресценция детектировалась в суб-микронных зонах, локализованных с кластерами золотых наночастиц, и местами генерации ПНП (рис. 2, с). Впрыск красителя наблюдался только в тех клетках, в которых генерировались ПНП. Таким образом, генерация плазмонных нанопузырьков небольшого диаметра (200–400 нм с временем жизни 60 нс [7]), их механическая, нетепловая, природа [7] и высокая скорость развития вызывают локальный впрыск красителя из липосом в цитоплазму клеток. Интенсивность флуоресцентных сигналов и размера флуоресцирующих зон анализировались в клетках, в которых генерировались ПНП (рис. 2, д).

Специфичность к раковым клеткам ПНП-индуцированного впрыска инкапсулированного вещества была исследована нами в смеси двух типов клеток HN31 и J32 с высоким и низким уровнем экспрессии РЭФР соответственно. Перед смешиванием клетки HN31 предварительно были окрашены красным флуоресцентным красителем, а клетки J32 — синим (рис. 2, е), что обеспечило их точную идентификацию в смеси. Затем полученная смесь клеток была обработана функционализированными золотыми наночастицами

и липосомами, в которые был инкапсулирован зеленый флуоресцентный маркер как в вышеописанном эксперименте. Для одновременного облучения сотен клеток в смешанной суспензии, мы использовали широкий лазерный пучок (532 нм, 40 мДж / см<sup>2</sup>).

На рис. 2, f представлены характерные термо-оптические отклики для клеток HN31 (красный) — время жизни составляло 55–60 нс, и J32 (синий) — облучение лазерным импульсом не вызывало генерацию ПНП по причине пороговой природы их возникновения [7]. Пороговый механизм возникновения ПНП предотвращает их генерацию в клетках с низким уровнем экспрессии РЭФР из-за отсутствия в этих клетках кластеров золотых наночастиц достаточно большого размера (рис. 3, h) и, следовательно, пороговая плотность энергии, необходимая для генерации нанопузырей в клетках J32, выше той плотности энергии, которую мы использовали в экспериментах [8, 9]. Флуоресцентные изображения клеток были получены непосредственно после их облучения (рис. 2, g): локальные флуоресцирующие зеленым внутриклеточные зоны детектировались только в клетках HN31. Анализ 150–180 клеток HN31 и J32 (рис. 2, h) показал, (i) что локальные флуоресцирующие зеленым внутриклеточные зоны локализованы с зонами генерации плазмонных нанопузырей, (ii) четкую внутриклеточную локализацию впрыснутого вещества и (iii) высокую специфичность к раковым клеткам ПНП-индуцированного впрыска содержимого липосом.

#### **Терапевтическая эффективность лекарств, золотых наночастиц, лазерного и рентгеновского излучения**

Мгновенный и долговременный терапевтические эффекты были исследованы нами *in vitro*. В качестве носителей лекарств мы использовали липосомы, наполненные доксорубицином (Доксил) [10], и мицеллы, наполненные паклитакселом [11]. Инкубация клеток только с этими липосомами или мицеллами демонстрирует низкую селективность к раковым клеткам стандартной химиотерапии и высокую устойчивость клеток HN31 к используемым лекарствам (рис. 3, а). Обработка клеток только ПНП вызывает селективный к раковым клеткам терапевтический эффект только при плотностях энергии, достаточных для генерации достаточно больших, разрушающих клетки [12], ПНП с временами жизни более 200 нс, в то время как маленькие

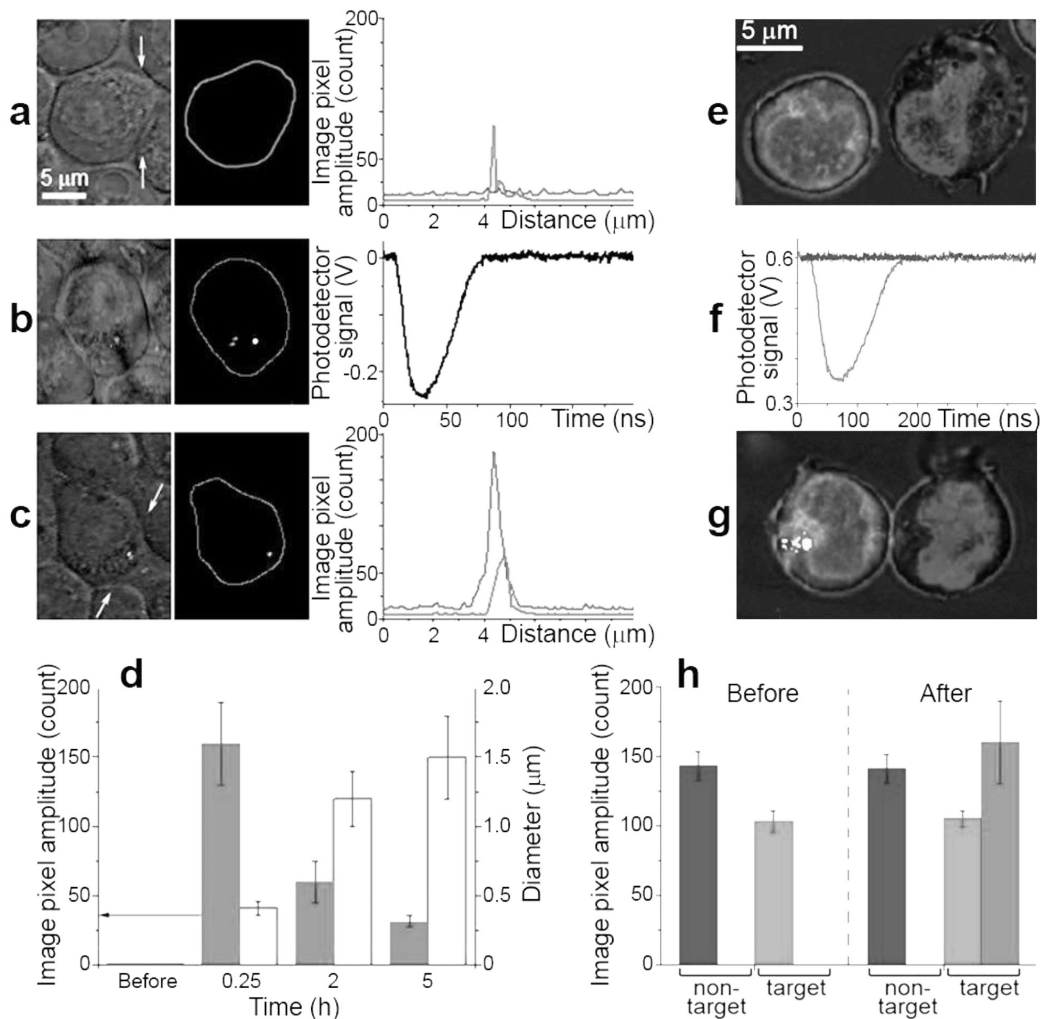


Рис. 2. ПНП-индуцированный внутриклеточный впрыск инкапсулированного в липосомы флуоресцентного красителя (кальцеин зеленый). Конфокальные изображения живых клеток, обработанных функционализированными антителами липосомами (зеленый) и золотыми наночастицами (красный): (a) Перед облучением лазерным импульсом (зеленый флуоресцентный краситель не детектировался в интактных липосомах вследствие его квенчинга). (b) Непосредственно во время воздействия лазерного импульса: генерируемые при воздействии лазерного импульса (532 нм, 40 мДж / см<sup>2</sup>) ПНП (в центре, изображение ПНП в рассеянном свете) строго коллокализованы с кластерами золотых наночастиц (слева); время жизни пузырей измерялось с помощью их термооптических откликов (справа), регистрируемых одновременно с изображения ПНП (в центре). (c) Изображения клеток непосредственно после генерации ПНП: зеленая флуоресценция красителя коллокализована с кластерами золотых наночастиц и ПНП. (d) Кинетика усредненной амплитуды флуоресцентных сигналов зеленого красителя (заштрихованное) и размера флуоресцентных зон (полые колонки) в отдельных клетках после генерации ПНП. (e) Специфичность внутриклеточного ПНП-индуцированного впрыска красителя. Объединенные оптическое и конфокальные трехцветные изображения клеток с высоким (красные) и низким (синие) уровнем экспрессии РФЭР, обработанные функционализированными к РФЭР золотыми наночастицами и липосомами с инкапсулированным зеленым красителем. (f) Термооптические отклики ПНП, регистрируемые в соответствующих клетках при однократном их облучении коротким лазерным импульсом (532 нм, 40 мДж / см<sup>2</sup>). (g) Изображения клеток через 5–10 минут после генерации ПНП: локализованный впрыск зеленого красителя происходит только в красных клетках благодаря селективной генерации неинвазивных ПНП, которые разрушили наноносители красителя (липосомы) и эндосомы и локально впрыснули краситель (зеленый) в цитоплазму клеток. (h) Усредненные амплитуды флуоресцентных сигналов в клетках до и после генерации ПНП. Данные: среднее ± стандартное отклонение (n = 150)

ПНП не влияют на жизнеспособность клеток (рис. 3, b). Однако эффективность терапевтического воздействия на раковые клетки существенно увеличивается в случае коллокализованного воздействия неинвазивных (55–60 нс) ПНП и наноносителей лекарств (рис. 3, d, режим D+PNB). Таким образом, ПНП-индуцированный впрыск доксорубина и паклитаксела увеличивает как эффективность так и селективность химиотерапии раковых клеток. Кроме того, отсутствие ПНП в нормальных клетках в сочетании с дозами используемых лекарств, сниженными до 2–3 % относительно стандартных, делает предложенный способ обработки клеток практически безопасным для нормальных клеток (рис. 3, e). Однако следует отметить, что предложенный нами способ усиления терапевтического эффекта требует эффективной коллокализации ПНП и наноносителей лекарств. Очевидно, что без такой коллокализации механическое воздействие ПНП не сможет влиять на носители лекарств, что приведет к низкому терапевтическому эффекту.

Анализ эффективности стандартной радиотерапии (без лекарств и золотых наночастиц) показал, что клетки HN31 являются достаточно устойчивыми к такому виду терапии (рис. 3, c) и их рост может быть эффективно приостановлен только при достаточно больших, небезопасных для нормальных клеток, дозах облучения. Предварительная обработка клеток золотыми наночастицами приводит к незначительному усилению радиотерапевтического эффекта вследствие локального испускания вторичных электронов [13, 14] (рис. 3, d). Комбинация химио- и радиотерапии вызывает предсказуемое усиление терапевтического эффекта (рис. 3, d, режим D+XR1) вследствие хорошо известного совместного воздействия лекарств и рентгеновского излучения [15, 16]. Однако следует отметить, что все стандартные клинически апробированные терапевтические компоненты и их, описанные выше, сочетания не достаточно эффективно приостанавливают рост агрессивных, устойчивых к химио- и радиотерапии раковых клеток.

