

ИНЖЕНЕР-МЕХАНИК

№ 2 (71)
апрель – июнь
2016

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

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

Редакционная коллегия: Андреев М.А., Дашков В.Н.,
Дубовик Д.А., Дюжев А.А., Захарик А.М.,
Колпащиков 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 Жодин-
ская, 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 29.06.2016.
Формат 60×84/8. Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс». Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,6. Уч.-изд. л. 4,7.
Тираж 200 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

Материалы конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов»

Анализ современных программных продуктов для моделирования процессов термообработки с применением индукционного нагрева.....2

Перспективные материалы и технологии с эффектом самоупрочнения при эксплуатации.....7

Разработки ученых и специалистов

О наилучших доступных технологиях переработки отходов.....14

Теплофизика процессов в материалах с тепловой памятью и перспективы их применения в новой технике.....19

Об установлении минимальных безопасных расстояний до магистральных газопроводов.....26

Перспективы развития ветроэнергетики.....31

Технологическое оборудование АГНКС – новый формат.....34

Патентуем сами

Компоновочная схема шасси карьерного самосвала БелАЗ 7571039

Из истории авиации

Труженик неба.....42

УДК 536.46

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМООБРАБОТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

А.В. Польшаев, А.И. Михлюк, И.И. Вегера
Физико-технический институт НАН Беларуси
г. Минск, Беларусь

В работе представлен обзор основных программных продуктов, которые могут применяться для моделирования процессов термообработки, в том числе и с применением индукционного нагрева. Проведен анализ их основных характеристик, показаны достоинства и недостатки.

The paper presents an overview of major software products that can be applied in simulation of heat treatment processes including the ones using induction heating. It gives an analysis of their principal characteristics, advantages and disadvantages.

В настоящее время перед промышленностью остро стоит проблема выпуска качественной и конкурентоспособной продукции. Требования качества в полной мере относятся и к процессам термообработки изделий, которые играют очень важную роль в обеспечении технологических и эксплуатационных свойств деталей.

Особенностью технологической подготовки производства деталей, подвергаемых термообработке, является необходимость анализа обоснованности назначения режимов их обработки уже на стадии проектирования. Традиционно этот анализ осуществляется экспериментальными методами, с применением разрушающих методов контроля и металлографии, что связано с большими затратами времени и материальных средств. Одним из эффективных направлений решения указанных проблем является применение методов компьютерного моделирования, которые при минимальном количестве дорогостоящих экспериментальных исследований позволяют получить максимальное количество информации о характеристиках разрабатываемого процесса и свойствах полученных изделий. Мировая тенденция развития данного направления заключается в применении CALS-технологии, то есть сквозной автоматизации всего жизненного цикла изделия.

Методы математического моделирования позволяют рассматривать различные стадии производства и эксплуатации изделий в режиме «реального» времени. Поскольку фактически любой процесс, происходящий в окружающем мире, можно описать при помощи математических моделей с той или иной точностью, то используя современные высокопроизводительные ЭВМ можно осуществлять прогнозирование поведения изделия, как в процессе его изготовления, так и при эксплуатации. Адекватность моделей зависит лишь от точности, с которой проводится исследование. Для обеспечения более высокой точности используется большее количество уравнений и итераций, соответственно требуется большее время для моделирования.

В данной работе представлен обзор современных информационных технологий, которые могут применяться при реализации комплексного подхода к разработке процессов термообработки металлов, в том числе и с применением индукционного нагрева.

Математическое моделирование процессов термообработки невозможно без детального изучения и анализа: кинетики фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах; теплофизических процессов, происходящих при нагреве;

процессов формирования физико-механических и технологических свойств деталей.

Процесс термической обработки сталей можно разделить на следующие этапы: нагрев до определенной температуры, выдержка при этой температуре и охлаждение. На данных этапах происходят следующие теплофизические процессы:

- теплопередача от окружающей среды к детали;
- распределение тепловой энергии в объеме детали;
- фазовые и структурные превращения, происходящие с выделением или поглощением тепла;
- упругие и пластические деформации, происходящие вследствие изменения температуры детали и фазовых превращений.

Прогнозирование протекания этих процессов при нагреве, их влияние на получаемые свойства деталей и является задачей моделирования.

В наши дни в области CAE (Computer Aided Engineering) моделирования теплофизических процессов и устройств находят применение универсальные и специализированные программные средства.

Универсальные программные средства предоставляют возможность моделирования различных физических процессов в одной программной оболочке с возможностью их адаптации для анализа конкретного технологического процесса или конструкции. В них, как правило, предусмотрено несколько уровней ветвления хода решения задачи, что придает таким пакетам некоторую сложность и трудоемкость в использовании и повышенные требования к квалификации пользователей. К таким программным средствам можно отнести MSC. NASTRAN, MSC. MARC, ANSYS, ABACUS и др.

В свою очередь специализированные программные средства предназначены для моделирования одного или нескольких, близких по физическим основам технологических процессов (например, закалка, литье, штамповка). Конечно же, универсальные и специализированные программные средства имеют свои особенности в построении. Однако чаще всего общим для современных CAE-систем является типовая структура, основанная на реализации трех основных подсистем (блоков): препроцессора, процессора, постпроцессора.

При моделировании сложных технических объектов возникают проблемы, связанные с трудоемкостью подготовки большого количества исходной информации, ее проверки и корректирования. При ручной подготовке большого объема входных данных неизбежно появление ошибок.

Поэтому CAE-приложений имеют препроцессоры — подсистемы автоматизированной подготовки информации. Блок процессора непосредственно осуществляет математические операции обработки входных данных. В блоке постпроцессора осуществляются интерпретация и представление в необходимой форме результатов моделирования. Например, наглядное графическое распределение по поверхности и в объеме (сечении) модели полей температур, построение графических и табличных зависимостей величин от времени и т.д. Базы данных в CAE-приложениях могут быть реализованы в виде отдельного программного модуля с использованием СУБД и специального графического интерфейса либо интегрированы в программный комплекс с возможностью чтения данных из файла определенного формата [1].

Универсальные программные средства

Рассмотрим подробнее особенности универсальных программ, большинство из которых построено на основе применения метода конечных элементов (МКЭ).

Программный комплекс MSC.NASTRAN обеспечивает расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) и решение задач теплопередачи при различных процессах [1]. Предусмотрена возможность моделирования практически всех типов материалов, включая композитные и гиперупругие. MSC.NASTRAN работает на персональных компьютерах, рабочих станциях и суперкомпьютерах. Применение MSC.NASTRAN для моделирования задач термообработки возможно лишь при наличии в его составе подпрограмм пользователя, содержащих информацию о кинетике фазовых превращений в различных металлах и сплавах. Это является существенным недостатком программы и требует специальной подготовки пользователей. Кроме того, в базах данной программы отсутствует информация о физико-механических и технологических свойствах фазовых составляющих сталей. Поэтому для адаптации данной программы требуется постоянное расширение баз данных экспериментальными данными для различных материалов.

Универсальным программным комплексом, позволяющим моделировать различные физические процессы и явления, является ANSYS. ANSYS позволяет решать задачи прочности, теплофизики, гидрогазодинамики, электромагнетизма, совместно с расчетом усталостных характеристик и процедур оптимизации. Широкие возможности представляются также препроцессором. На разработанной модели пользователь

может удалять несущественные мелкие детали, дорабатывать детали, проводить сгущение/разрежение сетки и другие важнейшие операции, без которых в некоторых случаях дальнейшее решение будет некорректным или вообще не сможет быть достигнуто. Построение поверхностной, твердотельной и каркасной геометрии и внесение изменений осуществляется средствами собственного геометрического модуля [1]. Однако аналогично MSC.NASTRAN для решения задач термообработки в ANSYS требуется создание дополнительных моделей и написание подпрограмм пользователя, расширение базы данных.

MSC.MARC предоставляет возможности для комплексного нелинейного анализа конструкций, решения сложных задач термической прочности и моделирования технологических процессов. Программный комплекс широко используется для компьютерного моделирования технологических процессов прокатки, прессования, листового и объемного формования, суперпластического формования. Доступны также неструктурные типы анализа: электростатический, магнитостатический, электромагнитный, акустический, гидродинамический, анализ подшипников, теплопередача и др. [3]. Для решения задач термообработки в данной программе также требуется создание подпрограмм пользователя, учитывающих кинетику фазовых и структурных превращений. Кроме того, опыт практического использования MSC.MARC [4] показывает, что большую сложность представляют описание температурной зависимости свойств фазовых составляющих стале- и формализация присутствия нескольких фаз в материале в один и тот же момент времени.

Исходя из приведенного анализа, можно сделать вывод, что в настоящее время не существует как в нашей стране, так и за рубежом универсальных конечно-элементных приложений, которые возможно было бы применить для моделирования процессов термообработки без проведения исследовательских работ по их адаптации, разработке дополнительных моделей, подпрограмм пользователя и расширения баз данных свойств материалов. Кроме того, лицензионные универсальные программные средства характеризуются высокой стоимостью (более 50 тыс. долл. США), что ограничивает возможности их приобретения большинством потенциальных потребителей нашей страны.

Специализированные программные средства

К специализированным программным средствам, которые можно применять для модели-

рования процессов термообработки, можно отнести DEFORM-3D [5], Ind [6], ThermoSim [7,8], IndHeat [9, 10]. Как отмечалось ранее, особенностью этих программных средств является их узкоспециализированное назначение.

Например, система DEFORM-3D предназначена для трехмерного анализа процессов обработки металлов давлением, а также процессов термообработки при установке дополнительного модуля DEFORM-HT. Типичные направления применения программного комплекса следующие: ковка, выдавливание, вырубка, обработка резанием, высадка и др. Для моделирования процессов термообработки в состав DEFORM-3D включен дополнительный модуль DEFORM-HT. Основная задача DEFORM-HT — анализ процессов термообработки на ранних стадиях проектирования. Программный комплекс предоставляет возможности анализа таких процессов термообработки, как нормализация, отжиг, закалка, отпуск, старение и цементация. В процессе моделирования учитываются фазовые превращения, науглероживание, изменения объема и тепловыделение в результате фазовых превращений с получением численных значений объемной доли мартенсита, аустенита, величины остаточных напряжений, коробления, твердости и других параметров.

Таким образом, программный комплекс DEFORM-3D с модулем DEFORM-HT может успешно применяться для анализа процессов термообработки. В качестве недостатков следует отметить высокую стоимость, а также ограниченность базы данных свойств фаз материалов, что не позволяет моделировать процессы термообработки легированных сталей, без проведения предварительных экспериментальных исследований данных материалов.

Программа Ind [6], разработанная в Институте тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, позволяет проводить математическое моделирование индукционного нагрева и охлаждения, выполнять теоретическое построение термических кривых нагрева и охлаждения для любой точки поверхности и сечения обрабатываемой детали. Вводя параметры применяемого преобразователя частоты, форму, размеры и скорость движения индуктора, первоначальную температуру, материал и размеры нагреваемых деталей и охлаждающей среды, можно расчетным путем прогнозировать распределение температурного поля и слоя закалки на обрабатываемых деталях. В режиме просмотра результатов расчета возможен выбор контрольных точек в любых узлах модели де-

тали и построение для этих точек температурных кривых нагрева и охлаждения. Прогнозирование твердости детали после закалки осуществляется с помощью термокинетических диаграмм.

Следует отметить, что программа Ind работает только с двухмерными моделями деталей, в процессе моделирования не учитываются напряженно-деформированное состояние детали и фазовые превращения, что снижает возможности ее практического применения и точность получаемых результатов.

Программный комплекс ThermoSim для моделирования процессов термообработки разработан совместно БГУИР и МГЭУ им. А.Д.Сахарова [7, 8]. Он реализует 3D-модель процесса термообработки, особенностью которого является математическое описание распределения температур, напряженно-деформированного состояния, твердости детали с учетом фазовых превращений, образования трещин, а также релаксации напряжений за счет пластических деформаций.

ThermoSim реализует следующие функции: загрузку файлов геометрии модели детали в формате STL или форматах программ DEFORM-3D и MSC.MARC; отображение детали на экране, масштабирование и вращение; загрузку текстового файла проекта, содержащего информацию о модели для выполнения расчета; разбиение геометрии модели детали на конечные элементы определенной плотности; ввод термических, механических и других свойств материала детали непосредственно в диалоговом режиме или выбор из базы данных; ввод начальных и граничных условий, технологических режимов; расчет температур в узлах модели в процессе нагрева и охлаждения детали; расчет текущего фазового состава материала детали (на основе аппроксимации термокинетических или изотермических диаграмм); расчет твердости в объеме и на поверхности детали; расчет напряженно-деформированного состояния с учетом фазовых превращений и релаксации напряжений; отображение в виде цветных градиентов температурных полей, деформаций, напряжений, фазового состава, твердости и мест возможного образования трещин в детали; построение графических зависимостей, рассчитанных выходных характеристик процесса закалки от времени; сохранение результатов в файл.

Программный пакет IndHeat [9, 10], разработанный в ВНИИТВЧ (Санкт-Петербург) совместно с ЭСТЭЛ (Эстония), состоит из пяти модулей, предназначенных для моделирования процессов индукционного нагрева:

- PE – редактор базы данных свойств материалов заготовок и футеровок;
- CP1D - 1D-модель нагрева цилиндров и пластин;
- SS2D - 2D-модель нагрева слябов и ленты;
- UNIVERSAL2D - модель нагрева цилиндров;
- UNIVERSAL3D - модель нагрева тел с прямоугольным и более сложным сечением.

Реализованные в IndHeat модели основаны на использовании различных численных методов решения электромагнитной и тепловой задачи (МКЭ, МКР и метод интегральных уравнений) и их комбинации. Результаты расчетов представляются в наглядном текстовом и графическом виде.

Возможности пакета:

- получение полной информации об ТВЧ-установке (КПД, коэффициент мощности, активная и реактивная мощность, распределение электромагнитного и температурного поля в заготовке, внутренних напряжений, критических деформаций и т.п.);

- моделирование непрерывных линий термообработки (непрерывная разливка-прокатка, горячая гальванизация и т.п.), включающее газовые печи, зоны термостатирования, транспортировки и охлаждения;

- получаемая при расчете информация и возможность моделирования переходных процессов позволяют использовать программы при проектировании систем управления.

- вывод результатов расчетов в графическом виде, текстовом отчете, в формате XLS.