Основными преимуществами предложенного нами метода (квадрупии), считающего в себе все четыре клинически апробированные компоненты, являются радикальное усиление терапевтического эффекта (рис. 3, d, режим D+PNB+XR1) и его высокая селективность (рис. 3, e, режим D+PNB+XR1). При этом максимальный эффект – полное подавление роста раковых клеток, был достигнут в случае обработки клеток рентгенов-

ским излучением через 6 часов после генерации в клетках неинвазивных ПНП (рис. 3, d, режим D+PNB+XR6). Идентично обработанные нормальные клетки продемонстрировали высокую выживаемость (рис. 3, e, режим D+PNB+XR1).

### Роль нанокластеров и ПНП в усилении терапевтического эффекта

Три типа клеток были использованы нами для исследования роли нанокластеров и ПНП в усилении терапевтического эффекта путем анализа эффективности формирования кластеров наночастиц в клетках, генерации ПНП и терапевтической реакции клеток на квадрупию и радиотерапию: нормальные эпителиальные клетки NOM9, медленно растущие и неагрессивные раковые клетки HN30 и очень агрессивные и быстрорастущие раковые клетки HN31 (оба типа раковых клеток относятся к плоскоклеточной карциноме головы и шеи [17]). Все три типа клеток одинаково обрабатывались золотыми наночастицами, наноносителями лекарств, лазерным и рентгеновским излучением. По сравнению с неагрессивными раковыми клетками, агрессивные HN31 клетки продемонстрировали высокую устойчивость к стандартной химиорадиотерапии (рис. 3, f), однако квадрупия полностью подавила рост этих клеток.

Усиление терапевтического эффекта в зависимости от степени агрессивности клеток количественно характеризовалось отношением степени выживаемости клеток, обработанных химиорадиотерапией к степени выживаемости клеток после обработки квадрупией, и анализировалось как функция скорости роста интактных опухолей, индуцированных из соответствующих клеток *in vivo* (рис. 3, g). Коэффициент усиления терапевтического эффекта быстро превысил 100 для агрессивных HN31 клеток, таким образом продемонстрировав эффект саморегуляции квадрупии в зависимости от агрессивности рака. Определенный нами коэффициент усиления терапевтического эффекта увеличивался с увеличением размера внутриклеточных кластеров золотых наночастиц и ПНП (рис. 3, g): для нормальных клеток характерно неспецифическое попадание отдельных наночастиц в нормальные клетки (рис. 3, h), однако из недостаточно для генерации ПНП и, следовательно, нормальные клетки выживают после обработки квадрупией; неагрессивные HN30 клетки формируют кластеры среднего размера (рис. 3, i), что приводит к генерации в них ПНП очень маленького размера,

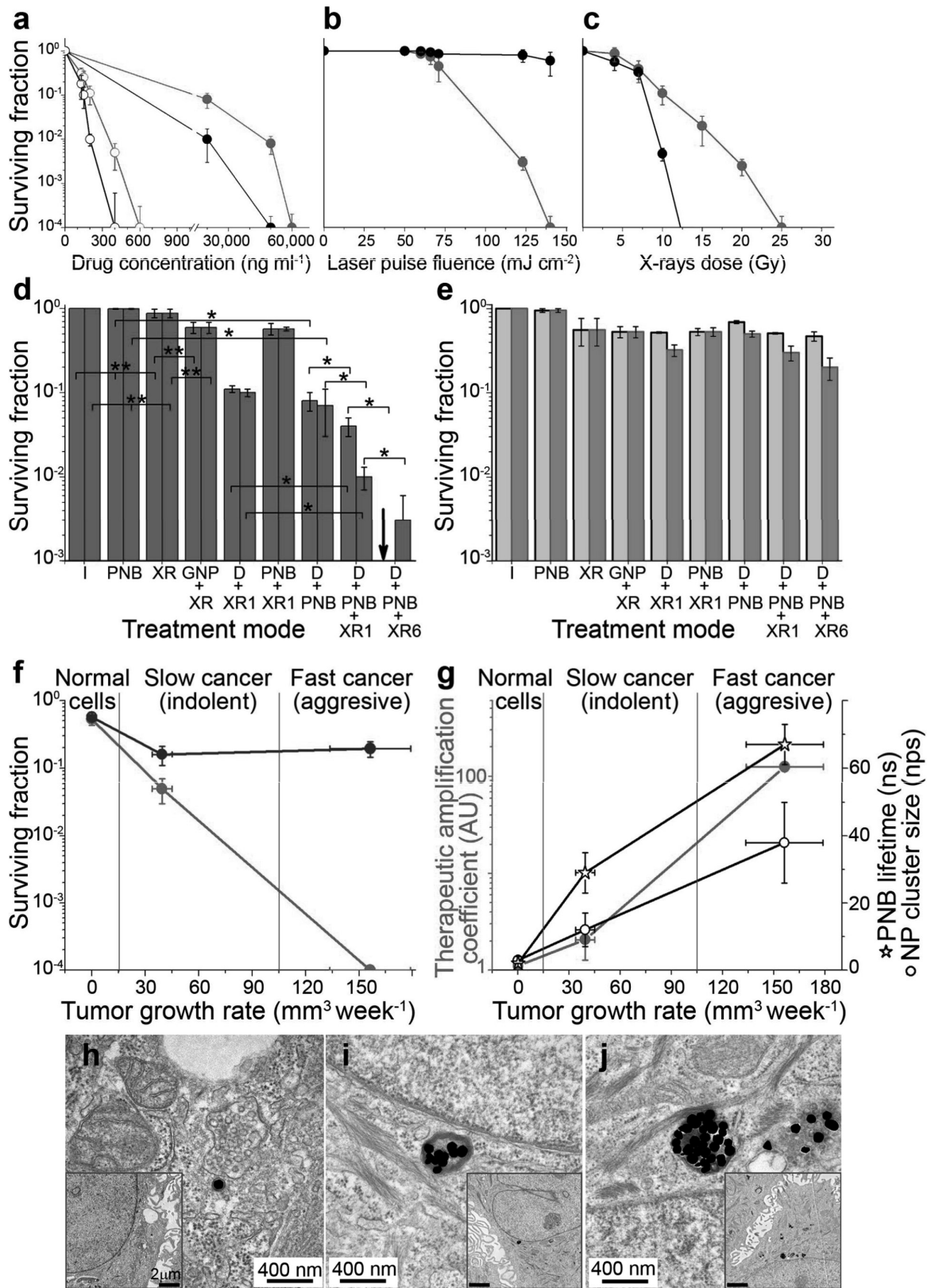


Рис. 3. Выживаемость (клоногенный тест) раковых клеток HN31 (красные символы) и нормальных клеток NOM9 (черные символы) после однократной терапевтической обработки как функция: (а) Концентрации лекарства (Доксил: заштрихованные символы; Мицеллярный паклитаксел: пустые



символы). (b) Плотности энергии воздействующего лазерного излучения, т.е. от размера ПНП. (c) Дозы рентгеновского излучения. (d) Выживаемость (клоногенный тест) клеток HN31 при различных режимах их обработки (I – интактные клетки; PNB – обработка ПНП (золотые наночастицы + лазер: 780 нм, 45 мДж / см<sup>2</sup>); XR – рентгеновское излучение, 4 Гр; GNP+XR – золотые наночастицы и рентгеновское излучение; D+XR – лекарство (серый – Доксил, 2 мкг мл<sup>-1</sup>; красный – Паклитаксел, 33 нг мл<sup>-1</sup>) и рентгеновское излучение (4 Гр); PNB+XR1 – ПНП + рентгеновское излучение через 1 час после воздействия лазера; D+PNB – лекарство и золотые наночастицы + лазер (ПНП); D+PNB+XR1 – лекарство и золотые наночастицы + лазер (ПНП) + рентгеновское излучение через 1 час после воздействия лазера; D+PNB+XR6 – лекарство и золотые наночастицы + лазер (ПНП) + рентгеновское излучение через 6 часов после воздействия лазера; черная стрелка обозначает полное отсутствие выживших клеток. (e) Выживаемость (клоногенный тест) нормальных (NOM9) клеток как функция режимов лечения идентичных (d). (f) Выживаемость (клоногенный тест) нормальных (NOM9), медленно растущих и неагрессивных раковых клеток HN30 и быстро растущих и агрессивных раковых клеток HN31 после стандартной химиорадиотерапии (синие символы) и квадрации (красные символы) как функция агрессивности рака (характеризующейся через степень роста опухолей, индуцированных соответствующими типами клеток *in vivo*), все терапевтические дозы как в (d). (g) Коэффициент усиления терапии (красные символы) (соотношение выживаемости клеток, обработанных стандартной химиорадиотерапией к выживаемости клеток, обработанных квадрацией), усредненный размер кластера золотых наночастиц (черные точки), измеренный через количество наночастиц в кластере, и максимальный размер ПНП (черные звездочки) в нормальных (NOM9), неагрессивных (HN30) и быстро растущих агрессивных раковых (HN31) клетках, измеренные как функция агрессивности рака, все терапевтические дозы как в (d). (h–j) ТЕМ изображения кластеров золотых наночастиц в клетках (время инкубации 24 часа; наночастицы были функционализированы C225) в нормальных клетках NOM9 (h), неагрессивных раковых клетках HN30 (i) и агрессивных раковых клетках HN31 (j), вставки показывают те же клетки с маленьким увеличением. Объем образца n = 6 (для (f) и (g)). Данные: среднее ± стандартное отклонение для трех независимых экспериментов \*P < 0.05, \*\*P > 0.05

вызывая небольшое усиление терапевтического эффекта; агрессивные HN31 клетки формируют большие кластеры наночастиц (рис. 3, j), что приводит к генерации ПНП максимального размера, вызывая тем самым и максимальный терапевтический эффект. Вышеописанные эксперименты *in vitro* продемонстрировали уникальную способность квадрации мгновенно и селективно (только в раковых клетках) усиливать терапевтический эффект химио- и радиотерапии при очень низких дозах лекарств (2–3 % от стандартных клинически-апробированных доз) и рентгеновского излучения (6–7 %) в ответ на воздействие короткого лазерного импульса и однократное рентгеновское облучение, и одновременно уменьшать неспецифическую токсичность лечения.

#### Апробация квадрации *in vivo*

Во-первых, мы исследовали эффективность внутривенной доставки золотых наночастиц и возможность локальной генерации и детектирования ПНП в лабораторных животных (мышях). Клетки HN31 были использованы для подкожного индуцирования раковой опухоли у животного. Через 24 часа после внутривенного введения функционализированных антителами C225 золотых наночастиц (0,8 мкг/г), большие кластеры наночастиц формировались только в опухоли, в

то время как в соседних нормальных тканях присутствовали только отдельные наночастицы, аналогично ранее полученным результатам *in vitro*. Воздействие на опухоль одиночного лазерного импульса в ближнем инфра-красном диапазоне спектра (780 нм, 45 мДж / см<sup>2</sup>) вызывало генерацию ПНП, которые детектировались *in vivo* путем регистрации акустических сигналов (рис. 5, a), возникающих при генерации ПНП. Амплитуды этих сигналов использовались нами в качестве метрики ПНП [14]. Процесс генерации ПНП *in vivo* отличается высокой специфичностью и чувствительностью к опухоли, безопасностью и спектральной селективностью [18].

Во-вторых, квадрация была апробирована в двух моделях *in vivo*. В первой модели, небольшое количество (180 тысяч) предварительно обработанных клеток HN31 было подкожно инжескировано в бок мыши и дальнейшее развитие опухолей наблюдалось в течение нескольких недель (рис. 4, a–c). Мы сравнили 4 группы животных: в первую группу инжескировались ничем необработанные (интактные) клетки, во вторую группу – клетки, обработанные золотыми наночастицами и ПНП с временами жизни 55 нс (концентрация наночастиц 2.4x10<sup>10</sup> наночастиц/мл, время инкубации с клетками – 24 часа, лазерное

излучение: 780 нм, 20 пс, 45 мДж / см<sup>2</sup>), в третью – клетки, обработанные Доксилем (концентрация лекарства – 2 мкг/мл) и рентгеновским излучением (однократная доза 4 Гр), и в четвертую – клетки, обработанные квадрапией (Доксил – 2 мкг/мл, золотые наночастицы – 2.4x10<sup>10</sup> наночастиц/мл, время инкубации лекарства и наночастиц с клетками – 24 часа, лазерное излучение: 780 нм, 20 пс, 45 мДж/см<sup>2</sup>, радиотерапия – 4 Гр через 6 часов после генерации ПНП). Через 15 дней после инъектирования клеток, опухоли максимального размера, выросли в случаях инъектирования интактных клеток (рис. 4, а, слева) и клеток, обработанных неинвазивными ПНП (рис. 4, а, справа). Стандартная химиорадиотерапия замедлила, но полностью не подавила рост опухоли (рис. 4, б, слева), в то время как квадрапия способствовала полному (рис. 4, б, справа) или практически полному подавлению роста опухоли (рис. 4, с).

Во второй модели, первичные опухоли индуцировались *in vivo* кодированными лициферазой клетками HN31, что дало возможность детектировать опухоли на самых ранних стадиях их развития. После формирования опухолей диаметром 3–5 мм животные были случайно разделены на 4 группы. Первая группа животных была обработана *in vivo* квадрапией: наночастицы золота и Доксил доставлялись внутривенно в концентрации 0.8 мкг/г веса животного и 1 мг/кг, соответственно, за 24 часа до генерации ПНП (лазер: 780 нм, 20 пс, 45 мДж/см<sup>2</sup>) и следующим, через 6 часов, рентгеновским облучением (4 Гр). Вторая группа животных подвергалась химиорадиотерапии (дозы лекарства и рентгеновского излучения аналогичны первой группе). Третья группа обрабатывалась только ПНП, т.е. наночастицы золота доставлялись внутривенно за 24 часа до обработки лазером (780 нм, 20 пс, 45 мДж/см<sup>2</sup>). И четвертая группа использовалась в качестве контроля, т.е. на опухоли не оказывалось никакого воздействия. После вышеописанной однократной обработки, объем и биолюминесценция опухолей еженедельно оценивались во всех животных (рис. 4, d–g). Видно, что квадрапия быстро подавила рост опухолей на первой неделе после обработки (рис. 4, e, g): средний объем опухолей достиг всего 3 % от объемов опухолей в контрольной группе и 6 % относительно группы животных подвергшихся химиорадиотерапии (рис. 4, f). Кроме того, обработка опухолей только ПНП или химиорадиотерапией характеризуется достаточно низкой терапевтической эффективностью и замедляет рост опухолей незначительно (рис. 4, g) в

отличие от квадрапия, которая в радикально (в 17 раз) усиливает эффект химиорадиотерапии после однократного ее применения (рис. 4, g).

Далее, мы оценили применимость квадрапии для диагностики и дополнительной обработки ОМБ непосредственно во время удаления злокачественной опухоли. Первичные опухоли диаметром (8–10 мм) были индуцированы *in vivo* с помощью клеток HN31. Золотые наночастицы и Доксил были введены в животных внутривенно за 24 часа до резекции опухоли и вся послеоперационная зона была облучена в течение 20–30 секунд широким лазерным пучком (780 нм, 20 пс, 45 мДж/см<sup>2</sup>) немедленно после резекции опухоли (рис. 5, а). Акустический метод детектирования ПНП был использован нами для одновременной регистрации генерируемых ПНП (рис. 5, а). Мы сравнили амплитуды акустических сигналов ПНП в первичной опухоли, послеоперационной зоне и прилегающих нормальных тканях в животных, обработанных и необработанных золотыми наночастицами (рис. 5, б). Полученные в послеоперационной зоне сигналы ПНП свидетельствуют о наличии ОМБ (рис. 5, б), что было впоследствии подтверждено локальным рецидивом опухоли. Кроме того, стандартный акустический метод детектирования ОМБ, без генерации ПНП, не показал наличие этой опасной болезни в тех же самых животных. Этот эксперимент, продемонстрировал высокую чувствительность и специфичность мгновенной диагностики ОМБ с помощью ПНП в реальное время, непосредственно во время проведения операции, и без предварительного взятия биопсийного материала.

Эффективность послеоперационной обработки ОМБ, была исследована нами на трех группах животных: 1) стандартная резекция опухоли, 2) резекция опухоли в сочетании с химиорадиотерапией и 3) резекция опухоли в сочетании с квадрапией. Присутствие ОМБ было подтверждено немедленно после резекции опухоли, путем детектирования ПНП как описано выше. Повторное возникновение опухоли (рецидив) наблюдалось в 100 % случаев на 2–4 недели после операции как в случаях только резекции первичных опухолей (рис. 5, a, f), так и в случаях комбинирования хирургии и стандартной химиорадиотерапии (рис. 5, d, f), в то время как сочетание хирургии и квадрапии эффективно подавило возникновение опухолей после лечения (рис. 5, e, f). Таким образом, квадрапия обеспечивает одновременно эффективное детектирование и лечение ОМБ без использования дополнительных методов или устройств.

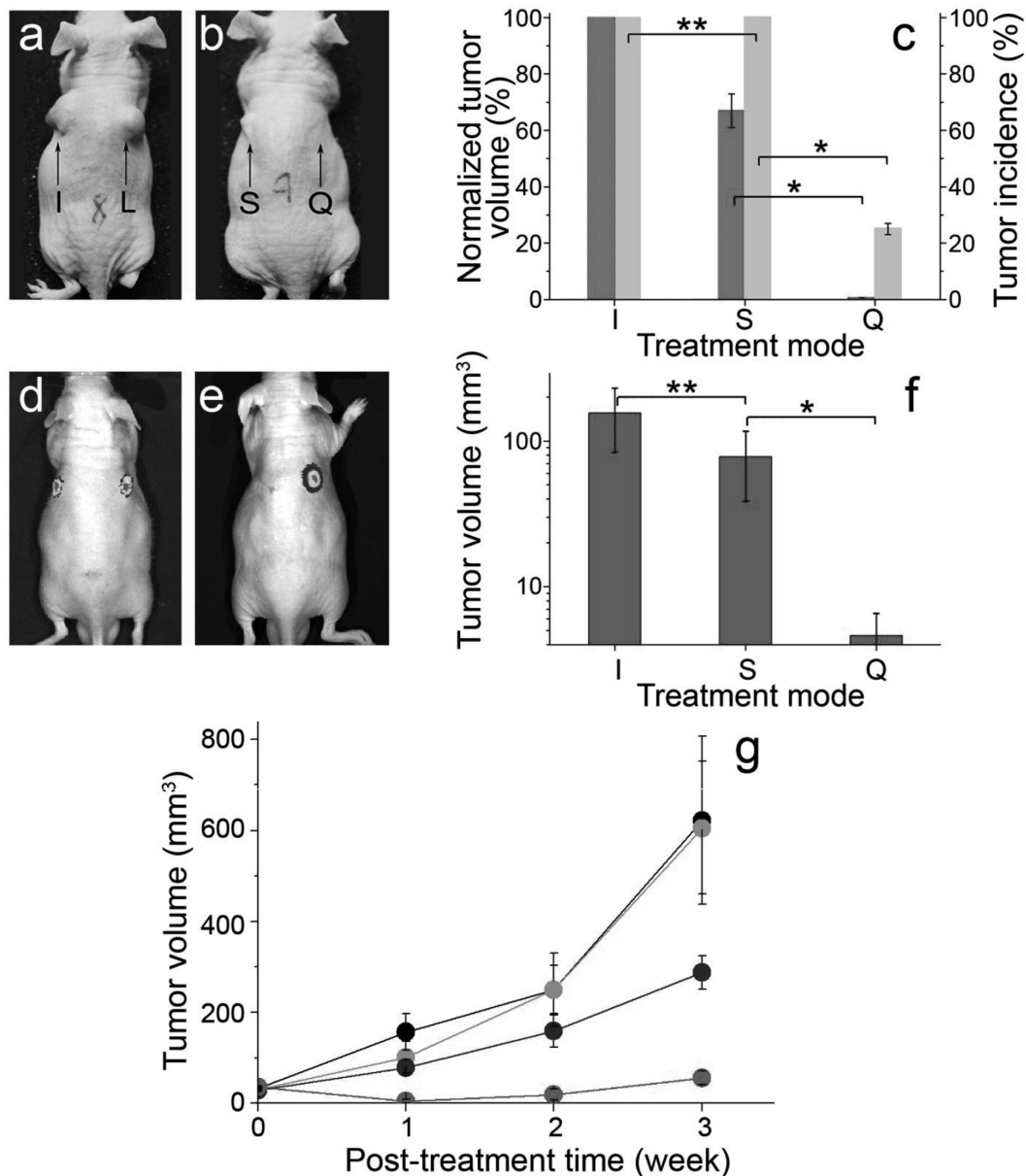


Рис. 4. Квадратия агрессивных опухолей *in vivo*. (a–c) Клетки HN31 были предварительно обработаны *in vitro* и затем инжесктированы в животных: (a,b) изображения животных через 15 дней после введения клеток: интактных клеток (I), обработанных химиорадиотерапией клеток (S), ПНП обработанных клеток (L) и клеток, обработанных квадратией (Q) (Доксил – 2  $\mu\text{g ml}^{-1}$ , золотые наночастицы –  $2.4 \times 10^{10}$  частиц  $\text{ml}^{-1}$ , лазер – 780 нм, 45 мДж/см<sup>2</sup>, рентгеновское излучение – 4 Гр), (c) вероятность развития опухоли (серый) и нормированный объем (пурпурный) опухолей для трех групп животных через 15 дней после введения клеток. Данные: среднее  $\pm$  стандартная ошибка для независимых экспериментов (I: n = 5, S: n = 6, Q: n = 4). (d-g) Квадратия первичных опухолей: биолуминесцентные изображения животных до (d) и через неделю после (e) однократной обработки первичных рпухолей квадратией (опухоль на левом боку (Доксил (1 мг  $\text{kg}^{-1}$ ) и золотые наночастицы (0.8 мг  $\text{kg}^{-1}$ ) были введены внутривенно за 24 часа до генерации ПНП (лазер: 780 нм, 45 мДж/см<sup>2</sup>, локальное облучение) + локальное рентгеновское облучение (4 Гр) через 6 часов после генерации ПНП) и стандартной химиорадиотерапии (опухоль на правом боку, те же дозы Доксила и рентгеновского излучения). (f) Объем опухолей через неделю после обработки. (g) Кинетика роста опухолей после однократной обработки животных *in vivo*: квадратия (красные символы, n = 11); химиорадиотерапия (синие символы, n = 11); ПНП сами по себе (оракжевые символы, n = 4); животные не подвергшиеся обработке (черные символы, n = 6). Данные: среднее  $\pm$  стандартная ошибка