IndHeat является одним из лучших программных пакетов для моделирования индукционного нагрева. Он содержит обширную базу как нагреваемых материалов (цветные, черные металлы и сплавы, графит, керамика), так и конструкционных и теплоизолирующих. Недостатком данной программы является отсутствие возможности импорта и экспорта геометрии моделей деталей, что снижает возможности его применения, однако при этом упрощает практическое использование менее подготовленными пользователями.

Выводы

Исходя из приведенного анализа, можно сделать вывод, что применение специализированных программных средств значительно ускоряет процесс моделирования термообработки деталей, особенно при накоплении базы данных экспериментальных исследований по свойствам, фазовому составу и структуре различных металлов и сплавов. Их использование особенно актуально в научных и учебных организациях, а также на крупных промышленных предприятиях, имею-

ших в своем составе опытные конструкторские отделы и центральные заводские лаборатории. Применение узкоспециализированных продуктов позволяет избежать грубых ошибок и просчетов при проектировании оснастки и нагревательного оборудования, разработке технологических процессов термообработки и отладки режимов работы оборудования. Данные, полученные при моделировании, могут применяться для внесения их в автоматизированные системы управления и контроля промышленного оборудования с целью своевременного выявления сбоев в параметрах технологического процесса и для предотвращения наступления аварийной ситуации.

В заключении следует отметить, что настоящее время в Беларуси уделяется недостаточно внимания вопросам моделирования процессов

термообработки, особенно при использовании индукционного нагрева. На это имеется целый ряд причин, основными из которых, на наш взгляд, являются: отсутствие на промышленных предприятиях необходимых программных комплексов, отсутствие квалифицированных кадров для использования современных САПР. Поэтому только комплексное решение следующих проблем: обучение молодых специалистов, исследования свойств и структуры материалов, разработка современных технологий и оборудования, автоматизация и компьютеризация технологического оборудования, контроль качества всех этапов производства позволит процессам с применением термического нагрева деталей стать экономически эффективными, высокопроизводительными, рентабельными и безопасными.

Список использованных источников

1. Кундас С.П., Тонконогов Б.А., Кашко Т.А., Гринчик Н.Н. Компьютерное моделирование технологических систем. Учеб. пособ. В 2-х ч. Ч. 2. Мн.: БГУИР, 2003. 182 с.
2. ANSYS Release 9.0 Documentation [Computer file] // ANSYS, Inc. Computer data. Canonsburg, 2004. 1 CD-ROM.
3. MSC. MARC Volume A: Theory and User Information, Version 2005 [Computer file] / MSC. Software Corporation. Computer data. Santa Ana, 2004. 1 CD-ROM.
4. Кундас С.П., Кузьменков А.Н., Гуревич В.А. Адаптация программного комплекса MARC для моделирования теплообмена и остаточных напряжений при плазменном напылении покрытий // Материалы 2-й Рос. конф. по применению современных программных разработок фирмы MSC на предприятиях России, Беларуси и Украины. М., 1999. 15 с. (CD).
5. Site of DEFORM System // Scientific Forming Technologies Corporation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.deform.com/products/deform-ht/>
6. Гринчук П.С., Файн И.В. Математическое моделирование работы установки индукционного нагрева стальных заготовок и оптимизация ее электрической намотки // Тепло и массоперенос-2007. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2007. С. 362-368.
7. Кундас С.П., Кашко Т.А. Компьютерное моделирование технологических систем: Учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1. – Мн.: БГУИР, 2002. – 168 с.: ил.
8. Кундас С.П., Гишкелюк И.А., Иванов Д.Г., Лемзиков А.В., Чмиленко Ф.В. Математическое моделирование индукционной закалки с применением метода конечных элементов // Материалы международной конференции «Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева», СПб, 2005, стр. 292-299
9. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Численные методы в теории индукционного нагрева. СПб.: Технолит, 2008.
10. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Малышев А.А., Скворцов В.Е. Двумерные и трехмерные электротепловые модели индукционных нагревателей: Учеб. пособ. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. 40 с.

УДК 669.15:621.785.5

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ С ЭФФЕКТОМ САМОУПРОЧНЕНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

¹А.П. Чейлях¹Приазовский государственный технический университет,²Я.А. Чейлях, ²Г.В. Шейченко²ПАО «Мариупольский металлургический комбинат имени Ильича»
г. Мариуполь, Украина

Обобщены перспективные материалы и технологии упрочнения для ряда деталей и инструмента, которые основаны на использовании метастабильных состояний, что обеспечивает реализацию деформационных фазовых превращений при испытаниях (эксплуатации) (ДФПИ) обуславливающих эффекты их самоадаптации и самоупрочнения в процессе срока службы. Показаны преимущества и широкие возможности повышения механических свойств и эксплуатационной стойкости материалов благодаря оптимальному развитию ДФПИ и получению указанных эффектов.

Perspective materials and technologies of hardening for the parts of machine and tools, which are based on the use of the metastable states, that provides realization of deformation induced phase transformations at the tests (operation) (DIPTT) of stipulating the effects of their self-adapting and self-strengthening in the process of term of service are generalized. Advantages and wide possibilities of increase of mechanical properties and operating service life of materials are rotined due to optimum development of DIPTT and receipt of the indicated effects.

Многие виды деталей различного механического оборудования предприятий Украины, России и Беларуси изготавливают из дефицитных и дорогостоящих металлических материалов, к тому же требуют существенного повышения надежности и долговечности эксплуатации. Задача создания новых экономнолегированных материалов, обладающих повышенными свойствами и, одновременно, экономичных, а также эффективных способов и технологий их упрочнения остается весьма актуальной задачей современного материаловедения.

В Приазовском государственном техническом университете (ПГТУ) накоплен определенный опыт разработки новых функциональных материалов и упрочняющих технологий для деталей оборудования, способных к самоупрочнению и самоадаптации в условиях эксплуатации, обладающих повышенными механическими и эксплуатационными свойствами.

Целью настоящей работы является обобщение информации о разработанных самоадаптирующихся экономнолегированных материалах, способах и технологиях упрочнения, основанных на использовании деформационных фазовых превращений при испытаниях и эксплуатации (ДФПИ), что обеспечивает эффект эксплуатационного самоупрочнения.

Для быстроизнашивающихся деталей многих видов механического оборудования (футеровочные плиты тракта шихтоподачи в агло-доменном производстве, лопасти дробеметов, ковши пескометов, сопла дробеструйных аппаратов и др.) широко применяются износостойкие чугуны. Многие известные марки износостойких чугунов, например «нихард» (ЧХ9Н5), ИЧХ12М, ЧХ16М2, ЧХ28Н2, «клаймэкс эллой – 42», комплексно легированный износостойкий чугун (КЛИЧ) марки ЧХ15Г2НМФТ и др., содержат в

своём составе дорогие и остродефицитные компоненты (Ni, Mo, V, W, Nb и др.) [1–3], что сдерживает их широкое использование и стимулирует необходимость разработки более экономичных материалов.

С целью замены этих материалов экономнолегированными, не содержащими этих элементов, разработаны износостойкие чугуны на Fe-Cr-Mn-C и Fe-Mn-C основах [4]. Главной их особенностью и неоспоримым преимуществом является отсутствие в составе указанных выше компонентов, которое компенсируется специально создаваемой метастабильностью аустенитной составляющей структуры, что обеспечивает эффект деформационного самоупрочнения в процессе эксплуатации благодаря развитию в рабочем поверхностном слое деталей деформационного мартенситного превращения при изнашивании (ДМПИ) непосредственно под воздействием эксплуатационной абразивной среды (шихтовых материалов). Это превращение вызывает образование мартенсита деформации (аналогично тому как образуется мартенсит при закалке) в тонком поверхностном слое, однако более дисперсного, более твердого и износостойкого. Параллельно протекают процессы динамического деформационного старения мартенсита и аустенита (ДДС), обуславливающего дополнительное дисперсионное самоупрочнение выделяющимися высокодисперсными частицами карбидов и карбонитридов. Кроме того, эти ДФПИ сопровождаются перераспределением и поглощением энергии возмущающей эксплуатационной среды, в связи с чем меньшая ее часть остается на разрушение поверхности деталей [4]. Все это в совокупности обеспечивает дополнительное повышение износостойкости, надежности работы и долговечности деталей, изготовленных из этих чугунов.

Разработанные износостойкие чугуны на основе Fe-Cr-Mn-C и Fe-Mn-C внедрены для отливки защитных плит разгрузочной части агломашин

аглофабрик (рис. 1), тракта шихтоподачи в доменных цехах (защитные плиты перекидного лотка, скипов и распределительного лотка и др.), лопаток, импеллеров и защитных плит дробебетных машин, ковшей пескометных аппаратов (рис. 2), сопел дробеструйных установок. Их применение позволяет исключить из состава чугунов и, соответственно, экономить остродефицитные легирующие компоненты (никель, молибден, ванадий) и снижать себестоимость при одновременном повышении долговечности деталей в 1,5–2,5 раза, сокращении затрат на производство, ремонтно-эксплуатационных расходов, повышении производительности оборудования.

Применительно к конкретным условиям эксплуатации деталей необходимы определенные фазовый и химический состав чугунов, степень метастабильности структуры (для оптимального развития ДМПИ, ДДС и реализации эффектов самоадаптации к условиям работы и самоупрочнения), что регулируется легированием, в ряде случаев и режимом термической обработки.

В целях экономии остродефицитных легирующих элементов и замены дорогих жаростойких сталей типа 35X23H7CJ, 40X24H12CJ, содержащих 7–13 % никеля и применяющихся для деталей печной арматуры (рис. 3), нами разработаны безникелевые жаростойкие стали [5]. Стали содержат аналогичное количество хрома 21–23,5 %, никель исключен из состава, при небольшом содержании ванадия (0,1–0,25 %) и марганца.

Для изготовления колосников спекательных тележек агломерационных машин металлургическими предприятиями широко используются износостойкие и жаростойкие чугуны типа ЧХ28Н2, стали 75X28Н2CJ, содержащие ~ 2 % никеля и большое количество хрома 27–30 %. С целью экономии никеля и хрома при сохранении на высоком уровне эксплуатационной долговечности таких материалов, нами разработан состав нового экономнолегированного жаростойкого сплава, который

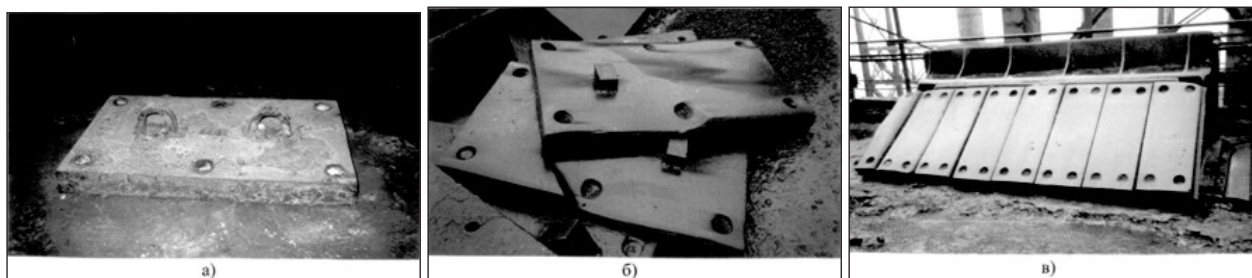


Рис. 1. Внешний вид футеровочных плит агломашин из экономнолегированного чугуна до эксплуатации (а), после эксплуатации (б) и ножа скалывания после эксплуатации (в) в течение 1 года

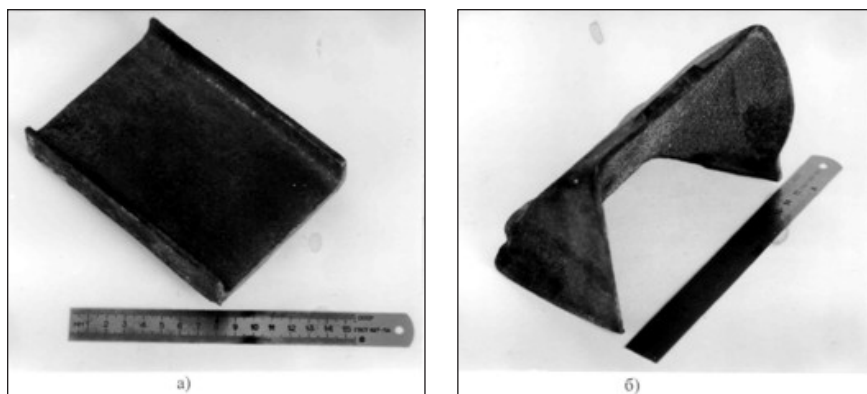


Рис. 2. Внешний вид лопасти дробемета (а) и ковшика пескомета (б) из экономнолегированного чугуна

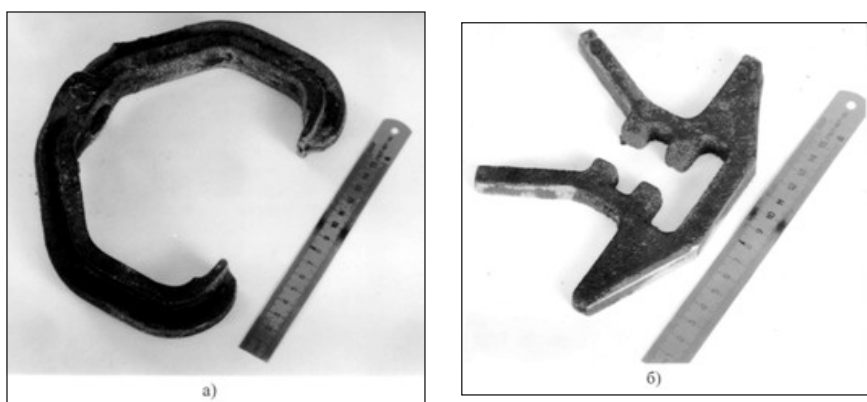


Рис. 3. Детали печной арматуры из безникелевых жаростойких сталей: а) подвеска; б) скоба

содержит меньше, примерно на 8 % количество хрома, исключено содержание никеля, при дополнительном легировании кремнием и титаном [6].

В условиях циклирования температуры при эксплуатации колосников ($\sim 600 \times 20$ °С) твердость известных применяющихся материалов (ЧХ28Н2, ЧХ24Т, 75Х28Н2СЛ) постепенно снижается на 6–8 HRC, в то время как в разработанном сплаве она повышается на 3–7 HRC. Последнее объясняется эффектом дестабилизации аустенита образованием мартенсита и дисперсионным упрочнением. В результате износостойкость известных никельсодержащих материалов в процессе термоциклирования постепенно снижается, а разработанного сплава – напротив, повышается.