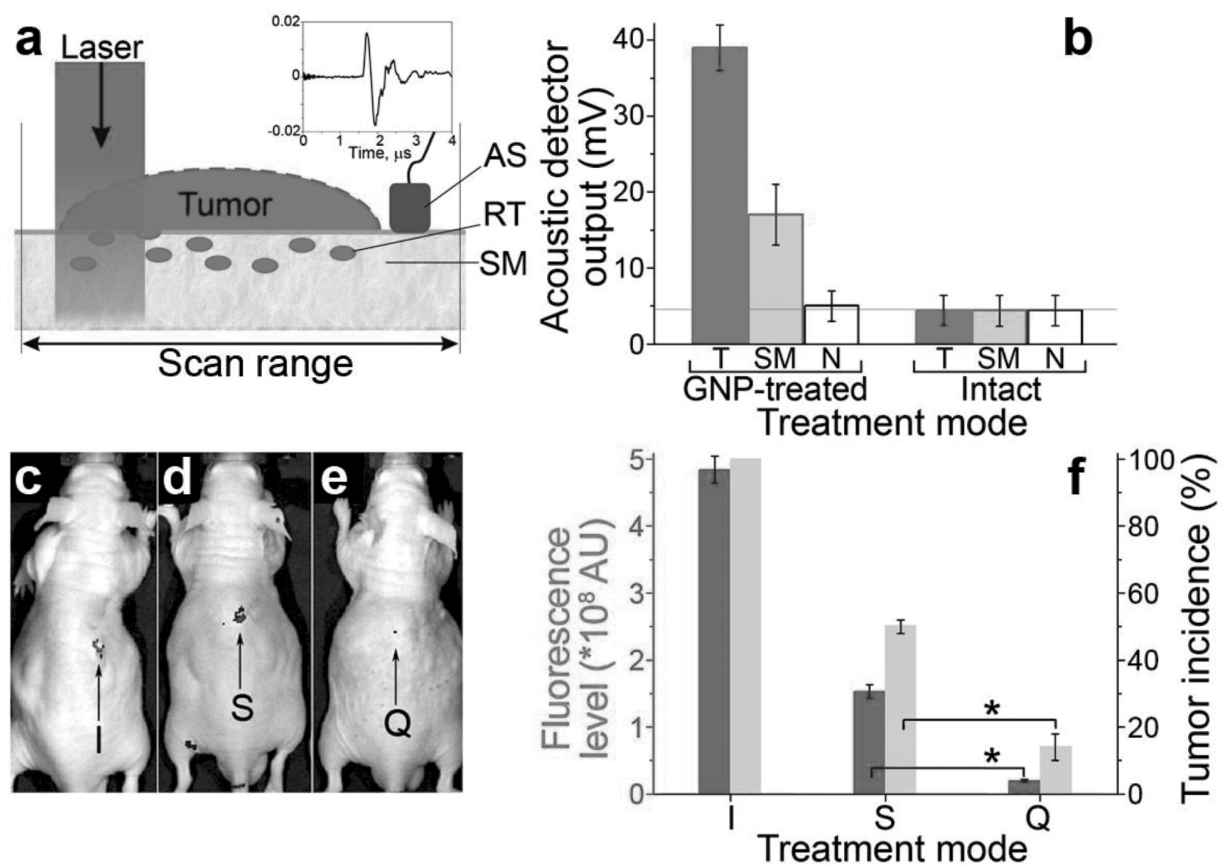


Рис. 5. Квадратия как метод диагностики и лечения микроскопической остаточной болезни (МОБ) непосредственно по время резекции опухоли *in vivo*. (a) Экспериментальная модель диагностики и лечения МОБ по время резекции опухоли: первичная опухоль (tumor), остаточная микро-опухоль (RT), диапазон сканирования послеоперационной зоны широким лазерным пучком (scan range) и акустический датчик (AS) для регистрации ПНП, характерный акустический сигнал ПНП. (b) Диагностика МОБ: амплитуды акустических сигналов ПНП, полученные во время лазерного сканирования животных обработанных (внутривенно) и необработанных золотыми наночастицами: первичная опухоль перед резекцией (T, красный), хирургические срезы немедленно после резекции опухоли (SM, розовый) и прилегающая здоровая ткань (N, белый); горизонтальная линия показывает фотонный акустический сигнал (шум). Данные: среднее  $\pm$  стандартная ошибка ( $n = 3$ ). (c–e) Лечение МОБ: флуоресцентные изображения опухолей (GFP), полученные через 28 дней после (c) только хирургического вмешательства (I), (d) хирургического вмешательства и вспомогательной химиорадиотерапии (S), (e) хирургического вмешательства и квадратии (все терапевтические дозы идентичны указанным на рис. 4). (f) Метрики повторного роста опухолей (рецидив) через 28 дней после лечения МОБ: зеленый – уровень флуоресценции опухоли; серый – вероятность рецидива (I:  $n = 5$ ; S:  $n = 6$ , Q:  $n = 7$ ). Данные: среднее  $\pm$  стандартная ошибка. \* $P < 0.05$ , \*\* $P > 0.05$

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предложенная нами квадратия, как метод внутриклеточного, обладающего высокой специфичностью к раковым клеткам, усиления стандартной макро-терапии, была успешно апробирована *in vivo* (рис. 3) и *in vivo* (рис. 4, 5). Высокая терапевтическая эффективность, специфичность и безопасность квадратии основана на формировании и мгновенной, пороговой активации внутриклеточных нанокластеров в раковых клетках ис-

ключительно под воздействие лазерного и рентгеновского излучения. Размер внутриклеточных кластеров наночастиц в раковых клетках увеличивается с увеличением их агрессивности, таким образом, влияя на пороговую плотность энергии, необходимую для активации кластеров в клетках, и результирующую терапевтическую эффективность, вызванную следующими нестационарными терапевтическими явлениями:

1) Внутриклеточное механическое, нетепловое, лазерно-индуцированное развитие и схлопы-

вание ПНП вокруг золотых наночастиц. ПНП – это нестационарное короткоживущее явление (не частица) (рис. 2, g), которое вызывает локальное, механическое разрушение наноносителей лекарств и внутриклеточных эндосом, в которых они локализованы, и, таким образом, локально и мгновенно впрыскивает лекарство в цитоплазму клетки, обеспечивая тем самым его высокую внутриклеточную концентрацию (рис. 2, g). Стандартные оптические катетеры и эндоскопы [20,21] могут успешно использоваться для доставки безопасного лазерного излучения в ближнем инфракрасном диапазоне спектра, обладающего наибольшей глубиной проникновения в ткани [19]. Большие кластеры наночастиц, которые формируются в наиболее агрессивных раковых клетках (рис. 3, j), требуют минимальную плотность энергии лазерного излучения для активации больших, инвазивных ПНП [7, 18, 22]. Одиночные наночастицы или маленькие кластеры наночастиц, возникающие в результате неспецифического взаимодействия наночастиц с нормальными клетками, требуют гораздо больших плотностей энергии лазерного излучения для активации ПНП, таким образом, при одинаковых условиях облучения нормальных и раковых клеток, генерация ПНП происходит только в последних [8, 9, 22] (рис. 2, f, g). Вместе с этим медленная диффузия лекарства, из неспецифически интернализованных нормальными клетками одиночных наноносителей лекарств, не вызывает сильных токсических эффектов вследствие сниженной, до 2–3 % от стандартной, дозы лекарства, используемой в предложенной нами методе (рис. 3, e).

2) Максимальное внутриклеточное усиление радиотерапии вокруг больших кластеров золотых наночастиц за счет локального испускания ими вторичных электронов [13]. Известно, что золотые наночастицы усилят эффект радиотерапии [13, 23] однако при этом используются очень высокие дозы наночастиц. При низких дозах обработки клеток и тканей наночастицами, как в случае квадрупии, наблюдается незначительное усиление радиотерапии (рис. 3, d, режим GNP+XR). Золотые наночастицы могут одновременно использоваться для доставки лекарств и усиления радиотерапии [24], однако в случае отсутствия локализованного высвобождения лекарства и усиления рентгеновского излучения усиление терапевтического эффекта не происходит.

Синергизм вышеописанных явлений (механическое воздействие ПНП, впрыск лекарства и усиление рентгеновского излучения) радикально

усиливает их терапевтический эффект вследствие их внутриклеточной коллокализации. Такое усиление можно объяснить хорошо известными макро-эффектами: взаимное усиление химио- и радиотерапий [16, 25–27] и механическое усиление восприимчивости опухоли к химио- и радиотерапии [28–33].

Таким образом, внутриклеточный смешанный кластер золотых наночастиц и носителей лекарств выступает в роли своеобразного троянского коня, который активируется только в раковых клетках при воздействии короткого лазерного импульса с определенной плотностью энергии и рентгеновского излучения, существенно увеличивая эффективность терапевтического воздействия существующих макро-терапий [34–36]. Следует отметить, что используемые нами наночастицы или лазерное излучение являются абсолютно безопасными, что было продемонстрировано *in vitro* (рис. 3) и *in vivo* (рис. 4, g).

Терапевтический потенциал квадрупии дополняется ее диагностическим потенциалом: возникающий, при генерации ПНП, импульс давления позволяет быстро, в реальном времени и с высокой чувствительностью детектировать эффект ПНП (рис. 5, b). Применяемые сегодня методы детектирования ОМБ требуют взятия биопсии для длительного и, зачастую, неточного ее анализа [1, 37]. В то время как ПНП-метод технически близок к стандартному фотоакустическому методу [38], последний обладает гораздо более низкой чувствительностью.

Таким образом, предложенная нами квадрупия трансформирует стандартные хорошо апробированные макро-терапии в мгновенную и эффективную внутриклеточную терапию. Селективное формирование в раковых клетках кластеров наночастиц и генерация плазмонных нанопузырей ускоряют и усиливают терапевтическую эффективность и селективность химио- и радиотерапии агрессивных и устойчивых к стандартному лечению опухолей более чем в 17 раз после однократного применения квадрупии *in vivo*. Совмещение диагностики и терапии в одной процедуре (тераностика) позволяет быстро, эффективно и с высокой чувствительностью детектировать и обрабатывать в реальном времени остаточные раковые клетки непосредственно во время проведения резекции опухоли. Существенное уменьшение (относительно стандартных) доз, используемых в квадрупии лекарств и рентгеновского излучения минимизирует неспецифическую токсичность разработанного нами метода.