По жаростойкости сплавы с меньшим содержанием углерода 75Х28Н2СЛ как и разработанный безникелевый превосходят чугуны ЧХ28Н2 и ЧХ24Л, содержащих значительно большее количество углерода, связывающего основной

элемент — хром в карбиды. К тому же в процессе ТЦО износостойкость чугунов ЧХ28Н2 и ЧХ28Л непрерывно и в значительной степени снижается до уровня сплавов с пониженным содержанием (0,65–0,85 %) углерода. В результате последние обладают лучшим сочетанием горячей абразивной износостойкости и жаростойкости и превосходят свойства чугунов (ЧХ28Н2 и ЧХ24Л). Таким образом, разработанный безникелевый жаростойкий сплав с меньшим содержанием хрома является серьезной альтернативой дорогостоящим чугунам и сталям и эффективным их заменителем.

Для ряда деталей насосного оборудования используются коррозионно-стойкие стали аустенитного класса 12Х18Н9Л, 12Х18Н10ТЛ, аустенитно-ферритного и феррито-аустенитного классов марок 08Х22Н6Т, 08Х18Г8Н2Т, которые содержат от 2 до 11 % остродефи-

цитного никеля, что сдерживает их порой необоснованное использование. Основную часть запасных деталей, используемых для ремонта насосов, составляют рабочие колеса, аппараты направляющие, отводы. Их износ происходит вследствие перемещения в процессе работы значительного количества перекачиваемой среды, насосы оказываются под разрушительным гидроабразивным воздействием движущихся в потоке твердых частиц песка, грунта, продуктов коррозии.

В целях экономии никеля и эффективной замены указанных сталей при сохранении достаточной коррозионной стойкости и повышения механических и эксплуатационных свойств нами разработаны безникелевые коррозионно-стойкие стали аустенитно-ферритного класса с метастабильной аустенитной фазой [7, 8]. Метастабильность обуславливает протекание $\gamma \rightarrow \alpha'$ ДМПИ, что значительно повышает весь комплекс механических свойств (табл. 1).

Табл. 1

Механические свойства разработанных безникелевых и звестных хромоникелевых коррозионно-стойких сталей

Марка стали	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	KCV, МДж/м ²	KCU, Дж/м ²
08X18Г6СФ	990–1240	475–490	30–39	20–38	>3,75	-
08X22Г6СФ	700–990	485–510	40–46	50–67	2,5–3,5	-
20X18Г9С2ДЛ	760–810	520–600	28–33	27–35	-	3,7
08X22Н6Т [9]	680	410	40	45	-	2,5
08X18Г8Н2Т [9]	600	350	2	0	-	-
10X18Н9Л (ГОСТ 977-88)	441	177	25	35	-	0,98

Разработанные экономнолегированные стали значительно превосходят известные по прочностным показателям и ударной вязкости при сопоставимой пластичности не только в горячедеформированном, но даже и в литом состояниях. Они рекомендуются для изготовления и ремонта насосов погружных и центробежных, которые применяются для перекачки воды речной, водопроводной, технической, морской плотностью до 1200 кг/м³ с температурой до +40 °С водородным показателем рН 5,4–9, общей минерализацией до 250 г/л, а также для сред средней и слабой агрессивности (раствор технического аммиака, моноэтаноламина и др.). Разработанные стали не уступают по долговечности известным дефицитно-легированным сталям, приведенным выше, и являются эффективными их заменителями.

Для деталей шламовых насосов, предлагается замена коррозионно-стойкого чугуна ЧХ28Н2 и стали 75Х28Н2СЛ на разработанные сплавы, безникелевые и с меньшим содержанием хрома. Для конкретных условий их эксплуатации подбирается химический состав чугуна или стали, а также технологический режим термической обработки.

Для восстановления электродуговой наплавкой изношенных цапф сталеразливочных ковшей, ходовых колес мостовых кранов разработаны порошковые наплавочные ленты ПЛ-Нп-10Х10АГ8МФДБ-А-Ф (ПЛН-4) и ПЛ-Нп-20Г14АФ-А-Ф (ПЛН-6) [10], содержащие некоторые дефицитные компоненты — молибден, ниобий, медь, металлический и азотированный марганец. С целью экономии указанных выше дефицитных ингредиентов, снижения себестоимости наплавочного материала и одновременного повышения эксплуатационных свойств на основе проведенных исследований разработана новая наплавочная порошковая лента ПЛН-7 [11], не содержащая указанных компонентов. Относительная износостойкость металла, на-

плавленного лентой ПЛН-7 оптимального состава в 1,5 раза выше, чем лентой ПЛН-6 и в 3,9 раза выше, чем лентой ПЛН-4, что объясняется оптимальным и более эффективным развитием $\gamma \rightarrow \alpha'$ ДМПИ. Дополнительный эффект в повышении износостойкости металла, наплавленного лентой ПЛН-7 дает высокий отпуск при температурах 600–650 °С упрочняющий и, одновременно, дестабилизирующий аустенит вследствие выделения карбидов. Попутно он решает задачу уменьшения величины внутренних напряжений в наплавленном слое, что повышает надежность и долговечность деталей. Производственные испытания ходовых колес тяжело нагруженных мостовых кранов мартеновского цеха разработанной лентой ПЛН-7 показали повышение их долговечности в 1,5–1,6 раза в сравнении с колесами наплавленными лентой ПЛН-6. Производство наплавочного материала ПЛН-7 и технология восстановления наплавкой им изношенных колес мостовых кранов освоено в ПАО «Азовмаш» со значительным экономическим эффектом.

Разработана новая экономнолегированная порошковая наплавочная проволока на Fe-Cr-Mn основе [12]. Электродуговой наплавкой обеспечивается формирование метастабильного металла аустенитного, аустенитно-мартенситного или мартенситно-аустенитного структурных классов в зависимости от содержания легирующих элементов, влияющих на точки Мн и Мк и технологических параметров. Реализация эффектов самоадаптации и самоупрочнения наплавленного металла в процессе изнашивания вследствие развития $\gamma \rightarrow \alpha'$ ДМПИ, обеспечивает повышенный комплекс механических и эксплуатационных свойств наплавленного металла. Для разных условий эксплуатации, фазовый состав, структура и метастабильность аустенита регулируются разработанными режимами дополнительного легирования при наплавке из флюсующее-легирующей

смеси [13], способами цементации, термической (закалка, отпуск), термоциклической, плазменной [14] обработок наплавленного металла. Эта проволока и технология наплавки рекомендованы для использования на металлургических комбинатах «Азовсталь» и имени Ильича при восстановлении проводок шаропрокатного стана (рис. 4), валков пильгерстана, роликов рольгангов и др. быстроизнашивающихся деталей металлургического оборудования.

Для ряда деталей оборудования, работающих в условиях ударных нагрузок в сочетании с ударно-абразивным износом, которые изготавливаются из стандартных конструкционных сталей, разработаны режимы изотермической закалки [15]. Они обеспечивают формирование структуры нижнего бейнита с повышенным количеством 27–35 % метастабильного Аост, способного к развитию $\gamma_{\text{ост}} \rightarrow \alpha'$ ДМПИ и реализации эффекта самоупрочнения в процессе работы деталей или инструмента.

В результате значительно повышается комплекс механических свойств сталей, например 55С2 и 60С2 ($\sigma_{\text{в}}=1500\text{--}1950$ МПа, $\sigma_{0,2}=1290\text{--}1500$ МПа, $\delta=13\text{--}14$ %, $\psi=20\text{--}56$ %, $KCU=0,42\text{--}0,7$ МДж/м²) и износостойкость. В частности, для пневмозубил, изготавливаемых в ПАО «Азовмаш» из сталей 6ХС и 60С2 на основе результатов исследований был разработан режим изотермической закалки с температурой изотермической выдержки при 250–300 °С и оптимальной продолжительности с учетом масштабного фактора. В результате долговечность пневмозу-



Рис. 4. Внешний вид наплавленных проводок шаропрокатного стана

бил, термически обработанных по новой технологии увеличилась в 2 раза.

Наиболее ответственными и наименее долговечными деталями распределительных корпусов гидросистемы прессов, являются впускные и сливные клапана и седла клапанов, которые изготавливают из нержавеющей сталей 20Х13, 30Х13. Они работают в сложных условиях многократно повторяющихся соударений рабочих предварительно притертых поверхностей фасок контактирующих деталей, кавитации и коррозионного воздействия, а присутствующие в воде абразивные частицы (окалина, твердые песчинки, грязь) усиливают износ. Для этих деталей разработаны режимы закалки ТВЧ (для некоторых клапанов закалки с печным нагревом) при повышенных температурах, обеспечивающих сохранения наряду с высокодисперсным мартенситом закалки повышенного количества (25–30 %) Аост [16]. В результате в процессе эксплуатации клапанных пар реализуется эффект деформационного самоупрочнения (самозакалки) благодаря постепенному развитию $\gamma_{\text{ост}} \rightarrow \alpha'$ ДМПИ в рабочем слое контактирующих поверхностей. Эта технология позволила повысить долговечность клапанов в 11 раз и внедрена в ПАО «Азовмаш».

Инструментальные стали Х9Ф, Х10Ф с пониженным содержанием хрома специально разрабатывались для режущих шорошечных дисков горнопроходческих комплексов, которые после разработанных режимов закалки содержали определенные количества (10–16 %) Аост наряду с мартенситом закалки. Освоено изготовление биметаллических дисков с рабочей частью из сталей Х12МФ, Х9Ф, 9Х4ВФ методом электрошлакового переплава и центробежного литья. Отработана технология термической обработки, обеспечивающая повышение комплекса механических свойств и износостойкости благодаря оптимальному развитию $\gamma_{\text{ост}} \rightarrow \alpha'$ ДМПИ [17]. Промышленные испытания породоразрушающих дисков горнопроходческих комплексов, проведенные «БАМтоннельстроем» при проходке Северомуйского тоннеля Байкало-Амурской магистрали (Россия), показали эксплуатационную стойкость сталей Х9Ф и Х10Ф на 35–40 % выше, чем стали Х12МФ. Это соответствует долговечности более дорогих дисков производства фирмы «Вирт» (Германия) и других зарубежных аналогов [18], а диски из стали 9Х4ВФ имеют на 10 % большую стойкость, чем из сталей Х9Ф и Х10Ф.

Стали типа Х12Ф1 и Х12М после разработанных режимов закалки с температур 1100–1150 °С

содержат повышенное количество (40–70 %) Ауст наряду с мартенситом закалки и карбидами Cr₇C₃, Cr₂₃C₆. На Болшевском комбикормовом заводе (Московская обл., Россия) были проведены испытания опытно-промышленной партии молотков дробилок зерна из стали X12M термообработанных по оптимальному режиму. Они показали повышение их стойкости в 2–2,5 раза в сравнении с серийно выпускавшимися закаленными молотками из стали 30ХГСА, что объясняется развитием гост®аф ДМПИ. Образование мартенсита деформации в поверхностном слое молотков показано на рис. 5.

Предложена замена материала фильер из быстрорежущих сталей типа P18, P6M5 правильно-отрезного автомата И6122А, используемого для рихтовки и выравнивания из бунтов стальной арматуры, на менее дорогие стали типа X12Ф1 и X12М. Для этих сталей рекомендуются оптимальные режимы закалки с повышенных температур 1150–1200 °С и среднетемпературного отпуска, обеспечивающих сохранение в структуре 60–65 % метастабильного Ауст, развития гост®аф ДМПИ и как результат эффекта самоупрочнения при эксплуатации. Об этом свидетель-

ствует повышение твердости в местах контакта фильеры с арматурой в процессе эксплуатации на 2,5–5 HRC.

В результате долговечность фильер возросла в 1,5 раза в сравнении со сталью P18 и в 15–30 раз в сравнении с закаленными сталями типа 40Х, 50Х [19].

Проведен также комплекс исследований по оптимизации состава марганцовистых сталей типа стали Гадфильда [20], а также по разработке режимов обезуглероживающей закалки [21] для обеспечения деформационной фазовой метастабильности и реализации гост®аф ДМПИ. Это обеспечило значительное в 2–2,5 раза повышение долговечности бил дробилок шихтовых материалов и может быть рекомендовано для многих других деталей из высокомарганцовистых и высокохромистых износостойких сталей.

Таким образом, на основе многолетних исследований предложены новые метастабильные материалы и новые технологии термической обработки и наплавки, обеспечивающие значительное повышение надежности и долговечности многих быстроизнашивающихся деталей разнообразного механического оборудования металлургических и машиностроительных предприятий.

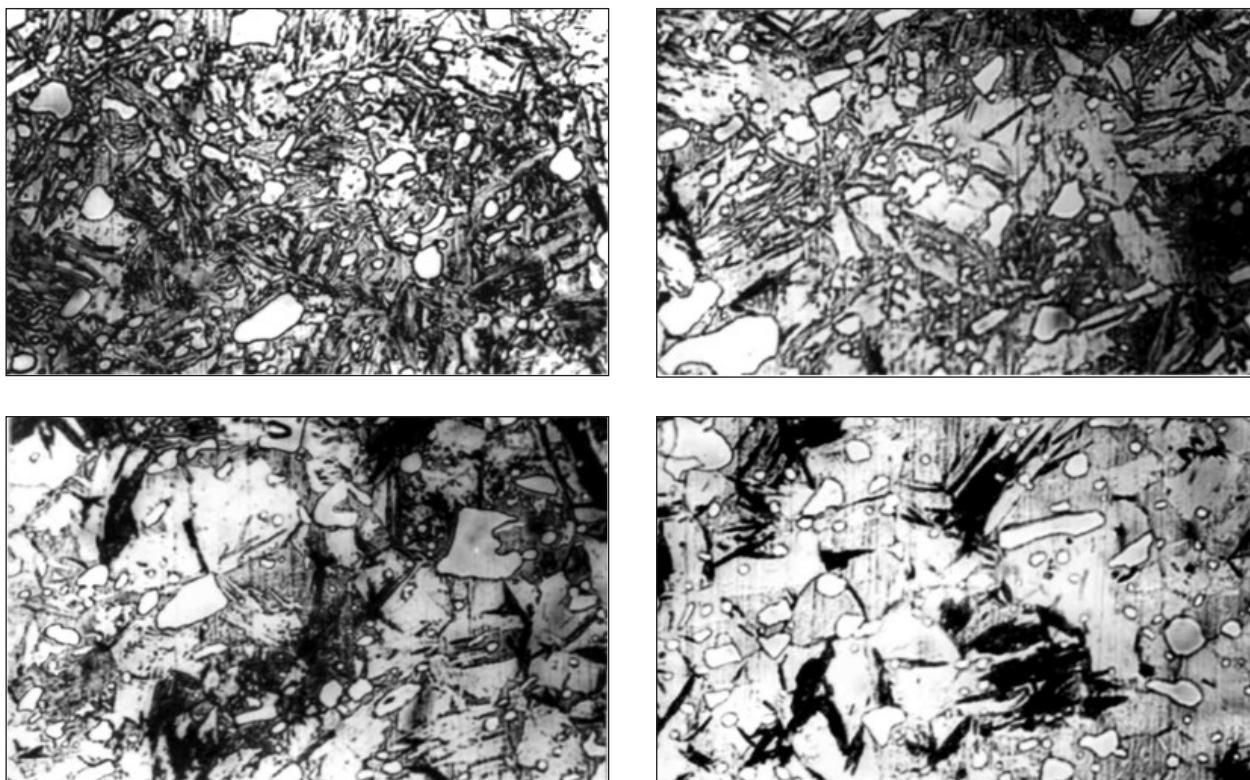


Рис. 5. Изменение микроструктуры молотков из стали X12M от поверхности (верхний снимок) к центру (нижний снимок) после эксплуатации, ×700

Список использованных источников

1. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. - М.: Металлургия, 1972. -176 с.
2. Войнов Б.А. Износостойкие сплавы и покрытия. - М.: Машиностроение, 1980. – 120 с.
3. Чугун: Справочник / Под ред. А.Д. Шермана и А.А. Жукова.- М.: Металлургия, 1991.- 576 с.
4. Чейлях А.П. Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии. – Мариуполь: ПГТУ, 2009. – 483 с.
5. Жаростійка сталь: патент № 23183 (Україна) МКВ С22С 38/24; // Л.С. Малинов, О.П. Чейлях, О.Ф. Ткачов та інш.- (Україна) № 96083338; Заявл. 23.08.96; Опубл. 15.09.2000. Бюл. № 4.- 4 с.
6. Литий жаростійкий сплав. патент на винахід № 80498 (Україна), МПК С22С 36/28, 38/38, 38/50, 37/06, 37/10; // О.П. Чейлях, С.В. Прекрасний, В.В. Кліманчук, П.М. Кирильченко та інш. – (Україна), № а 200604628; Заявл. 25.04.2006; Опубл.25.09.2007, Бюл. № 15.
7. Сталь: патент № 18012А Украина. МКИ С22С 38/38 /А.П. Чейлях, Л.С. Малинов, С.Н. Гоголь, А.Б. Гоголь (Украина). - № 96020748; заявлено 27.02.96; опубл. 17.06.97; Бюл. № 5.- 4с.
8. Чейлях А.П. Гавриленко Г.В. Структура и механические свойства новых безникелевых коррозионностойких сталей аустенитно-ферритного класса // Вестник Приазов. гос. техн. ун-та: Сб. научн. тр. –Мариуполь, 1999, Вып. 8.- С. 76-79.
9. Ульянов Е.А. Коррозионностойкие стали и сплавы: Справочник. - М.: Металлургия, 1991. - 256 с.
10. Новый наплавочный материал на Fe-Cr-V основе для повышения долговечности ходовых колес мостовых кранов / Л.С. Малинов, Е.Я. Харланова, А.А. Колечко // Сварочное производство.- 1988.- № 9.- С. 18-20.
11. Разработка и исследование новой порошковой ленты для наплавки колес мостовых кранов/ Л.С. Малинов, А.П. Чейлях, Е.Я. Харланова и др. // Сварочное производство.- 1995.- № 10.- С. 22-25.
12. Чейлях Я.А., Чигарев В.В. Структура и свойства наплавленной износостойкой Fe-Cr-Mn стали с регулируемым содержанием метастабильного аустенита // Автоматическая сварка, 2011, №8.- С. 20-24.
13. Спосіб електродугового наплавлення: патент на винахід № 101287, МПК В23К 9/04 // Я.А. Чейлях, В.В. Чигарев, Г.В. Шейченко (Україна) №а201205829; заявл. 14.05.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. 5.
14. Повышение износостойкости наплавленного Fe-Cr-Mn металла плазменной обработкой с получением метастабильной структуры / Я.А. Чейлях, В.В. Чигарев, Г.В. Шейченко и др. // Металлофизика и новейшие технологии. – 2013, т. 35. - №8. – С. 1045-1059.
15. Влияние изотермической закалки на количество, стабильность остаточного аустенита и свойства конструкционных сталей / Л.С. Малинов, А.П. Чейлях, Е.Я. Харланова и др. // МиТОМ.-1989.- № 12.- С. 12-16.
16. Чейлях А.П., Малинов Л.С., Лейко Н.Г. Повышение долговечности клапанов из стали 20Х13 скоростной высокотемпературной закалкой // Металлург. и горноруд. пром-сть.- 1993.- № 3.- С. 27-29.
17. Влияние состава и термообработки на структуру и свойства литых хромистых сталей / Л.С. Малинов, А.П. Чейлях, Г.И. Макмак и др. // Изв. ВУЗов. Чер. металлургия.- 1994.- № 11.- С. 43-45.
18. Повышение долговечности режущих дисков горнопроходческих комплексов/ Л.С. Малинов, А.П. Чейлях, С.И. Кантор, С.М. Фучило // Литейное производство.- 1993.- № 7.- С. 11-12.
19. Чейлях А.П., Прекрасный С.В., Щетинин С.Д., Сущенко В.П. Повышение долговечности фильер с использованием метастабильных состояний в хромистых инструментальных сталях // Металл и литьё Украины.- 2003.- № 11-12.- С. 33-34.
20. Малинов Л.С., Малинов В.Л. Экономнолегированные сплавы с мартенситными превращениями и упрочняющие технологии. – Харьков: ННЦ «ХФТИ», 2007. – 352 с.
21. Чейлях А.П., Чейлях Я.О., Куцомеля Ю.Ю. Гарт сталі 110Г13Л із знеуглецюванням аустеніту // Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів: Збірка матеріалів. Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. – С. 10-12.

УДКА 536.246.2

О НАИЛУЧШИХ ДОСТУПНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ

*Г.И. Журавский**Институт тепло – и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси*

Техногенное влияние на природу к началу XXI века привело к опасности негативных изменений экологического состояния атмосферы, гидросферы, литосферы и создало одну из глобальных проблем человечества – проблему предотвращения грядущего необратимого ухудшения состояния окружающей среды.

Из земных недр ежегодно извлекается более 100 млрд. т полезных ископаемых, производится около 60 млн. т пластмасс и выплавляется свыше 800 млн. т металлов. В настоящее время на каждого жителя Земли добывается и производится около 20 т в год исходного сырья, которое далее перерабатывается примерно в 2 т полезного продукта.

В мире ежегодно сжигается до 5 млрд. т угля, около 28 млрд. кубических метров газа и 3,2 млрд. т нефти. При этом выделяется $3,6 \cdot 10^{20}$ Дж тепловой энергии (количество поступающей на Землю солнечной энергии составляет $5,5 \cdot 10^{23}$ Дж в год), которая рассеивается в окружающей среде, изменяя её температурный режим. Сжигание ископаемых органических топлив приводит к росту диоксида углерода в атмосфере (примерно на 0,4% в год), выбросам оксидов серы и азота, большого количества пыли.

Ежегодно в атмосферу Земли выбрасывается (в среднем на каждого человека) 4 т диоксида углерода, 30 кг диоксида серы, 50 кг пыли. Диоксид углерода поглощает инфракрасное излучение, что при определённой концентрации этого газа в атмосфере неизбежно приведёт к глобальному повышению температуры на Земле, последствия которого станут губительными для всего живого на планете.

Анализ динамики образования отходов приводит к выводу, что дальнейшее развитие производства не может осуществляться без учета экологических аспектов, связанных с накоплением отходов.

В настоящее время до 80 % потребляемых энергоресурсов наша страна импортирует из-за рубежа. В связи с непрерывно возрастающей их стоимостью разработка экономически, экологически и энергетически эффективных технологий и оборудования

(наилучших доступных технологий – НДТ) переработки отходов для замещения импортируемых в Республику Беларусь энергоресурсов, топливами из полимерных отходов, нефтяных шламов, неделовой древесины, торфа, низкосортных и бурых углей является актуальной проблемой.

Согласно оценкам, при сохранении существующих темпов развития индустриальные нагрузки на окружающую среду уже в первой половине XXI века возрастут примерно в три раза. Прогнозируя дальнейшее индустриальное развитие, следует предположить, что накопившиеся в течение целых геологических эпох природные ресурсы могут быть израсходованы за несколько десятилетий и при этом основное их количество превратится в газообразные, жидкие, твёрдые и тепловые отходы.

Поэтому на повестке дня стоит вопрос создания экологической промышленности, базирующейся, в первую очередь, на наилучших доступных технологиях переработки отходов.

В Европейском союзе в этом направлении проведена значительная работа, в результате которой определены наилучшие доступные технологии переработки отходов с учетом образования, сбора и обезвреживания отходов.

Подготовлены справочные руководства по новейшим технологиям, отвечающим требованиям НДТ, которые находятся на стадии научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ или опытно-промышленного внедрения, представлены их перспективные преимущества и существующие проблемы внедрения [2,3].

В Российской Федерации критерии определения технологии в качестве НТД установлены статьей 28.1 [1]. Согласно указанной статье Ф 3, применение наилучших доступных технологий направлено на комплексное предотвращение и (или) минимизацию негативного воздействия на окружающую среду. Сочетанием критериев достижения целей охраны окружающей среды для определения НТД являются:

- наименьший уровень негативного воздействия на окружающую среду в расчете на единицу времени или объема производимой продукции (товара), выполняемой работы, оказываемой услуги либо другие предусмотренные международными договорами Российской Федерации показатели (критерий 1);
- экономическая эффективность ее внедрения и эксплуатации (критерий 2);
- применение ресурсо- и энергосберегающих методов (критерий 3);
- период ее внедрения (критерий 4);
- промышленное внедрение этой технологии на двух и более объектах, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду (критерий 5);

Статья 28.1 ФЗ [1] также устанавливает следующее:

- порядок определения технологии в качестве НТД устанавливается Правительством Российской Федерации;
- методические рекомендации по определению технологии в качестве наилучшей доступной технологии разрабатываются уполномоченным Правительством Российской Федерации федеральным органом исполнительной власти.

В настоящее время постановлением Правительства Российской Федерации от 23 декабря 2014 г. № 1458 утверждены Правила определения технологии в качестве наилучшей доступной технологии, а также разработки, актуализации и опубликования информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям [4].

Указанные Правила устанавливают порядок определения технологии в качестве НДТ, в том числе определения технологических процессов, оборудования, технических способов, методов для конкретной области применения.

В общем случае при отнесении технологии обезвреживания отходов к НДТ соблюдается следующая последовательность действий:

Первоначально целесообразно выделить технологии, направленные на решение выделенных экологических проблем (с учетом маркерных за-

грязняющих веществ, отходов обезвреживания, выбросов, сбросов и иных видов негативного воздействия, а также потребляемых ресурсов и материалов).

Для выделенных технологий проводится оценка воздействия на различные компоненты окружающей среды и уровней потребления различных ресурсов и материалов,

Оценка, при наличии необходимой информации, затрат на внедрение технологий и содержание оборудования, возможные льготы и преимущества после внедрения технологий период внедрения.

По результатам оценки из выделенных технологий выбирается наилучшая доступная технология.

Ряд технологий переработки отходов, разработанных в Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси включены в Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям [5-8].

Разработана, изготовлена и испытана плазменная камерная печь периодического действия мощностью 50 кВт и производительностью 20 – 30 кг/ч. Печь предназначена для обезвреживания медико-биологических отходов [5].

Создана шахтная печь для термической переработки твердых бытовых отходов, промышленных и медико-биологических отходов с агрегатной нагрузкой до 200 кг/ч, в которой в качестве плазменных горелочных устройств применяются электродуговые плазмотроны постоянного и переменного тока [6].

Одним из видов крупнотоннажных отходов, которые постоянно накапливаются и представляют высокую опасность для окружающей среды, являются нефтяные отходы в виде нефтезагрязненных грунтов и нефтяных шламов, которые в основном складываются в хранилищах, представляющих собой целые “озера” ядовитых жидкостей.

Количество постоянно образующихся нефтяных отходов в среднем составляет около 2,5 % от количества ежегодно добываемой нефти. А количество накопившихся отходов в десятки раз превышает их ежегодное образование.

В рамках научно-технического сотрудничества между Институтом тепло – и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, ООО “Промышленно – транспортная корпорация” (г. Иркутск, РФ), а также ООО “НПО Инноватех” (г. Санкт-Петербург, РФ) разработан технологический процесс и оборудование для паровой термохимической конверсии широкого спектра нефтяных отходов [7,8].



Рис. 1. Нефтяные отходы

Технологический процесс основан на обработке отходов перегретым водяным паром при температурах выше $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, в результате чего протекает термохимическая конверсия (термолиз) органических составляющих отходов с образованием газообразных, твердых и жидких продуктов.

Технологический процесс реализуется в несколько стадий:

- подготовка нефтяных отходов к подаче в реактор термолиза, заключающаяся в нагреве отходов для снижения их вязкости и удалении из отходов различных крупных включений в виде камней, металла, стекол и др;

- обработка водяным паром выделенных из отходов включений, подача их в блок приемки твердых отходов, конденсация образующихся паров воды и углеводородов и подача конденсата в блок приемки жидких продуктов;

- проведение паровой термохимической конверсии отходов в реакторе путем нагрева в среде перегретого водяного пара при давлении не выше $0,1\text{ МПа}$ и температуре до $650\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- подача парогазовой смеси в теплообменник и охлаждение ее до температуры ниже $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, удаление из теплообменника образующегося конденсата в блок приемки жидких продуктов, вывод из теплообменника неконденсирующихся газов и подача их на сжигание в блок получения теплоносителя;

- вывод из реактора твердых продуктов, охлаждение их до температуры ниже $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в блоке охлаждения и приемки;

- вывод теплоносителя (продуктов сгорания) из системы обогрева реактора термолиза, подача их на очистку и сброс в атмосферу;

- вывод из блока очистки сточных вод, подача их на очистку и сброс в систему канализации.