*Список использованных источников*

1. Meier, J.D., Oliver, D.A. & Varvares M.A. Surgical margin determination in head and neck oncology: current clinical practice. The results of an International American Head and Neck Society Member Survey. *Head Neck*. 27, 952-958 (2005).
2. Langendijk, J.A., et al. Impact of late treatment-related toxicity on quality of life among patients with head and neck cancer treated with radiotherapy. *J. Clin. Oncol.* 26, 3770-3887 (2008).
3. Libutti, S.K., et al. Phase I and pharmacokinetic studies of CYT-6091, a novel PEGylated colloidal gold-rhTNF nanomedicine. *Clin. Cancer Res.* 16, 6139-6149 (2010).
4. Kean, W.F., Kean, I.R.L. Clinical pharmacology of gold. *Inframmopharmacology*. 16, 112-125 (2008).
5. Sharafinski, M.E., Ferris, R.L., Ferrone, S. & Grandis J.R. Epidermal growth factor receptor targeted therapy of squamous cell carcinoma of the head and neck. *Head Neck*. 32, 1412-1421 (2010).
6. Iakoubov, L., Rokhlin, O. & Torchilin, V. Anti-nuclear autoantibodies of the aged reactive against the surface of tumor but not normal cells. *Immunol. Lett.* 47, 147-149 (1995).
7. Lukianova-Hleb, E., et al. Plasmonic nanobubbles as transient vapor nanobubbles generated around plasmonic nanoparticles. *ACS Nano*. 4, 2109-2123 (2010).
8. Lukianova-Hleb, E.Y., et al. Improved cellular specificity of plasmonic nanobubbles versus nanoparticles in heterogeneous cell systems. *PLoS One*. 7, e34537 (2012).
9. Lukianova-Hleb, E.Y., Ren, X., Zasadzinski, J.A., Wu, X. & Lapotko, D. Plasmonic nanobubbles enhance efficacy and selectivity of chemotherapy against drug-resistant cancer cells. *Adv. Mater.* 24, 3831-3837 (2012).
10. Doxil: Product Information Book. Centocor Ortho Biotech Products, L.P. USA 3/2011, (2011).
11. Torchilin, V.P., Lukyanov, A.N., Gao, Z. & Papahadjopoulos-Sternberg, B. Immunomicelles: targeted pharmaceutical carriers for poorly soluble drugs. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 100, 6039-6044 (2003).
12. Wagner, D.S., et al. The in vivo performance of plasmonic nanobubbles as cell theranostic agents in zebrafish hosting prostate cancer xenografts. *Biomaterials*. 31, 7567-7574 (2010).
13. Hainfeld, J.F., et al. Gold nanoparticles enhance the radiation therapy of a murine squamous cell carcinoma. *Phys. Med. Biol.* 55, 3045-3059 (2010).
14. Hainfeld, J.F., Slatkin, D.N. & Smilowitz, H.M. The use of gold nanoparticles to enhance radiotherapy in mice. *Phys. Med. Biol.* 49, N309-315 (2004).
15. Calais, G., et al. Stage III and IV cancers of the oropharynx: results of a randomized study of Gortec comparing radiotherapy alone with concomitant chemotherapy. *Bull. Cancer*. 87, 48-53 (2000).
16. Sano, D., et al. Vandetanib restores head and neck squamous cell carcinoma cells' sensitivity to cisplatin and radiation in vivo and in vitro. *Clin. Cancer Res.* 17, 1815-1827 (2011).
17. Sano, D., et al. Disruptive TP53 mutation is associated with aggressive disease characteristics in an orthotopic murine model of oral tongue cancer. *Clin. Cancer Res.* 17, 6658-6670.
18. Lukianova-Hleb, E.Y., Volkov, A.N., Wu, X. & Lapotko, D.O. Transient enhancement and spectral narrowing of the photothermal effect of plasmonic nanoparticles under pulsed excitation. *Adv. Mater.* 25, 772-776 (2013).
19. Welch, A.J. & van Gemert, M.J.C. (Eds.) *Optical-thermal response of laser-irradiated tissue*. 2nd Ed., Springer (2011).
20. Ambrosch, P. The role of laser microsurgery in the treatment of laryngeal cancer. *Curr. Opin. Otolaryngol. Head Neck Surg.* 15, 82-88 (2007).
21. Karni, R.J., Rich, J.T., Sinha, P. & Haughey, B.H. Transoral laser microsurgery: a new approach for unknown primaries of the head and neck. *Laryngoscope*. 121, 1194-1201 (2011).
22. Hleb, E. & Lapotko, D. Influence of transient environmental photothermal effects on optical scattering by gold nanoparticles. *Nano Lett.* 9, 2160-2166 (2009).
23. Rahman, W.N., et al. Enhancement of radiation effects by gold nanoparticles for superficial radiation therapy. *Nanomedicine*. 5, 136-142 (2009).
24. Jiao, P., et al. Leading neuroblastoma cells to die by multiple premeditated attacks from a multifunctionalized nanoconstruct. *J. Am. Chem. Soc.* 133, 13918-13921 (2011).
25. Argiris, A., Karamouzis, M.V., Raben, D. & Ferris, R.L. Head and neck cancer. *The LANCET*. 371, 1695-1709 (2008).
26. Jegannathen, A., et al. Synchronous chemoradiotherapy in patients with locally advanced squamous cell carcinoma of the head and neck using capecitabine: a single-centre, open-label, single-group phase II study. *Clin. Oncol. (R. Coll. Radiol.)* 23, 149-158 (2011).

27. Chen, Y., et al. Phase I/II clinical study of pulsed paclitaxel radiosensitization for thoracic malignancy a therapeutic approach on the basis of preclinical research of human cancer cell lines. *Clin. Cancer Res.* 9, 969-975 (2003).
28. Paliwal, S. & Mitragotri, S. Ultrasound-induced cavitation: applications in drug and gene delivery. *Exper. Opin. Drug. Deliv.* 3, 713-726 (2006).
29. Czarnota, G.J., et al. Tumor radiation response enhancement by acoustical stimulation of the vasculature. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A.* 109, E2033-E2041 (2012).
30. Rapoport, N., et al. Ultrasound-mediated tumor imaging and nanotherapy using drug loaded, block copolymer stabilized perfluorocarbon nanoemulsions. *J. Control. Release.* 153, 4-15 (2011).
31. Gao, Z., Kennedy, A.M., Christensen, D.A. & Rapoport, N.Y. Drug-loaded nano/microbubbles for combining ultrasonography and targeted chemotherapy. *Ultrasonics.* 48, 260-270 (2008).
32. Rapoport, N.Y. Physical stimuli-responsive polymeric micelles for anti-cancer drug delivery. *Progress in Polymer Science* 32, 962-990 (2007).
33. Rapoport, N., Gao, Z., Kamaev, P. & Christensen, D.A. (2006) Ultrasound-enhanced localized chemotherapy of drug-sensitive and multidrug resistant tumors. *Am. Inst. Physics.* 829, 481-483 (2006).
34. Allen, T.M. & Cullis, P.R. Drug delivery systems: entering the mainstream. *Science.* 303, 1818-1822 (2004).
35. Schroeder, A. et al. Treating metastatic cancer with nanotechnology. *Nat. Rev. Cancer.* 12, 39-50 (2011).
36. Peer, D. et al. Nanocarriers as an emerging platform for cancer therapy. *Nat. Nanotech.* 2, 751-760 (2007).
37. de Carvalho, A.C., et al. Clinical significance of molecular alterations in histologically negative surgical margins of head and neck cancer patients. *Oral Oncol.* 48, 240-248 (2012).
38. Zhang, H.F., Maslov, K., Stoica, G. & Wang, L.V. Functional photoacoustic microscopy for high-resolution and noninvasive in vivo imaging. *Nat. Biotechnol.* 24, 848-851 (2006).

## ПРЕРВАНЫЙ ПОЛЕТ Т-4

(Газета «Республика» № 106 (6011) Четверг, 12 июня 2014 г.)

*На всем протяжении послевоенной истории СССР непрерывно пытался найти дешевое «противоядие» для борьбы с королями океанов — американскими атомными авианосцами. К концу 1950-х стало понятно, что страна не может адекватно противостоять США ни по стратегической авиации, ни в области Военно-морского флота. На вооружение США начали поступать первые атомные подводные ракетноносцы, способные поражать цели на дальности до 2200 км. Эффективно бороться с ними СССР был не в состоянии — места патрулирования подлодок сверху прикрывали американские авианосцы. Прорвать оборону авианосного соединения советский ВМФ не мог ни с воздуха, ни с воды, ни из-под воды. Наиболее реальным способом борьбы с ним советскому командованию виделось создание авиационного ударного комплекса. Он должен был состоять из сверхзвукового самолета, который мог бы обнаружить в заданном районе авианосное соединение, и гиперзвуковой ракеты, способной на скорости, в 4—5 раз превышающей скорость звука, пробить мощную систему ПВО авианосца и поразить его ядерным зарядом. Ни один из разрабатывавшихся в конце 1950-х годов в СССР сверхзвуковых стратегических ударных самолетов под эти параметры не подходил.*

### Охотник на авианосцев

Новый самолет должен был иметь взлетную массу около 100 т, крейсерскую скорость полета 3000 км/ч и потолок в 24 км. На такой высоте радиус обзора составляет 600 км. Это позволяет видеть противника, не входя в зону поражения его ПВО. Он также должен был иметь дальность полета 6000—8000 км и нести не менее двух крылатых ракет с радиусом действия 400—600 км. Ракета сама по себе должна была стать уникальным изделием — развивать скорость, в семь раз превосходящую скорость звука, автономно выходить на цель и атаковать ее.

Госкомитет по авиационной технике предложил участвовать в конкурсе на создание такого самолета конструкторским бюро Туполева, Сухого и Яковлева. Подразумевалось, что конкурс выиграет «бомбардировочное» КБ Туполева, и «истребительные» КБ были привлечены для видимости конкуренции. В КБ Сухого была выбрана компоновка по схеме «утка» с передним горизонтальным оперением и изолированными мотогондолами, воздухозаборники которых выступали

за переднюю кромку крыла. По первоначальным расчетам, взлетная масса равнялась 102 т, откуда и пошло неофициальное название проекта «изделие 100» или просто «сотка».

### Крах патриарха

В июле 1961 года состоялся научно-технический совет, на котором подводились итоги конкурса. Первым докладывало ОКБ Туполева. «Проект 135» подвергся полному разгрому: самолет оказался слишком тяжелым (взлетная масса 190 т) и не проходил по скоростным показателям — крейсерская скорость 2500 км/ч вместо требуемых 3000 км/ч. Вторым о своем «проекте Як-35» докладывал Александр Яковлев. Самолет внешне напоминал американский В-58 «Hustler» и мясцевский М-52, имел взлетную массу 84 т, крейсерскую скорость 3300 км/ч. Затем свой проект самолета Т-4 («изделие 100») представил Павел Сухой. Машина, как и Як-35, соответствовала требованиям ВВС. Окончательные выводы решили делать после очередного заседания совета в сентябре 1961 года. Победителем был объявлен проект Сухого.



### Двигатели

Столь уникальный самолет требовал не менее уникальных двигателей, которые могли бы работать в невиданных ранее условиях высоких температур, разреженного воздуха и на нетрадиционном топливе. Изначально на Т-4 предполагалась установка трех разных типов двигателей, но в итоге остановились на одном — РДЗБ-41, разработку которого вело рыбинское ОКБ-36 (ныне НПО «Сатурн»). На создание РДЗБ-41 ушло в общей сложности около десяти лет, и на его базе были созданы другие не менее уникальные двигатели.