Новая технология аппаратно оформлена в виде установки для переработки нефтесодержащих отходов, установленной на территории компании ООО «Промышленно – транспортная корпорация» (г. Ангарск, РФ) (рис. 2)

С помощью данного оборудования экспериментально в опытно-промышленных условиях обоснована технология термохимической конверсии нефтяных отходов.

Как показывают исследования, в результате паровой термохимической конверсии нефтяных отходов, например, отходов переработки нефти на НПЗ, происходит образование бензиновой фракции в количествах от 14 до 26 %, керосиновой фракции в количествах от 16 до 20 % и дизельной фракции в количествах до 40 % от исходного продукта.

При паровой термохимической конверсии нефтяных отходов, содержащих значительные количества механических примесей кроме горючих газов и жидких углеводородов образуется твердый остаток, практически не содержащий углеводородов (рис. 4).

На протяжении ряда последних лет автором данной работы создавалась термохимическая технология, основанная на свойствах органических соединений подвергаться деструкции при нагревании. В течение этого времени были найдены новые технические решения, позволяющие «нейтрализовать» агрессивную среду в реакторе путем подачи водяного пара на стадии термического разложения отходов и тем самым снизить воздействие вредных соединений и их выход в рабочую зону.

В результате была обоснована концепция «парового термолиза», т.е. использования водяного пара, как эффективного теплоносителя и инертной среды для снижения образования экологически опасных соединений и возможности получения ценных конечных продуктов, которые могут быть сертифицированы как топлива, добавки к топливам, сырьевые материалы и компоненты для получения некоторых видов продукции.

С целью определения экологических показателей технологии термохимической конверсии нефтяных и других видов отходов были выполнены экспериментальные исследования выбросов при переработке отходов.

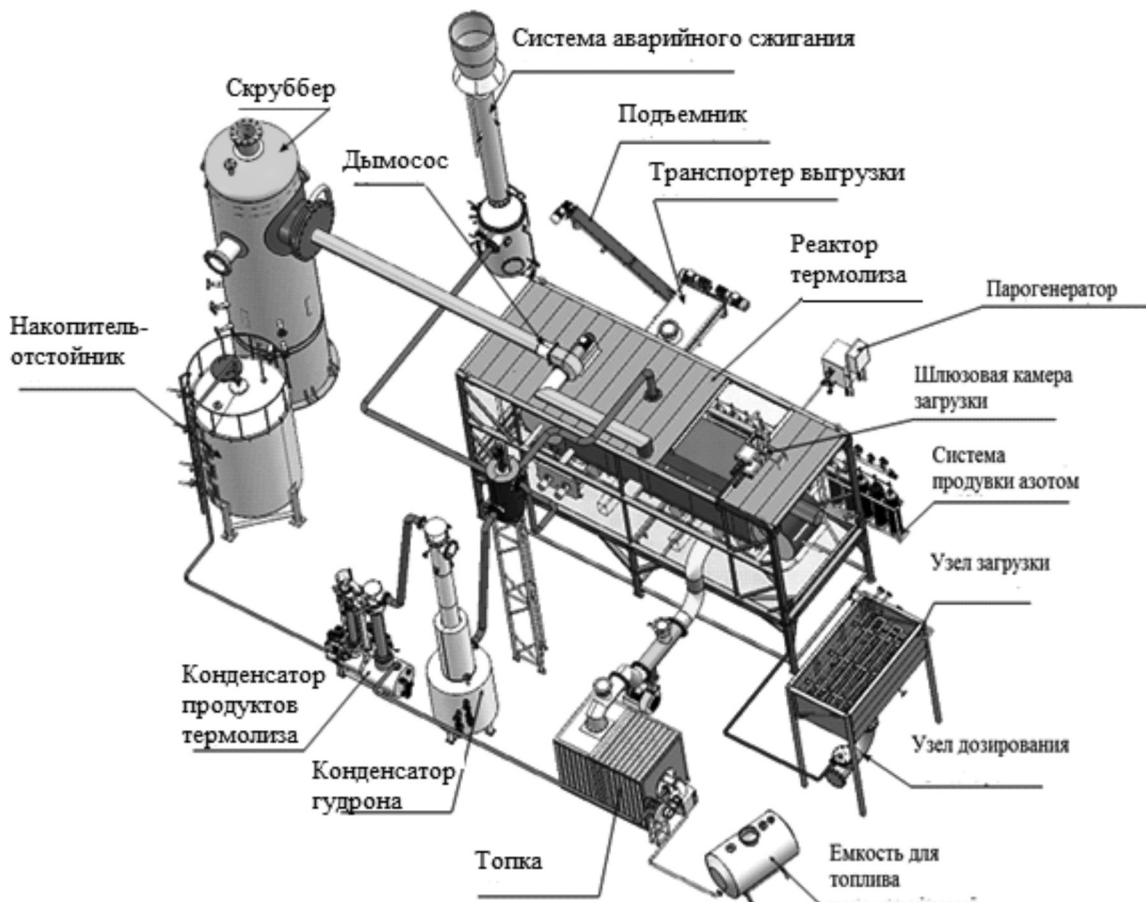


Рис. 2. Аппаратурное оформление технологии паровой термохимической конверсии нефтяных отходов



Рис. 3. Исходные отходы

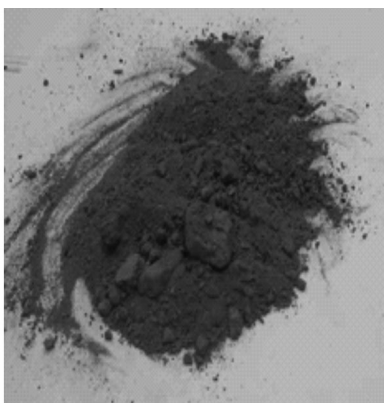


Рис. 4. Твердый остаток



Рис. 5. Жидкая фракция

Исследования проводились на территории компании “AIRBUS” (г. Тулуза, Франция), куда была доставлена мобильная установка УТПО-1 (рис. 6, обложка). Отбор проб выбросов и их исследования выполняла фирма “NORISKO” (Франция), имеющая соответствующее оборудо-

вание и необходимые международные сертификаты для проведения подобного рода исследований.

Специалисты ИТМО им. А.В. Лыкова участвовали в проведении исследований, обеспечивая работу оборудования и контроль технологи-

ческих параметров процесса термической переработки отходов.

Комплекс работ по созданию технологии и оборудования для переработки отходов методом паровой термохимической конверсии отмечен дипломом “Национальная экологическая премия за 2015 год” (Москва, 2015 г.).

Анализ экспериментальных данных показывает, что по всем исследованным показателям технологический процесс удовлетворяет требованиям охраны окружающей среды. Особенно необходимо отметить, что процесс соответствует международным нормативам по выбросам диоксинов.



Рис. 7. Диплом “Национальная экологическая премия за 2015 год”

Список использованных источников

1. Федеральный закон Российской Федерации от 10 января 2002 г. №7-ФЗ (ред. от 28.11.2015) “ Об охране окружающей среды” (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2016)
2. Европейская комиссия. Комплексное предупреждение и контроль загрязнений. Справочное руководство по наилучшим доступным технологиям. Сжигание отходов. Август 2006 г.
3. Европейская комиссия. Комплексное предупреждение и контроль загрязнений. Справочное руководство по наилучшим доступным технологиям. Обработка отходов. Август 2006 г.
4. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям “Обезвреживание отходов термическим способом (сжигание отходов) //Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Москва, 2015. – 238 с.
5. Моссэ А.Л., Горбунов А.В., Савчин В.В. Электродуговые плазменные устройства для переработки и уничтожения токсичных отходов. Материалы 4-го Международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии. Ивановский государственный технологический университет, 13- 18 мая 2005 г.
6. Моссэ А.Л. , Савчин В.В. Плазмотермическая обработка токсичных отходов. Твердые бытовые отходы. – 2006 . – 2006 . – С. 22 – 24 .
7. Журавский Г.И. , Градов А.С. , Сусеков Е.С., Шаранда Н.С. Термолизная переработка нефтяных отходов // Тепло- и массоперенос – 2012 . Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2012, с.25-28
8. Журавский Г.И., Градов А.С., Сусеков Е.С. Термохимическая технология и оборудование переработки нефтяных отходов. “Инвентаризация и восстановление загрязненных территорий”//Национальный Центр Экологического Менеджмента и Чистого Производства для нефтегазовой промышленности.- Москва, 2016, с. 25 – 61. (Коллективная монография).

ТЕПЛОФИЗИКА ПРОЦЕССОВ В МАТЕРИАЛАХ С ТЕПЛОВОЙ ПАМЯТЬЮ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В НОВОЙ ТЕХНИКЕ

И.А. Новиков, В.Л. Колпацников, А.И. Шнип

1. Введение

В настоящее время обычная теория теплопереноса Фурье [1] в твердом теле (на основе градиентного соотношения Фурье) не устраивает современную технику, особенно при ее переходе к нанотехнологиям и наноразмерным приборам. Это происходит по двум причинам.

Первая причина. Материалы, находящиеся в экстремальных условиях, а также в окрестности различных фазовых переходов проявляют свойства памяти в различных процессах переноса тепла в твердых телах [2-4]. При этом могут появляться как количественные поправки, так и качественные особенности в процессе теплопереноса.

Теория теплопереноса Фурье не описывает всего многообразия явлений переноса тепла. Так, она не может правильно описать явления переноса тепла в жидком гелии, а также в чистых кристаллах при низких температурах. Среди них: баллистический перенос тепла, режим второго звука, переходной режим, горячее фоновое пятно и т.д. В этих явлениях область нефурьевского переноса тепла составляет от 10-7с до 10-4с.

Нефурьевский перенос тепла становится особенно актуальным с учетом современного развития нанотехнологий и нано приборов, в которых перенос тепла и зарядов происходит путем баллистического переноса и режима второго звука.

Кроме того, классический перенос тепла не описывает явления теплопереноса в металлах под воздействием ультракоротких импульсов лазера, в которых нефурьевский теплоперенос оценочно занимает область 10-12с – 10-9с.

Для прикладной физики и техники весьма важен теплоперенос в сложных структурах, таких как органические жидкости, гетерогенные среды, полимеры и композиции на их основе. Наблюдения в таких материалах (переохлажден-

ные органические жидкости) показывают, что область нефурьевского теплопереноса составляет от 10-7с до 10с и больше.

Таким образом, вышеупомянутые материалы демонстрируют свои собственные динамические теплофизические свойства (или релаксационные функции теплофизических характеристик материалов – теплопроводности и теплоемкости). Игнорирование их ограничивает точность тепловых расчетов и измерений в динамических процессах.

Вторая причина. К настоящему времени в нефурьевском теплопереносе теоретически предсказаны новые физические явления, такие как многолучевая интерференция тепловых волн, усиление тепла, резонансная генерация тепловых волн и др. [3-10].

В таблице перечислены предсказанные тепловые аналоги для некоторых оптических явлений и устройств.

Эти аналогии позволяют создавать принципиально новые тепловые приборы и устройства, которые не могут существовать в рамках обычного Фурьевского теплопереноса. Именно это и является второй причиной для развития материалов с тепловой памятью.

2. Перенос тепла в твердом теле в материалах с тепловой памятью

Классический перенос тепла в твердом теле [1] в обычных материалах (без памяти) основан на линейном градиентном соотношении Фурье для q – плотности теплового потока (Вт/м²)

$$q = -\lambda_0 \nabla T, \quad (1)$$

и определяющим соотношением между объемной плотностью внутренней энергии e (Дж/м³), удельной объемной теплоемкостью c_0 и плотностью материала ρ (кг/м³):

$$e = e_0 + \rho \times c_0 (T - T_0). \quad (2)$$

Оптические волновые явления			Тепловые аналоги	
№	Тип оптического явления	Автор/год	Описание явления для тепловых волн [3 – 10]	Автор / год
1	Законы отражения / преломления на границе сред	Снелиус, Френель, 19 век	Прохождение/отражение ТВ на границе двух материалов с тепловой памятью	Новиков, ИФЖ, 1988.
2	Многолучевая интерференция в оптике	Френель 19 век	Многолучевая интерференция графо-нических ТВ	Новиков, ЯР 1997, ИФЖ 1988
3	Усиливающая оптическая среда	Эйнштейн, 1918	Усиливающая тепловая среда	Новиков ЖТФ 1987
4	Оптический квантовый генератор	Таунс, Басов 1956	Тепловой резонансный генератор	Новиков ЖТФ 1994
5	Усилитель электромагнитных монохроматических волн	Эйнштейн 1918	Усиление тепловых сигналов	Новиков ЖТФ 1987 ИФЖ 1992

Здесь e_0, T_0 – начальные значения внутренней энергии и температуры, ∇T – градиент температуры, λ_0 – равновесный коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)). Материал в этих соотношениях характеризуется «равновесными» теплофизическими характеристиками (ТФХ) – теплопроводностью и объемной теплоемкостью. Соотношения (1), (2) – локальные во времени соотношения, без всяких эффектов памяти. В более сложных моделях ТФХ могут зависеть от температуры, что приводит к нелинейному уравнению теплопроводности.

Кроме соотношений (1), (2) в общую схему теплопереноса в твердом теле входит уравнение баланса внутренней энергии (первое начало термодинамики):

$$\partial e / \partial t = - \operatorname{div} q + \sigma_v \quad (3)$$

Здесь σ_v – производство объемной плотности источников внутренней энергии в секунду (Вт/с·м³). Система (1)–(3) определяет классический перенос тепла. Равновесные ТФХ материала λ_0, c_0 определяют материал, который будем называть в дальнейшем, обычным материалом Фурье (без памяти).

Уравнение (3) и соотношения (1)–(2) приводят к линейному уравнению теплопроводности

$$\partial T / \partial t = a_0 \Delta T + \sigma_v / (\rho \cdot c_0). \quad (4)$$

Здесь $a_0 = \lambda_0 / (\rho \cdot c_0)$ – коэффициент теплопроводности (м²/с).

Перенос тепла на основе соотношений (1)–(3), или уравнения (4), обладает свойством бесконечной скорости распространения тепловых возмущений, то есть, принципом дальнего действия. При этом возникает ряд парадоксов, не имеющих физического смысла. Среди них:

- Бесконечная скорость распространения изотерм,
- Бесконечная плотность теплового потока на границе тела в начальный момент времени при скачке температуры на ней,
- Некорректность решений обратных граничных задач теплопроводности.

Для полной формулировки задачи переноса тепла уравнения (4) дополняется соответствующими условиями однозначности.

Фурьевский перенос тепла – эта практическая основа всех инженерных расчетов не очень быстрых тепловых процессов.

Перенос тепла в материалах с тепловой памятью (МТП). Материалы с тепловой памятью учитывают одновременно равновесные и динамические теплофизические характеристики материала: – теплопроводность и объемную удельную теплоемкость. В качестве динамических теплофизических характеристик используются релаксационные функции (РФ) $\lambda(t)$ и $c(t)$ как функции времени, или как частотно зависящие коэффициенты переноса.

В общую схему теории обобщенного теплопереноса в твердом теле входят два интегральных соотношения для плотности теплового потока q и объемной плотности внутренней энергии e [2-5]:

$$q = -\lambda_0 [\lambda(0) \nabla T(x, t) + \int_0^t \lambda^{(1)}(\xi) \nabla T(x, t-\xi) d\xi]; \quad (5)$$

$$e - e_0 = c_0 [c(0) T(x, t) + \int_0^t c^{(1)}(\xi) T(x, t-\xi) d\xi]. \quad (6)$$

Дополнительно к ним в общую схему теплопереноса в твердом теле входит уравнение баланса внутренней энергии (3). В (5)–(6) T – температура; λ_0, a_0, c_0 – соответствующие равновесные тепло-

физические коэффициенты (теплопроводности, температуропроводности, удельной объемной теплоемкости); $\lambda(t)$, $c(t)$ – соответствующие РФ. Эти РФ нормированы на единицу, то есть, $\lambda(\infty) = c(\infty) = 1$. Следует отметить, что физическая система считается невозмущенной до определенного момента времени, поэтому интегрирование в соотношениях (5), (6) проводится от нуля до t .

Соотношения (3), (5), (6) приводят к интегродифференциальному уравнению теплопроводности для температуры

$$c_0 [c(0) \partial T(x,t) / \partial t + \int_0^t c^{(1)}(\xi) \partial T(x,t-\xi) / \partial t d\xi] = \\ = \lambda_0 [\lambda(0) \Delta T(x,t) + \int_0^t \lambda^{(1)}(\xi) \Delta T(x,t-\xi) d\xi] + \sigma_{\nu} \quad (7)$$

Равновесные коэффициенты λ_0 , c_0 могут зависеть от температуры, что приводит к нелинейной модели тепловой среды с памятью [11, 12].

Если РФ заданы в виде функции Хевисайда $H(t)$ (равна нулю при $t < 0$, и единице при $t \geq 0$):

$$\lambda(t) = c(t) = H(t), \quad (8)$$

то они описывают классическое уравнение теплопроводности Фурье (обычный материал без памяти).

Кроме соотношений (5)–(6) (или уравнения (7)) в полную модель переноса тепла в МТП входят условия однозначности, которые состоят из начального условия для температуры (а для сред типа Максвелла необходимо добавить еще условие [3] $\partial T / \partial t = 0$), и соответствующих краевых условий.

Теория в МТП находится в промежуточном положении между полным описанием системы (с помощью функций распределения) и сокращенным термодинамическим описанием системы, так как имеет дополнительные произвольные параметры (набор времен релаксации в релаксационной функции памяти), Это дает возможность применять ее для описания некоторых быстрых мезоскопических явлений переноса тепла, таких как баллистический режим переноса тепла в диэлектриках и др.

3. Классификация и примеры МТП

РФ, участвующие в соотношениях (5) (6), не могут быть полностью произвольными. Они должны удовлетворять термодинамическим требованиям (второму началу термодинамики). В работах [11, 12] показано, что если РФ будут непрерывными и монотонными, то они наверняка удовлетворяют второму началу термодинамики (в форме неравенства Клаузиуса – Дюгема). Эти

простые условия обеспечивают применимость РФ для МТП. В работе [3] все материалы с тепловой памятью разделены на материалы типа Фурье и типа Максвелла.

Материалы типа Фурье соответствуют следующим соотношениям для мгновенных значений РФ

$$\lambda(0) > 0, c(0) > 0. \quad (9)$$

Они имеют бесконечную скорость распространения тепловых возмущений. Частный случай материалов типа Фурье с РФ, соответствующим (8), соответствует линейному классическому уравнению теплопроводности (обычный материал без памяти – стандартная среда Фурье по терминологии [3]). Основные качественные особенности однотипных задач переноса тепла в материалах типа Фурье и в материалах без памяти – совпадают.

Для инженерных приложений теплоперенос в средах типа Фурье может быть важен для полимеров и композитных материалов на их основе, для дисперсных материалов, а также для материалов вблизи различных фазовых переходов (перехолажденные органические жидкости, сегнетокерамика и др.).

Конкретный пример сред типа Фурье – это РФ, описывающие теплоперенос в дисперсных материалах. Это система с динамической теплоемкостью, которую в первом приближении можно описать как [13]:

$$c(t) = 1 - [1 - c(0)] 6/\pi^2 \exp(-t/\tau); \tau = R^2 / a_0 \pi^2. \quad (10)$$

Здесь R – это радиус однородных включений, а a_0 – равновесный коэффициент температуропроводности дисперсного материала.

Основные параметры РФ находятся в пределах $c(0) \div 0.1-1.0$; $\tau \sim 10^{-7} - 10^{-3}$ с.

Материалы типа Максвелла соответствуют следующим соотношениям для мгновенных значений РФ [3,12]:

$$\lambda(0) = 0, \lambda^{(1)}(0) > 0, c(0) > 0. \quad (11)$$

Основные качественные особенности однотипных задач теплопереноса для материалов типа Максвелла, и для гиперболического уравнения. Оно соответствует РФ вида

$$\lambda(t) = 1 - \exp(-t/\tau_0), c(t) = H(t). \quad (12)$$

Этот МТП назван в [3] стандартной средой Максвелла.

Основные свойства переноса тепла в материалах типа Максвелла и для гиперболического уравнения (стандартной среде Максвелла) – совпадают. В том числе, во всех материалах типа Максвелла распространение теплового возмуще-

ния происходит с конечной скоростью.

В [1] описаны конкретные примеры переноса тепла при низких температурах в материалах – диэлектриках и чистых кристаллах (в режимах второго звука и в баллистическом режиме), а в [11] эти материалы типа Максвелла описаны соответствующими РФ. Применение МТП позволяет единообразно описать процесс распространения тепла в чистых кристаллах при низких температурах. Предсказываемые в теплопереносе МТП основные особенности распространения теплового возмущения (неискаженной волновой части решения и искаженного диффузного следа) согласуются с экспериментально наблюдаемыми особенностями. В режимах БР и ВЗ, где время релаксации τ составляет порядка $10^{-7} - 10^{-5}$ с, искаженная часть решения может распространяться на значительное расстояние $\sim 10^{-3} - 10^{-2}$ м, что согласуется с экспериментальными данными.

Для инженерных приложений теплоперенос в материалах типа Максвелла важен для быстрых мезоскопических явлений, и различных наноструктур и наноприборов, в которых реализуется баллистический перенос тепла.

4. Основные свойства переноса тепла в материалах с памятью

Особенности переноса тепла в материалах с тепловой памятью определяются двумя факторами: свойствами самой тепловой среды с памятью и временными характеристиками тепловых режимов нагружения (под ними понимаются дополнительные условия однозначности решения – начальные и краевые).

Для класса режимов теплового нагружения, выходящих на стационарный режим (или характерное время изменения которых больше $\tau_{рф}$ – характерного времени релаксации РФ), при больших временах (или альтернативно, при низких частотах) процесс теплопереноса в любом материале с затухающей памятью асимптотически стремится к однотипному процессу переноса тепла в обычной материале Фурье.

При малых временах ($t \leq (5-10) \tau_{рф}$ – характерного времени релаксации РФ), при), или, альтернативно, при высоких частотах ($f \geq (0.1-0.2) / \tau_{рф}$) – характерного времени релаксации РФ), при) особенности распространения тепла определяются типом материала с памятью (Фурье или Максвелла) и характеристиками режима нагружения в области малых времен (существование разрыва для заданных краевых функций в начальный момент времени, и скорость изменения функции во времени).

В тепловых материалах типа Фурье в области малых времен (высоких частот) проявляется искаженный диффузионный след, который количественно совпадает с диффузионным следом однотипной тепловой задачи для обычного материала Фурье с равновесными эффективными ТФХ вида: $c_{эф} = c_0 c(0)$, $\lambda_{эф} = \lambda_0 \lambda(0)$. Качественные особенности этих решений – те же, что и для обычного материала Фурье. При больших временах это решение постепенно переходит в решение однотипной задачи для обычного материала Фурье с равновесными ТФХ.

В тепловых материалах типа Максвелла в области малых времен (высоких частот) заметным образом проявляются волновые свойства при распространении тепла (ударная затухающая тепловая волна при скачке температуры на границе, искаженный след недиффузного типа, отражение и интерференция волн, резонансные явления на высоких частотах при некоторых условиях и т.д.).

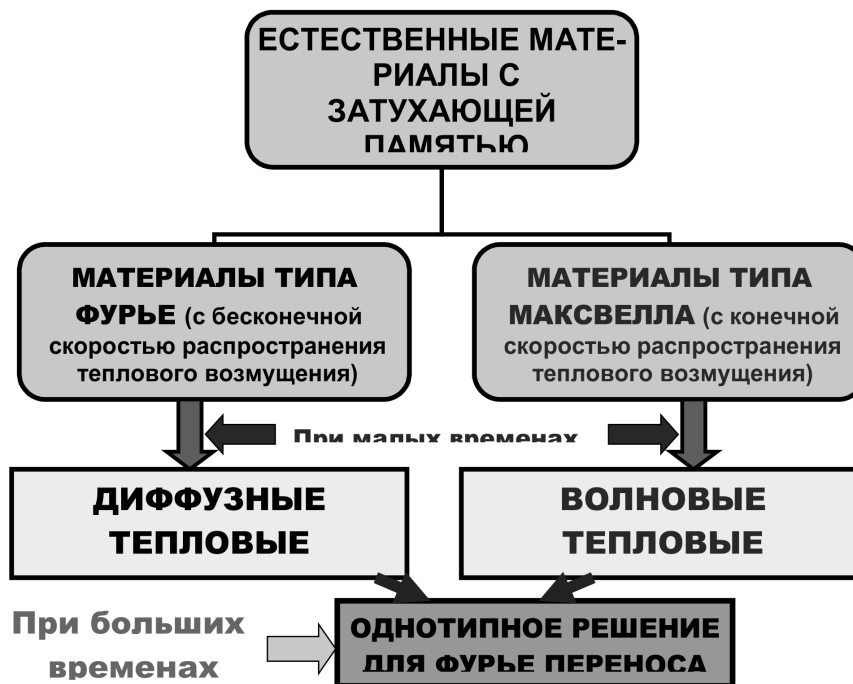
Таким закономерностям подчиняются и описанные в работе процессы переноса тепла в баллистическом режиме и режиме второго звука в жидком гелии и чистых кристаллах при низких температурах.

Эффекты быстрозатухающей памяти проявляются в физических явлениях, описанных выше. Быстрое затухание эффектов памяти происходит в материалах, встречающихся в природе и технике.

Таким образом, процесс переноса тепла в материале с тепловой памятью и без нее может отличаться только в области малых времен, как показано ниже на диаграмме. При этом параметры РФ оказывают большое значение на поведение решений теплопереноса в МТП при малых временах.

В работах [4 – 8] установлены свойства гармонических тепловых волн (ТВ) при их распространении в МТП, а также при отражении ТВ на границе двух материалов с тепловой памятью. Показано, что затухание ТВ при их распространении существенно зависит от свойств памяти материалов. При этом затухание ТВ может быть как больше, так и меньше, чем при обычном теплопереносе по Фурье.

Грубо говоря, чем «больше» память материала, тем меньше затухание ТВ при их распространении. В [4, 6] показано, что в ограниченном стержне из МТП появляются стоячие волны (как и в оптике). При этом амплитуда стоячих волн возрастает при «увеличении» памяти материала. То есть, в принципе, в МТП с «большой» памятью возможны резонансные явления, что принципиально невозможно при обычном теплопереносе Фурье (без памяти).



Выводы.

Естественные материалы с тепловой памятью (МТП) проявляют широкий спектр свойств – от диффузионного решения до чисто волнового решения.

Естественные материалы с памятью обладают сильным затуханием эффектов памяти, в том числе, волновых свойств.

Эффективному применению МТП для реализации новых «волновых» тепловых приборов мешает сильное затухание волновых эффектов в теплопередаче (в отличие от оптики, где волновые эффекты слабо затухают). Поэтому необходимо преодолеть этот недостаток естественных МТП.

5. Активные материалы с тепловой памятью

Чтобы эффективно использовать эффекты тепловой памяти материалов, в том числе, и волновые явления, необходимо увеличить память материала, что реализуется в активных материалах с тепловой памятью. Под последними понимаются такие МТП, в которых существует объемный распределенный источник внутренней энергии, пропорциональный температуре, или производной от температуры по времени.

Математически это означает, что в уравнении баланса (3) мы имеем распределенный источник внутренней энергии вида:

$$\begin{aligned} \partial e / \partial t &= - \operatorname{div} q + \sigma_V, \\ \sigma_V &= \sigma_0 + \sigma_1 (T - T_0) + \gamma_1 \partial T / \partial t. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь T – температура в каждой точке тела, T_0 – некоторое выделенное значение температуры, $\sigma_0, \sigma_1, \gamma_1$ – параметры (неотрицательные) источника энергии, зависящие от равновесных и динамических ТФХ. При этом возможны два случая: $\sigma_0 \geq 0, \sigma_1 > 0, \gamma_1 = 0$, и $\sigma_0 = \sigma_1 = 0, \gamma_1 > 0$.