### Ракеты

Не менее важным, чем сам самолет, было его основное вооружение — гиперзвуковая ракета Х-33, разработка которой также начиналась в КБ Сухого, но была позже передана в Дубнинский филиал ОКБ-155 (ныне МКБ «Радуга»). Ракета должна была автономно идти к цели по аэробаллистической траектории на высоте более 30 км при скорости, в 6,5—7 раз превышающей скорость звука. После выхода в район цели она сама вычисляла авианосец и атаковала его. Это была беспрецедентная на то время задача, для ее выполнения на борту Х-33 устанавливались собственная радиолокационная станция и инерциальная навигационная система, в состав которой впервые входили цифровые вычислительные машины. По сложности система управления ракетой не уступала самолетной.

### «Вверх тормашками»

Много нового было и в кабине Т-4. Впервые в стране для нее был разработан индикатор навигационно-тактической обстановки, где на телевизионном экране данные бортовых радаров накладывались на электронное изображение микрофильмированных карт, охватывающих поверхность почти всего земного шара.

При проектировании самолета конструкторы постоянно сталкивались с самыми разнообразными, ранее никогда не встречавшимися проблемами. Например, у компоновки самолета, выигравшего конкурс, шасси не вписывалось в предназначенный для него отсек. Для выхода из ситуации предлагались довольно экзотические решения: воздухозаборники выносились на «спину», а после выхода на заданный курс самолет должен был переворачиваться кабиной вниз и так совершать полет. При посадке бомбардировщик должен был снова переворачиваться в исходное состояние.



Не менее фантастическим было и другое решение, нашедшее воплощение в самолете. При диаметре фюзеляжа всего 2 м на скорости около 3000 км/ч выступающий фонарь пилотской кабины создавал огромное сопротивление, и конструкторы решили применить отклоняемую носовую часть. При полете на высоте 22—24 км видимости как таковой нет, вокруг черное небо, поэтому носовая часть поднята и полет происходит исключительно по приборам. При посадке же она отклоняется вниз, и летчик получает превосходный обзор через открывшееся лобовое стекло. Подобное решение впоследствии нашло применение на гражданских Ту-144 и «Concorde».

### Небывалый заказ

Весной 1972 года первый летный экземпляр Т-4 («изделие 101») был готов к испытаниям, но из-за летних пожаров лесов и торфяников вокруг Москвы стелился густой дым, и видимость над взлетной полосой была почти нулевая. Поэтому первый полет состоялся только 22 августа 1972 года. Пилотировали самолет Герой Советского Союза Владимир Ильюшин и штурман Николай Алферов. На первом этапе было выполнено всего девять полетов, причем первые пять проводились с неубранным шасси. Самолет управлялся хорошо, не требовал от летчика повышенного внимания, переход звукового барьера проходил спокойно, а сам момент его преодоления отмечался только по приборам. Военные, внимательно следившие за испытаниями, пришли от него в восторг и заказали в наступающей пятилетке (1975—1980 годы) первую партию из 250 машин! Для самолета такого класса это рекордное количество.

### Конец «сотки»

Тушинский машиностроительный завод, строивший для ОКБ Сухого опытную партию из семи самолетов, не мог производить их серийно, особенно в заказанных количествах.

Единственный завод, который мог освоить такой заказ, — Казанский авиационный. Именно здесь развернулась подготовка оснастки под производство новейшего бомбардировщика. Это означало, что ОКБ Туполева теряло свою основную производственную базу. Этого не могли допустить ни сам Туполев, ни его покровитель, министр авиационной промышленности Петр Дементьев. Под предлогом выпуска модифицированной версии Ту-22 (а по сути, совсем нового самолета Ту-22М) Сухого «выдавили» с Казанского авиационного завода. Тем временем начался второй этап испытаний. 22 января 1974 года состоялся десятый полет «сотки», на котором Т-4 достиг высоты 12 км и скорости  $M=1,36$ . На этом этапе предполагалось довести скорость до 3000 км/ч ( $M=2,8$ ) и начать испытание машины «102» со штатным комплектом радиооборудования.

Строить первые 50 самолетов Сухому предложили на Тушинском машиностроительном заво-

де, предполагая полностью его перестроить, что было маловероятным из-за отсутствия средств. Но Дементьев лишил Сухого и этого небольшого шанса. На очередной встрече с министром обороны он убедил его закрыть программу Т-4, развернув на ТМЗ производство крыльев для новейшего советского истребителя МиГ-23. Гречко дал согласие, и в марте 1974 года все работы по испытаниям Т-4 без объяснений прекратились.

До самой своей смерти 15 сентября 1975 года Павел Сухой не получил исчерпывающего ответа о причинах заморозки проекта Т-4. Только 28 января 1976 года вышел приказ Министерства авиационной промышленности под № 38, которым закрывались работы по программе «изделия 100». Этим же приказом Петр Дементьев обозначал и причину: «В целях сосредоточения сил и средств на создание самолета Ту-160». Самолет «101» был отправлен на вечную стоянку в Монинский музей.

## ПРЫЖОК К СВЕРХЗВУКОВОМУ БАРЬЕРУ

(окончание)

Клеванец Ю.В.

Важные промежуточные результаты по программе Ту-144 были достигнуты в 1975 г. Впервые это успешный показ в Париже самолета 02-2. Между прочим, этот самолет (бортовой № 77144) наработал самый большой налет из всех выпущенных — 432 ч. Более-менее успешно шла отработка новой силовой установки на самолете 03-1. 4 марта того же года состоялся первый полет машины 04-1 (двигатели НК-144А). На ней была перекомпонована топливная система. На 04-1 26 декабря совершен первый пробный коммерческий рейс в Алма-Ату. Перевозились почта и грузы. 12 декабря того же года отправился в небо самолет 04-2. На нем вновь отработывалась электронная система управления.

Во-вторых, началась подготовка к сертификационным и государственным испытаниям, для этого был подготовлена машина 05-1 (первый полет 20.08.75, моторы НК-144А). В это же самое время началось обучение трех летных экипажей НИИ Гражданской авиации, а затем четырех летных экипажей авиакомпания «Аэрофлот».

На Рыбинском изготовили первый двигатель с реверсными шторками.

Здесь надо сделать пояснение. Сертификационные требования к самолетам были впервые разработаны в США. В Соединенных Штатах, где, скажем так, культивируется частная инициатива, сертификация вполне логична. Если какой-нибудь Пит или Пол решили делать и продавать самолеты, то они должны сертифицировать производство и сам летательный аппарат — и добро пожаловать в авиационный бизнес.

Второй страной в мире, разработавшей свою систему сертификации, стала Англия. Считается, что английские требования приспособлены под эксплуатацию в европейских условиях и более мягкие, чем в США.

В СССР же долгое время в сертификационных испытаниях не нуждались. Здесь никогда не было «просто Пита» и «просто Пола». Все научные, конструкторские, испытательные, про-

изводственные, эксплуатационные и ремонтные организации были подразделениями государства. Впрочем, простых парней в авиацию не пускали и в Америке, государство и там держит под контролем не прямым, так косвенным — все важные части экономики.

Так или иначе, но потребность в разработке собственной сертификационной системы была осознана в Советском Союзе только тогда, когда были сделаны первые попытки продаж гражданских самолетов за рубеж. Иностранцы-заказчики говорили: либо сертифицируйте свои самолеты, либо покажите, как они производятся. Понятно, что второе исключалось, волей-неволей пришлось браться за выполнение первого требования.

Получилось так, что Ту-144 с моторами НК-144А стал первым самолетом, сертифицированным по советской системе. В процессе его сертификационных и госиспытаний проверялся не только сам лайнер, но и уточнялись требования к нему.

Но вернемся к истории создания Ту-144. Надо признать, что испытания вообще он проходил с трудом. Если вопросы экономичности были в значительной мере «двигательными» и решались, как правило, специализированными КБ, то вторая важная проблема — противодействие циклическим нагрузкам и резонансным колебаниям в хвостовом отсеке — была «на совести» основного разработчика и никак не хотела отступать. Текли баки и топливопроводы, не закрывались или наоборот «залипали» клапаны гидросистем, не срабатывали концевые выключатели...

Хвостовой отсек перекомпоновывался (например, на машине 04-1), менялись материалы для изготовления деталей, разрабатывались новые методики герметизации, но все это давало временные результаты. С увеличением сроков эксплуатации проблемы появлялись вновь.

А пока шли испытания, в Воронеже доставлялись предсерийные самолеты с двигателями НК-144А. Правда, по результатам испытаний

двух вариантов Ту-144 было признано, что рыбинские двигатели более перспективные, и серийные лайнеры нужно строить именно с РД-36-51. Главное замечание совместных испытаний: самолет не дотягивает до заявленной дальности, но можно разрешить его эксплуатацию с коммерческой нагрузкой в 15 т на дальность 3080 км, а с коммерческой нагрузкой в 7 т — на 3600 км при взлетной массе 195 т.

Во время прохождения совместных испытаний (государственных и сертификационных) с февраля 1977 г. начались коммерческие перевозки на линии Москва – Хабаровск (пока только грузы и почта).

1 ноября 1977 г. Ту-144 с куйбышевскими двигателями получил, наконец, сертификат летной годности. В этот же день состоялся первый коммерческий рейс с пассажирами. В аэропорту Домодедово самолет провожал сам министр Гражданской авиации Борис Павлович Бугаев. Командир экипажа в первом полете — Борис Федорович Кузнецов — летчик Домодедовского авиаотряда. А теперь опять вернемся к воспоминаниям А.А. Ларина, командира еще одного «гражданского» экипажа. Он говорит, что особого наплыва пассажиров на сверхзвуковые рейсы не было. Во-первых, были дороги билеты (82 рубля), а во-вторых, все-таки страшно, несмотря на то, что обслуживание пассажиров было по высшему разряду. Перед полетом на выход из здания аэровокзала даже раскручивали красную ковровую дорожку. «Выходят пассажиры из “Икаруса” и видно, как они борются с собой: идти или не идти» в самолет. Однако как перед полетом, так и в воздухе стюардессы разносили бутерброды с икрой и настоящий коньяк. После этого скованность исчезала. Люди начинали позировать и фотографироваться, явно считая себя космонавтами. Заметим: полет проходил на высоте 16–17 км, небо при этом почти черное.

Отдельно пилот отмечает отличную работу электронной системы управления: «Мы в Алма-Ату ходили, ошибка в 500 м всего». То есть бортовой компьютер и автопилот выводили самолет от точки взлета до точки посадки с точностью до 500 м при расстоянии в 3260 км.

Статистика коммерческих рейсов такова: летали в Алма-Ату с пассажирами два самолета, №№ 05-2 и 06-1. В каждом было 11 мест первого класса и 122 туристского. Рейсы туда и обратно проводились один или два раза в неделю. На самолете, как правило, летело не более 80 человек. Всего было проведено 50 (по другим сведениям

55) пассажирских рейсов и перевезено 3194 (3284) человека.