В работах [7 – 9] показано, что при некоторых условиях, использование таких источников энергии приводит к увеличению волновых эффектов, и даже, к усилению ТВ в процессе их распространения. Кроме того, показано, что в ограниченном стержне из МТП с таким источником могут возникать стоячие волны определенных частот, аналогично стоячим волнам (модам) в оптическом лазере. Как результат – такие активные МТП можно использовать для конструирования принципиально новых волновых тепловых приборов и устройств различного назначения.

Возникает вопрос – как практически реализовать такие объемные источники энергии?

Для реализации активных материалов с тепловой памятью можно использовать различные механизмы накачки энергии в среду, применяя внешние физические поля, такие как постоянное или переменное электрическое поле, электрический ток, магнитное поле и др. Для создания активных тепловых материалов с памятью перспективными являются следующие материалы: полупроводники, сегнетокерамика, халькогенидные стекла, некоторые органические жидкости и полимеры.

Приведем два примера таких механизмов накачки энергии:

- джоулев нагрев в полупроводниках за счет прохождения постоянного электрического тока,
- процессы деполяризации в диэлектриках (сегнетокерамики) с выделением энергии при наложении постоянного электрического поля.

Активный МТП выбирается таким образом, чтобы его физические характеристики (равновесные и динамические), реагирующие на приложенное внешнее поле, имели сильную зависимость от температуры.

Так, если применяется механизм джоулева нагрева (что соответствует в (13) случаю $\sigma_0 \geq 0$, $\sigma_1 = \sigma_0(T_0) d \ln \sigma_3 / d T > 0$, $\gamma_1 = 0$) [7–9], то используется зависимость электропроводности σ_3 материала от температуры. Компенсация сильного затухания волновой части решения возможна, если коэффициент σ_1 будет достаточно большим. Такими свойствами обладают некоторые полупроводники, в которых вблизи фазового перехода диэлектрик-металл производная $d \ln \sigma_3 / d T$ может составлять величину 5–20 и более [14]. Это возможно, например, в $MnTe_2$ вблизи точки Нееля [14]. Полупроводниковые материалы такого типа являются весьма перспективными для реализации активных МТП.

Такие материалы можно использовать для усиления и генерации ТВ. Кроме этого, такие активные МТП можно использовать для реализации переключаемых теплозащитных/теплопропускающих покрытий, управляемых посредством внешних воздействий (температура, электрическое поле и др.). Такие покрытия, например, можно эффективно использовать в устройствах автоматического управления в различных областях техники.

Если активный МТП основан на выделении энергии при деполяризации диэлектрика (сегнетокерамики), находящегося в постоянном электрическом поле, то это соответствует в (13) случаю: $\sigma_0 = \sigma_1 = 0$, $\gamma_1 > 0$. При этом используется зависимость диэлектрической проницаемости $\varepsilon(T)$ от температуры. Выделение энергии при деполяризации соответствует области температуры выше точки Кюри, когда сегнетокерамика находится в параэлектрической фазе [15]. Одним из интересных свойств сегнетокерамики – это переход вблизи точки Кюри из сегнетоэлектрической в параэлектрическую фазу. При этом происходит резкое изменение диэлектрической проницаемости, теплоемкости и некоторых других физических свойств. Вблизи этого фазового

перехода усиливаются кооперативные явления в веществе, что приводит к увеличению эффектов памяти в диэлектрической проницаемости и теплоемкости. Поэтому сегнетокерамика вблизи точки Кюри представляет собой МТП с динамической теплоемкостью. При этом равновесная теплопроводность слабо зависит от температуры, а равновесная теплоемкость имеет резкий максимум вблизи температуры Кюри. Поведение динамических диэлектрической проницаемости и теплоемкости зависит от внешнего электрического поля, давления и других факторов.

Перспективными материалами для реализации активных МТП являются различные типы сегнетокерамики, например, титанат бария. Он имеет фазовый переход сегнетоэлектрик-параэлектрик вблизи температуры Кюри (120 °С). При этом его равновесная теплопроводность слабо зависит от температуры, а равновесная теплоемкость имеет резкий максимум вблизи температуры Кюри. Поведение диэлектрической проницаемости и теплоемкости зависит от температуры и внешнего электрического поля, как показано на рисунках ниже.

Динамическую теплоемкость титаната бария можно описать РФ вида:

$$c(t) = 1 - [1 - c(0)] \exp(-t / \tau);$$

$$c(0) \approx 0,5; \tau = B / |T - T_C|^{1/2}. \quad (14)$$

Время релаксации τ вблизи точки Кюри может изменяться в пределах 0,1 – 50 с и более.

Оценка показывает, что для титаната бария в окрестности точки Кюри (выше 120 °С) коэффициент γ_1 может достигать значений

$$\gamma_1 = (0,5 - 2,5) 10^3 E^2, \quad (15)$$

где напряженность электрического поля в Кв/см.

При разумных значениях напряженности электрического поля можно усиливать гармонические ТВ вплоть до частот

$$\omega_{KP} \approx (0,3 - 0,8) \text{ рад/с}. \quad (16)$$

Таким образом, существуют реальные сегнетокерамики, которые можно использовать для реализации теплового усилителя и резонансного генератора тепла.

Активные МТП можно использовать не только для усиления ТВ, но и для противоположных целей – термостабилизации, реализации минитермостатов, и родственных научно-технических задач. Для реализации этих задач тоже можно использовать некоторые сегнетокерамики, но не в параэлектрической, а в сегнетоэлектрической фазе (ниже температуры Кюри).

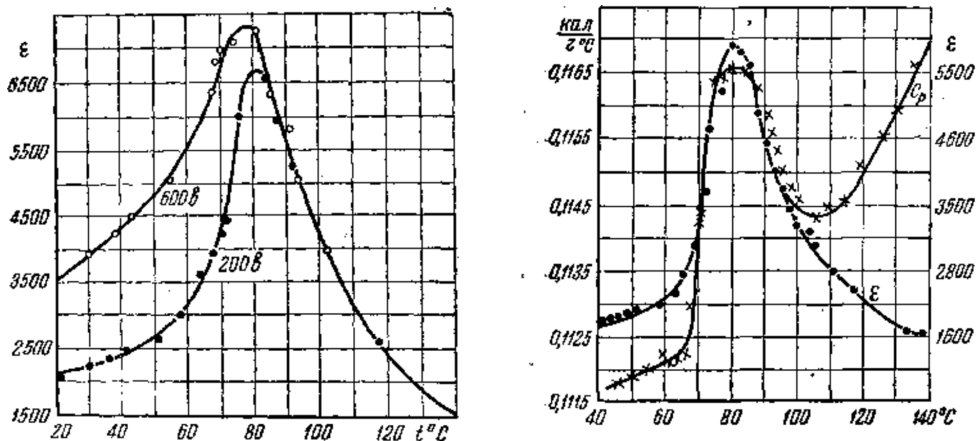


Рис.1. Зависимость теплоемкости и диэлектрической проницаемости от температуры и электрического поля для титаната бария

6. Заключение

В настоящее время мы находимся в начале экспериментального изучения и использования активных МТП для совершенно разнообразных применений в науке и технике, которые невозможно предсказать сейчас. В настоящее время можно указать только несколько возможных применений МТП.

Усилители ТВ. Их можно применять: для усиления тепловых импульсов, для повышения чувствительности сенсоров температуры, в том числе, для тепловидения (повышение чувствительности приемников ИК излучения).

Активные МТП можно применять для реализации резонансного теплового генератора (теплового аналога лазера) в качестве генератора мощных тепловых импульсов. Его можно использовать для подавления тепловизионных при-

боров обнаружения. Кроме того, можно создавать управляемые динамические тепловые образы объектов для разных целей.

Кроме того, активные МТП можно применять и для целей термостабилизации. Также, МТП можно использовать для переключающихся управляемых теплозащитных/телопропускающих покрытий.

Кроме того, возможно использование активных МТП для новых видов измерений в теплофизике (например, спектроанализатор тепловых сигналов – аналогично спектральному анализу в оптике) и др..

В принципе, развитие активных МТП может привести в теплофизике к революции, подобной тому, как это произошло в оптике после изобретения и реализации лазера.

Список использованных источников

1. Лыков А.В. Теплообмен. Справочник. – М.: Энергия, 1978, 536 с.
2. Joseph D.D., Heat Waves, // Phys. Rev. Modern. 61 (1), 1989, pp.41-73.
3. Новиков И.А. Два типа переноса тепла в средах с тепловой памятью. // ИФЖ, 44, №4, 1983, сс. 664 - 672.
4. Novikov I.A., Harmonic Thermal Waves in Materials With Thermo Memory, J. Appl. Phys., 81, pp. 1067–1072, 1997.
5. Новиков И.А., Эволюция теплового возмущения в средах с памятью. // ИФЖ, 46, № 6, 1984, сс. 1002–1007.
6. Новиков И.А., Электротепловая аналогия в наследственных средах и ее применение. // ИФЖ, 55, № 4, 1988, сс. 643 – 650.
7. Новиков И.А., О наследственной усиливающей тепловой среде. // ЖТФ, 57, № 6, 1987, сс. 1061 – 1064.
8. Новиков И.А., Тепловой аналог лазера. // ЖТФ, 64, № 4, 1994, сс. 1 – 8.
9. Новиков И.А., Интерференция тепловых волн в средах с тепловой памятью. // ЖТФ, 65, № 1, 1995, сс. 3 – 11.
10. Новиков И.А., Резонансная генерация гармонических тепловых волн в средах с памятью. // ИФЖ, 62, № 3, 1992, сс. 491 – 497.
11. Новиков И.А., Колпащиков В.Л., Шнип А.И., Экспериментальные обоснования нефурьевского теплопереноса. // Mat. Meжд. Конф. «Реофизика и Теплофизика неравновесных систем», Минск, АН БССР, 1991, сс. 58 – 62.
12. Новиков И.А., Линейная термодинамика в средах с памятью. // ИФЖ, 52, № 5, 1987, сс. 958 – 959.
13. Новиков И.А., Определение динамических тепловых свойств среды. // Ж. Измерит. Техн., 37, № 8, 1994, сс. 40 – 44.
14. Нагаев Э.Л., Физика магнитных полупроводников. М.: Наука, 1979. 432 с..
15. Лайнс М., Глас А.. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. М.: Мир. 1981. 736 с..

УДК 622.692.4.07 + 662.692.2 + 621.6.028

ОБ УСТАНОВЛЕНИИ МИНИМАЛЬНЫХ БЕЗОПАСНЫХ РАССТОЯНИЙ ДО МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

В.Г. Калиниченко Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси.

Нормативные минимальные безопасные расстояния (МБР) от оси магистральных газопроводов (МГ) до населенных пунктов, зданий и сооружений в зависимости от их диаметра, уязвимости, значимости и достаточности обеспечения безопасности данных объектов задаются нормами проектирования СНиП 2.05.06-85 и СП 36.13330.2012. Эти нормы установлены в результате многолетнего опыта происшедших аварий на МГ и частично на основании моделирования их последствий. В таблице 1 приведен фрагмент из таблицы 4 [1, 2] для зон МБР.

Согласно примечания 4 к таблице 4 [1, 2], при соответствующем обосновании допускается сокращать указанные расстояния от МГ не более, чем на 30 % при условии отнесения участков трубопроводов ко II категории со 100 %-ным рентгеноконтролем монтажных сварных соединений

и не более, чем на 50 % для поз. 1, 2, а для поз. 3 не более, чем на 30 % – при отнесении их к категории В.

Можно пояснить конструктивные отличия категорий участков на примере МГ с $D_n = 1,22$ м и $p = 5,4$ МПа. Рассматриваем классы прочности труб по ГОСТ 20295-85: К 55 с $R_1^H \equiv \sigma_B^H = 539$ МПа и $R_2^H \equiv \sigma_T^H = 372$ МПа; К 56 с $R_1^H \equiv \sigma_B^H = 550$ МПа и $R_2^H \equiv \sigma_T^H = 382$ МПа. По СНиП 2.05.06-85: категория качества труб и соответствующий ей коэффициент надежности по материалу $k_1 = 1,34$; коэффициент надежности по назначению трубопровода $k_n = 1,05$; коэффициент надежности по нагрузке $n = 1,1$; коэффициенты условий работы при расчете на прочность для участков: категории В – $m = 0,6$; категории I-II – $m = 0,75$; категории III-IV – $m = 0,9$.

Таблица 1

Объекты, здания и сооружения	Минимальные расстояния от оси МГ, м условным диаметром, мм				
	св. 300 до 600	св. 600 до 800	св. 800 до 1000	св. 1000 до 1200	св. 1200 до 1400
1. Города и другие населенные пункты; коллективные сады с садовыми домиками, дачные поселки; отдельные промышленные и сельскохозяйственные предприятия; гаражи и стоянки на 20 и более автомобилей; отдельно стоящие здания с массовым скоплением людей; жилые здания 3-этажные и выше; железнодорожные станции, аэропорты.	150	200	250	300	350
2. Железные дороги общей сети и автодороги I-III категорий; отдельно стоящие: жилые здания 1-2-этажные; садовые домики, дачи; дома линейных обходчиков; с/х фермы и проч.	125	150	200	225	250
3. Отдельно стоящие нежилые и подсобные строения; гаражи и открытые стоянки на 20 автомобилей и менее; железные дороги промышленных предприятий; автомобильные дороги III-п, IV, IV-п и V категорий.	50	100	150	175	200

Используя известные выражения для расчетного сопротивления растяжению (сжатию) R_1 , расчетной толщины стенки δ , коэффициента запаса прочности k , действующего окружного напряжения σ

$$R_1 = \frac{R_1^H \cdot m}{k_1 \cdot k_H}; \quad \delta = \frac{n \cdot p \cdot D_H}{2 \cdot (R_1 + n \cdot p)}$$

$$k = \frac{k_1 \cdot n \cdot k_H}{m}; \quad \sigma = \frac{p \cdot (D_H - \delta)}{2 \cdot \delta}$$

получим следующие их значения для участков категорий

V ($m = 0,6$): $R_1 = 229,8 \div 234,5$ МПа;
 $\delta = 0,015$ м; $k_B = 2,58$; $\sigma / \sigma_T^H = 0,58 \div 0,57$;

I-II ($m = 0,75$): $R_1 = 287,3 \div 293,2$ МПа;
 $\delta = 0,012$ м; $k_{I-II} = 2,06$; $\sigma / \sigma_T^H = 0,73 \div 0,71$;

III-IV ($m = 0,9$): $R_1 = 344,8 \div 351,8$ МПа;
 $\delta = 0,010$ м; $k_{III-IV} = 1,72$; $\sigma / \sigma_T^H = 0,88 \div 0,85$.