Но и в коммерческих полетах не обошлось без неприятных технических «накладок». Это несмотря на то, что и в Домодедово, и в Алма-Ате машины обслуживались инженерными бригадами ОКБ Туполева. Одним из летчиков был обязательно летчик-испытатель. Рейсами руководили совместно один из замов министра Гражданской авиации и один из замов министра Авиационной промышленности. Командир корабля и руководители полета по завершении рейса докладывали о его выполнении в Москву Бугаеву, а тот, в свою очередь, звонил Брежневу.

Следующие самолеты, начиная с 06-02, были официально признаны серийными. Они оснащались двигателями Рыбинского завода. Двигателисты к тому времени сумели довести гарантированный ресурс своих моторов до 200 ч, что больше пороговых значений для бомбардировщика, но меньше, как минимум, в два раза необходимого для гражданского самолета. Сам лайнер 06-2 совершил первый полет в апреле 1978 г.

Однако в испытательном полете 23 мая эта машина (борт №77111) потерпела катастрофу, ставшую фатальной для всей программы Ту-144. Согласно заданию, в воздухе в определенное время испытатели должны были включить и выключить вспомогательную силовую установку (ВСУ). Однако в полете от вибраций треснул топливопровод ВСУ, и керосин стал постепенно выливаться в отсек. Контрольные приборы показывали увеличение расхода топлива, но экипаж не обратил на это внимания.

После включения ВСУ в хвостовом отсеке начался пожар. Летчикам (командиру корабля Э.В. Еляну и испытателю из НИИ ГА В.Д. Попову) удалось посадить огромный скоростной самолет «на брюхо». Однако при аварийной посадке погибли два инженера-испытателя, которые находились в пассажирской кабине. Они были задавлены креслами, сорванными со своих мест при ударе о землю.

После этой катастрофы последовали приказы: сперва о приостановке (с 31.05.78), а затем и о выводе Ту-144 из коммерческой эксплуатации. В Воронеже к этому моменту были готовы 4 самолета с двигателями РД-36-51 (их стали называть Ту-144Д). Достраивался пятый. Два лайнера из этой пятерки (07-1 и 08-1) вновь прошли к 1981 г. совместные государственные и сертификационные испытания. Испытания показали, что самолеты первой серии находятся в шаге от достиже-

ния заявленных параметров. При взлетной массе чуть более 200 т дальность с грузом 15 т составила 5330 км, с грузом в 13 т — 5500 км, а с грузом 7 т — 6200 км. Как недостаток был отмечен малый ресурс двигателя. Тем не менее, Ту-144Д получил сертификат летной годности и был рекомендован для эксплуатации. Однако на этих машинах больше не перевезли ни одного пассажира, так как они были переведены в статус летающих лабораторий и получили индекс Ту-144ЛЛ. На них готовили экипажи «Буранов», еще одного несчастливого гиганта эпохи перестройки, а также проводились полеты для исследования озонового слоя и для испытаний разного рода аппаратуры.

В 1983 г. по инициативе работников Летно-Испытательного Института и ОКБ им. Туполева было принято решение о проведении специальных рекордных полетов. В ходе этих полетов в 1983 и в 1985 гг. было установлено 18 (по другим сведениям 13) рекордов скорости, скороподъемности, дальности полета с разными грузами. Эти рекорды не побиты до сих пор.

После этих выдающихся полетов самолеты как бы забыли на несколько лет. В это время уже разворачивалась перестройка, всем хотелось колбасы и свободы. Из десяти предсерийных самолетов пять были поставлены на прикол в качестве экспонатов авиационных музеев. 04-1 (борт 77106) оказался в Монино, 05-1(77107) — в Казани, 04-2 (77108) — в Куйбышеве, 06-1 (77110) — в Ульяновске, 05-2 (77109) — в Воронеже. Самолет 03-2 стоял в Жуковском в полуразрушенном состоянии, а четыре последних Ту-144Д все-таки иногда летали в качестве летающих лабораторий.

В 1993 г. на последние сверхзвуковые русские лайнеры обратили внимание американцы. В это время в США был создан консорциум для реализации проекта собственного сверхзвукового пассажирского самолета. К американским фирмам присоединились организации из других стран. Специалистов консорциума очень интересовал советский опыт. Соответственно, ОКБ им. Туполева, работники которого после перестройки оказались в полуподвешенном состоянии, реанимировало два Ту-144Д: один для полетов (09-1), а второй на всякий случай, в качестве донора запасных частей, к примеру.

Первый самолет летал как в России, так и в США. В Америке одним из пилотов был Чарльз Фуллертон, астронавт.

На этом история первого в мире сверхзвукового пассажирского самолета закончилась.

## 6. Механизм выпуска передних крылышек самолета Ту-144

За время создания Ту-114 было зарегистрировано 750 изобретений. Одним из них стали знаменитые в авиационном мире передние выдвигаемые крылышки.

Итак, передние выдвигаемые крылышки расположены в верхней части фюзеляжа. Они выпускаются при взлете и посадке, создавая тангажный момент, необходимый для поддержания носа самолета. Крылышки раздвижные, четырехщелевые, с двумя предкрылками и двумя закрылками. Закрылки и предкрылки по виду действия являются щелевыми с осями качания на кронштейнах вне собственно конструкции крыла, предкрылков и закрылков. Хвостовой закрылок для увеличения надежности системы разделен на три секции с отдельными приводами на каждую. Закрылки имеют лонжеронную конструкцию.

Собственно крыло (центральная часть) имеет кессонную конструкцию из двух фрезерованных панелей и двух стенок-лонжеронов. Контуры носовой части крыла и хвостовой части крыла изготовлены из листового дюралюминия. На лонжероны центральной части крыла навешиваются узлы крепления приводов механизации (в том числе механизмы №№ 1, 2, 3, 4, схемы которых приведены в данной работе (рис. 3, 4). Специальный механизм обеспечивает выпуск и уборку крылышек, синхронное поэтапное перемещение правой и левой консоли (рис. 5).

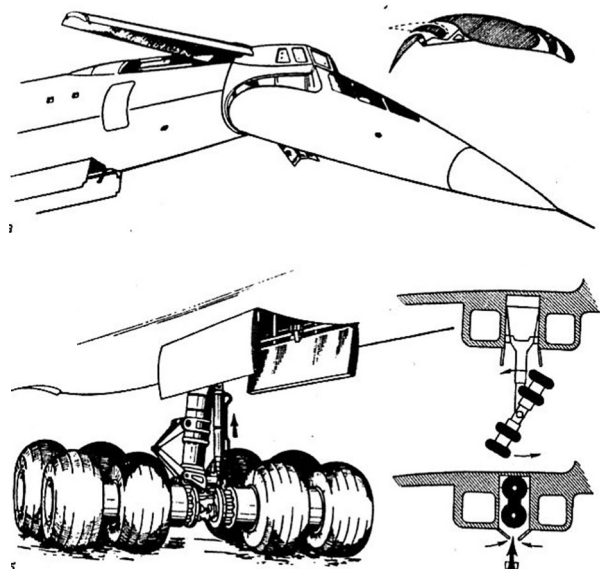


Рис. 1. Схема носа самолета с расположением передних крылышек; схема уборки основной опоры шасси самолета

Силовой привод обеспечивает поворот крылышек относительно шарнирных узлов (поз. 2 рис. 2). Тем же приводом обеспечивается изменение угла атаки крыла и движение закрылков и поворотного элемента предкрылка (рис. 3, 4). Исполнительный механизм № 1 при этом обеспечивает выдвижение и уборку корневой секции хвостового закрылка и переднего закрылка. Исполнительные механизмы №№ 2,3 предназначены для качания поворотного элемента предкрылка, выдвижения и уборки переднего закрылка и основной секции заднего закрылка. Исполнительный механизм № 4 служит для качания поворотного элемента предкрылка, выдвижения и уборки переднего закрылка и концевой секции хвостового закрылка.

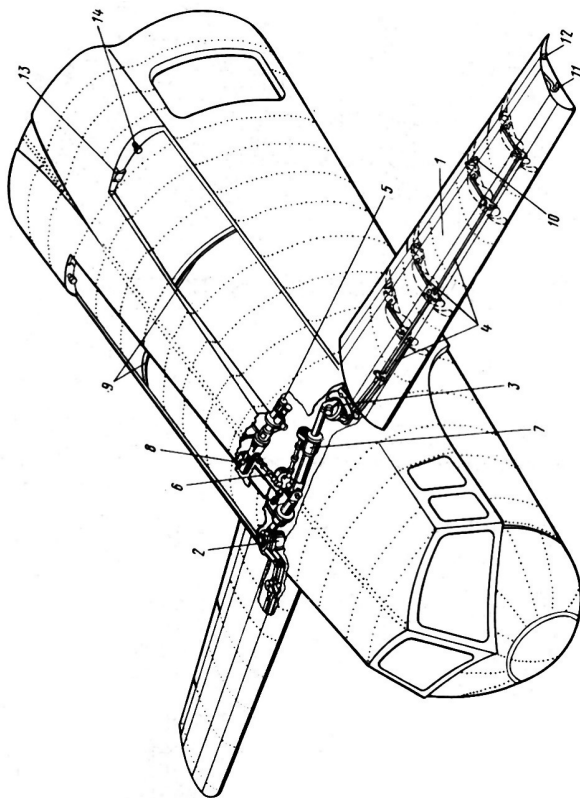


Рис. 2. Схема выдвижных крылышек Ту-144:  
 1 — консоль передних крылышек в выпущенном положении; 2 — шарнирный узел; 3 — копия привода механизации; 4 — тяга привода механизации крылышек; 5 — приводной электромеханизм МУС-ЗПТВ; 6 — трансмиссия привода передних крылышек; 7 — винтовой преобразователь ВП-1; 8 — механизм концевых выключателей; 9 — копии; 10 — опорный ролик; 11 — ловитель; 12 — упорный ролик; 13 — упорный кронштейн; 14 — ролик ловителя

Продолжим описание с другой стороны, то есть с привода системы (рис. 2).

Электромеханизм МУС-ЗПТВ(5) состоит из двух электродвигателей, соединенных дифференциалом на общий вал. Электродвигатели питаются от разных цепей в целях безопасности. Привод может осуществляться и двумя двигателями одновременно, и одним, но с меньшей скоростью. Привод включается тумблером на приборной панели в кабине пилотов.

Вал электромеханизма вращает угловой редуктор (рис. 5. поз. 1) с двумя выходными вал-шестернями. Основная передача угловая с коническими зубчатыми колесами и передаточным числом 1,5 используется для привода крылышек. Дополнительная с цилиндрическими зубчатыми колесами и передаточным числом 1,182 для привода механизма концевых выключателей (8) и механизма датчиков. Электропроводка от механизма датчиков идет в кабину пилотов. Электромеханизм МУС-ЗПТВ, угловой редуктор, механизм концевых выключателей и механизм датчиков собраны в одном корпусе и крепятся на одном кронштейне на силовую балку фюзеляжа.

Выходная вал-шестерня основной передачи углового редуктора передает крутящий момент на трансмиссию (6) и непосредственно соединяется с карданным валом (рис.5, поз.4). С карданного вала момент передается на раздаточный редуктор (рис. 5, поз.5). Раздаточный редуктор состоит из пары цилиндрических и трех конических зубчатых колес с общим передаточным числом 2. Через муфты раздаточный редуктор передает вращение на два карданных вала, связанных с винтовыми преобразователями ВП-7(7).

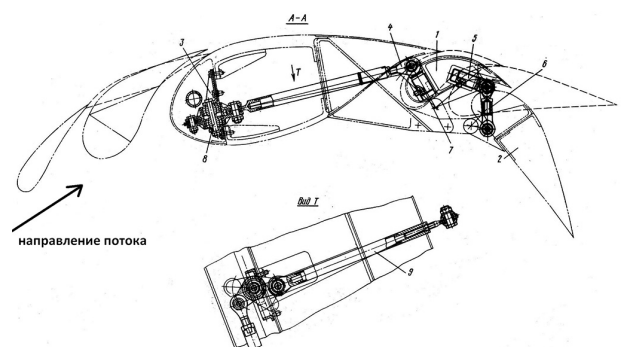


Рис. 3. Схема механизма выдвижения предкрылков и закрылков № 1:

- 1, 2 — закрылки; 3 — кронштейн; 4 — качалка;  
 5, 7 — ушковые регулировочные болты;  
 6 — конечная тяга; 8 — ось; 9 — поперечная тяга

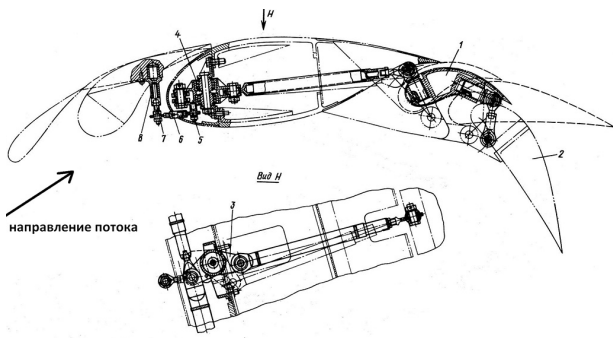


Рис. 4. Схема механизма выдвижения предкрылков и закрылков № 2, 3, 4:  
 1, 2 — закрылки основные; 3 — качалка механизма № 3;  
 4 — радиальный сферический подшипник;  
 5 — штилька качалки; 6 — передняя тяга механизмов;  
 7 — регулируемая штилька; 8 — поводок

Винтовой преобразователь ВП-7 принципиально представляет собой соединение винт – гайка и переводит вращательное движение в возвратно-поступательное (рис. 6). Гаек в нем на самом деле две из соображений безопасности. Соединение винта и гаек осуществляется посредством шариковых винтовых канавок, подобных тем, что используются в станках с ЧПУ. Максимально допустимый осевой люфт винта до 0,4 мм. Гайки вращаются карданным валом через цилиндрическую шестерню. Передаточное число 1,81.

Все редукторы и другие передачи в механизме выпуска передних крылышек понижающие.

Корпуса винтовых преобразователей ВП-7 совместно крепятся в шарнирном подвесе на кронштейн силовой балки фюзеляжа.

Винтовыми механизмами вращаются поворотные узлы крылышек. Крылышки во время выпуска и уборки совершают вращательное движение относительно двух осей. В них при этом происходит выпуск закрылков и предкрылков.

Вращение относительно одной оси — оси шарнирного узла (2) производится непосредственно винтом винтового преобразователя. Вращение относительно линии наибольших хорд меняет угол атаки крыла и осуществляется через одно плечо трехплечего рычага, соединенного с силовым ко-

пиром (3). Это плечо завершается проушиной и шарнирно соединяется с силовым кронштейном центральной части крыла. Во время работы привода через это соединение осуществляется изменение угла атаки крыла.

Второе плечо трехплечего рычага завершается вилкой для навески тяги, управляющей через проводку и поводок (рис. 4 поз. 8) поворотной частью предкрылка. При движении этой тяги поворотная часть предкрылка качается относительно своей оси навески, открывая или закрывая две профилированные щели между неподвижным предкрылком и центральной частью крыла. Эта же тяга приводит в действие через исполнительные механизмы №№ 2, 3, 4 (рис. 4) передний закрылок, а также основную и концевую секции заднего закрылка.

Третье плечо шарнирно соединено с плечом двухплечего рычага. Вторым плечом двухплечего рычага через шарнирно присоединенную тягу управляющей проводки выпускаются и убираются передний закрылок и корневая секция хвостового закрылка через исполнительный механизм № 1 (рис. 3).

Материал тяг и силовых рычагов — сталь 30ХГСА. Материал кронштейнов крепления основной части крыла — сталь 35ХГСА. Стальные детали термообработаны с целью получения максимально высокой прочности в условиях циклических нагрузок. Поскольку тяги стальные и короткие (из стремления уменьшить люфты в системе управляющей проводки), то тяговую проводку еще называют штанговой.

Двуплечие и трехплечие рычаги соединены с силовыми копирами посредством силовых ро-

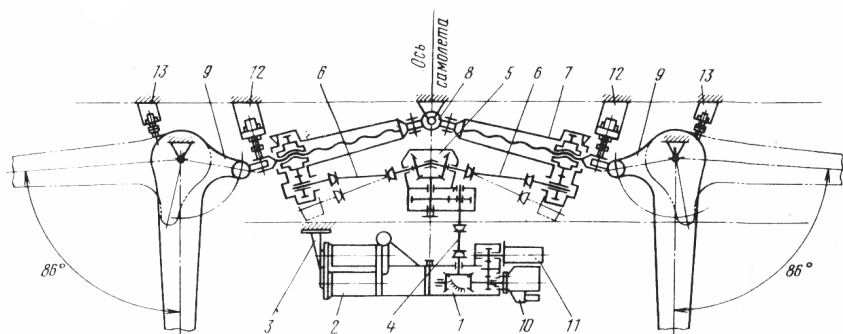


Рис. 5. Кинематическая схема механизма управления передними крыльями:  
 1 — редуктор угловой; 2 — электромеханизм МУС-ЗПТВ; 3 — кронштейн;  
 4, 6 — карданные валы; 5 — редуктор раздаточный; 7 — винтовой преобразователь ВП-7; 8 — ось; 9 — поворотные узлы; 10 — механизм концевых выключателей МКВ-51М; 11 — механизм датчиков МДТ-САБ-4; 12, 13 — концевые выключатели

ликов (по 1 шт. на каждом из рычагов). Внешне силовой ролик представляет собой игольчатый подшипник, надетый на ось, запрессованную в металл рычага. Во время работы привода передних крылышек силовые ролики катаются по специальному ведущему пазу заданного профиля, выфрезерованному в силовом копире. Стенки паза радиусные. Соответственно, поверхность силовых роликов также имеет сферическую форму.

Копир крепится болтами на цилиндрической части фланца шарнирного узла поворота передних крылышек. Заготовка копира получается горячей штамповкой из стали 12ХНЗА. Поверхность паза копира цементирована и закалена до высокой твердости.

Материал силовых роликов — сталь 12ХГЗА. Ролики также цементированы и закалены.

Каждый шарнирный узел навески переднего крыла снабжен парой дополнительных концевых выключателей, которые работают параллельно с концевыми выключателями, установленными вместе с электромеханизмом МУС-ЗПТВ.

Тяговая проводка передних крылышек имеет несколько точек для регулировки. На центральной части крыла перед механизмом № 1 установлен переходной регулировочный узел. Он представляет собой кронштейн, закрепленный на передней стенке кессона центральной части крыла. В вилке кронштейна шарнирно закреплены качалки с рычагами под навеску двух тяг на каждую качалку. Движение качалок регулируется упорными винтами.

В исполнительном механизме № 1 может меняться длина конечной и поперечной тяг (рис. 3 поз. 6, 9).

#### Список использованных источников

1. Кестельман, В. Н. Механизмы управления самолетом / В.Н. Кестельман, А.В. Федоров. – М., 1987.
2. Даффи, П. Андрей Туполев — человек и его самолеты / П. Даффи. – М., 1996.
3. Кербер, Л.Л. Туполев / Л.Л. Кербер. – СПб, 1999.
4. Костенко, Л.К. Летящие крылья / Л.К. Костенко. – М., 1985.
5. Житомирский, Г. И. Конструкция самолетов / Г.И. Житомирский. – М., 1991.
6. Цихош, Э. Сверхзвуковые самолеты / Э. Цихош. – М., 1983.
7. Моделист – конструктор. – 2008. – № 3.

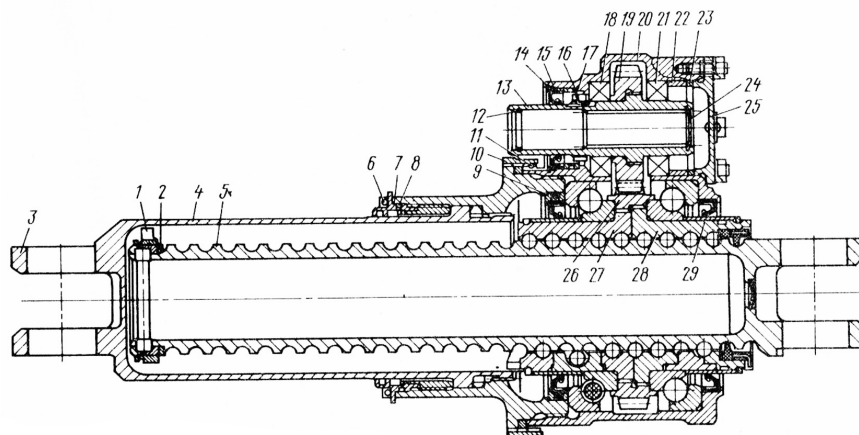


Рис. 6. Винтовой преобразователь:

- 1 — упор задний; 2, 23 — кольца регулировочные; 3 — проушина;  
 4 — кожух; 5 — винт; 6, 11, 12, 14 — стопорные кольца;  
 7, 9, 16, 22, 29 — втулки; 8, 17 — манжеты; 18, 21 — шарикоподшипник;  
 19, 26 — шестерня; 20 — корпус; 24 — заглушка; 25 — крышка корпуса;  
 27, 28 — гайки шариковой пары

В исполнительных механизмах №№ 2, 3, 4 регулируется длина поводка, управляющего движением поворотной части предкрылка (рис.4, поз. 8) при помощи регулирующей шпильки (7).

В исполнительных механизмах №№ 1, 2, 3, 4 тяги, управляющие закрылками, крепятся к закрылкам не через кронштейны, а посредством специальных ушковых регулировочных болтов (рис. 3, поз. 5, 7, рис. 4).

Для фиксации переднего крыла в убранном положении на фюзеляже самолета предусмотрен еще один копир (рис. 2 поз. 9). Он представляет собой С-образный профиль, выгнутый соответственно форме фюзеляжа. При складывании крыла в профиль должен попасть опорный ролик, установленный на кронштейн крепления закрылков исполнительного механизма № 3 (10).

Для фиксации переднего крыла в убранном положении служат ловитель и упорный ролик, прикрепленные к кессону центральной части крыла (рис. 2 поз. 11, 12). Они при уборке крыла должны попасть в ответные элементы конструкции: на ролик ловителя (14) и упорный кронштейн(13).