При этом $k_B / k_{I-II} = 1,25$; $k_B / k_{III-IV} = 1,5$. То есть, уменьшение МБР до участков МГ возможно за счет увеличения для них коэффициента запаса прочности (повышения надежности).

В развитие и уточнение норм и правил проектирования МГ в работах [3, 4, 5] на основе нормативно-вероятностного подхода установлено, что коэффициент условий работы трубопровода является не постоянной величиной, как в СНиП 2.05.06-85, а переменной в зависимости от запаса работоспособности, дефектности металла и вариации нагрузки. Возможное сочетание численных значений коэффициентов k_1 , m в зависимости от допустимой частоты отказов q участков различных категорий приведено в таблице 2. При этом вероятность безотказной работы трубопровода $P = 1 - Q$, $Q = q \times t$, где Q – вероятность отказа, t – расчетный срок эксплуатации в годах.

Таблица 2 [3, 4, 5]

Коэффициент надежности по материалу, k_1			
1,34	1,40	1,47	1,55
Коэффициент условий работы, m [категория V, частота отказов $q = 10^{-8}$ год $^{-1}$ (невероятное событие)]			
0,60	0,55	0,46	0,40
Коэффициент условий работы, m [категории I, II, частота отказов $q = 10^{-5}$ год $^{-1}$ (неправдоподобное событие)]			
0,75	0,72	0,65	0,60
Коэффициент условий работы, m [категории III, IV, частота отказов $q = 10^{-3}$ год $^{-1}$ (маловероятное событие)]			
0,90	0,87	0,83	0,80

Инженерные методики для расчета зон поражения при авариях МГ описаны в СТО Газпром 2-2.3-351-2009 [6]. Основными поражающими факторами аварий на МГ являются:

- 1) воздушная волна сжатия (ВВС) при разрыве МГ;
- 2) разлет фрагментов трубопровода и грунта;
- 3) зоны загазованности;
- 3) тепловое излучение низкоскоростного вертикального или наклонного шлейфа («колонны») газа или горячей высокоскоростной струи газа.

Были выполнены расчеты по методике Приложения Ж.3 [6] избыточного давления ΔP_ϕ фронта ВВС на удалении от места разрыва МГ различных диаметров, результаты которых приведены на рис. 1. Ориентировочно разрушение до 5% остекления зданий происходит при $\Delta P_\phi = 1 \div 2$ кПа, разрушение остекления на 90% – при $\Delta P_\phi = 5 \div 10$ кПа. Легкие поражения людей наступают при $\Delta P_\phi = 20 \div 40$ кПа, тяжелые поражения – при $\Delta P_\phi = 60 \div 100$ кПа. Полностью разрушаются деревянные строения – при $\Delta P_\phi = 20 \div 30$ кПа, кирпичные – при $\Delta P_\phi = 35 \div 45$ кПа.

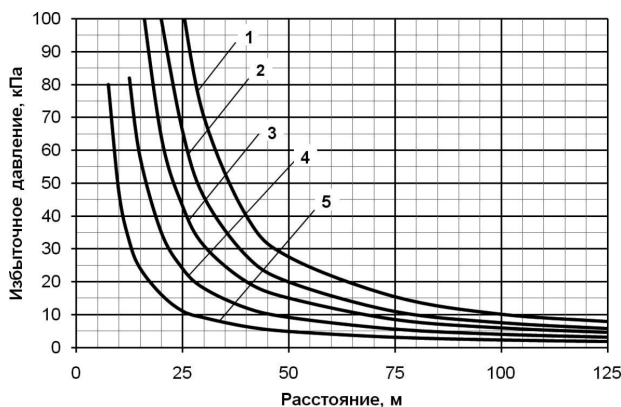


Рис. 1. Изменение избыточного давления ВВС от места аварии:
 1 – Ду 1400 мм; 2 – Ду 1200 мм; 3 – Ду 1000 мм;
 4 – Ду 700 мм, 5 – Ду 500 мм

Также проводились контрольные расчеты в Mathcad по методике Приложения Ж.1 [6] для дальности метания фрагментов МГ и грунта при его разрыве. Полученные результаты значительно отличались в большую сторону от приведенных в этом документе, что возможно вызвано опечаткой в системе дифференциальных уравнений баллистики разлета осколков. Кроме того, рассчитанные траектории полета осколков с учетом сопротивления воздуха представляли симметричные параболы относительно максимальной высоты, а в реальности нисходящая ветвь траектории должна быть более крутой.

Согласно статистическим данным, приведенным в [6], разрушения газопроводов сопровождались в большинстве случаев образованием относительно небольшого числа фрагментов труб (в пределах от 1 до 15 единиц). Из 271 аварии с разлетом осколков (за период 1991–2000 гг.) в 59 % случаев дальность разлета составила до 50 м, в 13 % – от 51 до 100 м, в 12 % – от 101 до 150 м, в 8 % – от 151 до 200 м, в 6 % – от 201 до 300 м. Среднее значение и максимальная дальность разлета осколков трубы зависят от характера разрушения оболочки трубы – вязкого или хрупкого, таблица 2 [7]. При авариях на газопроводах, построенных с использованием высоковязких сталей, часто происходит не разрыв на куски, а верхняя развальцовка труб с образованием двух-трех фрагментов трубопровода как с выбросом их из траншеи, так, зачастую, и без выброса фрагментов из траншеи.

Таблица 3 [7]

Вид разрушения трубы	Количество аварий	Средний радиус разлета, м	Максимальное удаление, м
Вязкое разрушение	6	106,5	180
Хрупкое разрушение	33	171	400 (700)
Нет данных	40	99,5	400

На рис. 2 приведены результаты расчетов дальности разлета фрагментов при разрыве МГ, выполненных по эмпирической формуле из [8] и диссертации Маянц Ю. А. для максимального радиуса разлета осколков при разрыве пневматически испытываемого трубопровода. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с выше приведенными статистическими данными.

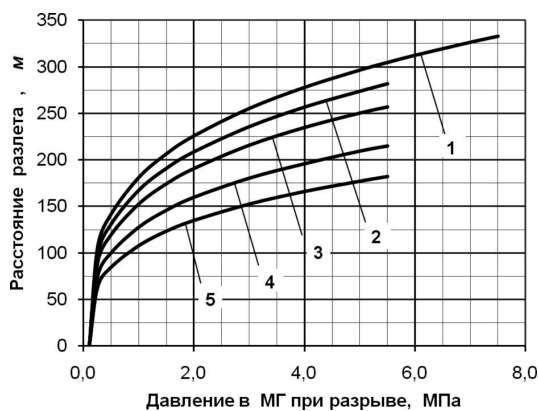


Рис. 2. Максимальная дальность разлета фрагментов при разрыве МГ:
1 - Ду 1400 мм, 2 - Ду 1200 мм, 3 - Ду 1000 мм, 4 - Ду 700 мм, 5 - Ду 500 мм

В силу небольшого количества образующихся осколков и большой площади круга их рассеивания вероятность поражения осколками отдельно стоящих людей является маловероятным событием.

Наиболее значимым поражающим фактором при авариях, связанным с разрывом газопровода, является воспламенение истекающего газа, происходящее либо в виде пожара в котловане: – при взаимодействии двух встречных струй, либо в виде факельного горения («струевые пламена»): – при смещении частей газопровода. Для сценария горения «пожар в котловане» на рис. 3 приведены кривые распределения теплового потока с удалением от места разрыва МГ. Кривые 1, 1*, 4, 4* взяты из рис. Ж.14 [6], а остальные построены по результатам проведенных расчетов по методике приложений Е и Ж [6].

Расчеты тепловых потоков выполнялись для интенсивностей истечения $G(t_{рек})$, соответствующих рекомендуемым [6] моментам времени после разрыва газопроводов: для Ду 500 – 30 с, Ду 700 – 45 с, Ду 1000, Ду 1200, Ду 1400 – 60 с.

Расстояние термического воздействия для факельного горения больше чем для «пожара в котловане», но положительным фактором при этом является то, что смещение концов при разрыве газопровода в подавляющем числе случаев не превышает 15° – 20° и факелы направлены близко к оси газопровода.

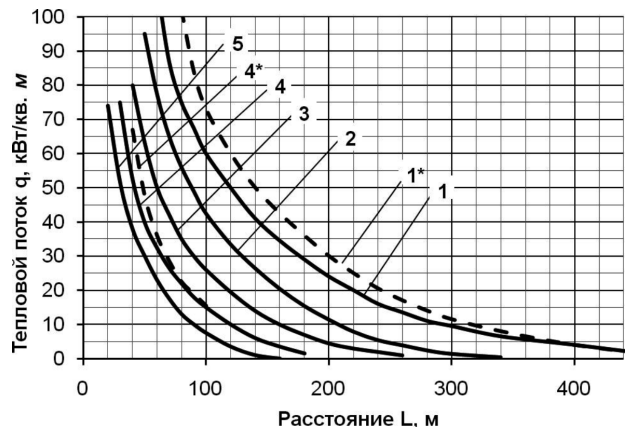


Рис. 3. Распределение теплового потока на уровне поверхности земли при пожаре на газопроводе при сценарии горения «пожар в котловане» в неподвижной атмосфере. 1 - Ду 1400 мм, $\Sigma G = 7000$ кг/с; 2 - Ду 1200 мм, $\Sigma G = 4200$ кг/с; 3 - Ду 1000 мм, $\Sigma G = 2800$ кг/с; 4 - Ду 700 мм, $\Sigma G = 1300$ кг/с; 5 - Ду 500 мм, $\Sigma G = 700$ кг/с; (кривые 1*, 4* – при $L_{ф}/D_{эф} = 4$, остальные – при $L_{ф}/D_{эф} = 2$, где $L_{ф}$ – фактическая высота цилиндра пламени, м; $D_{эф}$ – эффективный диаметр очага пожара, м)

Значения интенсивности теплового излучения q , кВт/м² для различных степеней поражения человека и повреждения сооружений приведены в таблице 4.

Таблица 4 [9, 10]

Степень поражения	Интенсивность излучения
Боль достигается после воздействия в течение 10 с (для незащищенной кожи).	3 кВт/м ²
Боль достигается после воздействия в течение 5 с (для незащищенной кожи). Воздействие в течение нескольких минут вызывает ожоги 2-й и 3-й степени.	5 кВт/м ²
Риск смерти от воздействия в течение 20 с равен 1 %. Предельное значение максимального теплового потока для незащищенных сооружений. Необходимо охлаждение против загорания.	10 кВт/м ²
Экспозиция в течение нескольких секунд вызывает ожоги 2-й и 3-й степени. Риск смерти от воздействия в течение 20 с равен 7 %.	12,5 кВт/м ²
Возникновение вторичных пожаров из-за теплового излучения в случае воздействия в течение нескольких секунд.	20 кВт/м ²
97 % вероятность смерти в случае воздействия в течение 20 с. Предельное значение для максимально допустимой интенсивности теплового излучения для защищаемых конструкций.	35 кВт/м ²

Для наиболее опасных участков линейной части МГ мерами безопасности, снижающими риск аварии и ее воздействие, могут быть: увеличение толщины стенки трубопровода для ограничения уровня кольцевых напряжений, увеличение глубины его залегания, перенос запорных устройств к месту возможной аварии [11], установка автоматов аварийного закрытия линейных кранов для отключения участка при аварийной ситуации, прокладка МГ в защитном футляре (кожухе) и увеличение его протяженности [12], контроль загазованности между трубопроводом и кожухом, обеспечение защиты МГ от преступных посягательств.

Сравнительный анализ способов обеспечения безопасности при прокладке МГ на густонаселенных территориях, установленных зарубежными

стандартами, выполнен в работе [13]. Основные выводы из этого анализа приведены ниже.

В ряде стран (США, Канада, Австралия) отсутствуют законодательно установленные минимальные безопасные расстояния от МГ. Вместо этого в областях с высокой плотностью населения предусматриваются дополнительные технические требования по обеспечению безопасности: снижение рабочего давления; ограничение уровня расчетных кольцевых напряжений величиной $0,72 \div 0,4$ от нормативного предела текучести металла трубы; увеличение толщины стенки; уменьшение расстояния между задвижками (с 16, 25, 30 км до 4, 8, 15 км); увеличение минимального заглубления и т.д.), требования к мониторингу (например, частота патрулирования, чувствительность системы обнаружения утечек и т.д.), установление запретных охранных зон.

В Германии нормативными документами задаются только запретные охранные зоны шириной до 8-10 м от оси МГ, а безопасность при прокладке на густонаселенных территориях обеспечивают способами: увеличением толщины стенки; ограничением рабочего давления; уменьшением расстояния между задвижками (с 18 до 10 км).

В Великобритании безопасные расстояния при проектировании МГ задаются по контурам индивидуального риска (10^{-5} 1/год); способами обеспечения безопасности являются: уменьшение расчетного давления; ограничение уровня расчетных кольцевых напряжений величиной $0,72 \div 0,3$ от нормативного предела текучести металла трубы; увеличение толщины стенки.

В Японии безопасные расстояния в диапазоне $25 \div 65$ м нормируются только для надземных МГ до мест с массовым скоплением людей. Способами обеспечения безопасности на густонаселенных территориях являются: расположение задвижек через 1 км; задается номинальная толщина стенки для каждого типоразмера труб.

Из сравнения предлагаемых зарубежными стандартами зон с зонами действия поражающих факторов при авариях на МГ следует, что они фактически безопасными не являются. Анализ зарубежной практики показывает фактический отказ от установления безопасных расстояний между МГ и объектами воздействия в пользу сокращения времени случайного нахождения людей в опасных зонах и снижения вероятности перерастания инцидентов в крупные аварии – «защита временем».

Список использованных источников

1. СНиП 2.05.06-85* Магистральные трубопроводы. - 60 с.
2. СП 36.13330.2012 Свод правил. Магистральные трубопроводы (актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*). М. – 2013. -78 с.
3. Методика вероятностного анализа несущей способности проектируемых трубопроводов. И.А. Хохлова, Л.М. Султанова. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 13, № 1(2), 2011. с. 497-499.
4. Хохлова И.А. Обеспечение работоспособности проектируемых трубопроводов путем усовершенствования метода прочностного расчета по предельному состоянию. Автореферат диссертации к.т.н., Уфа – 2011. -25 с.
5. Назаров Д.В. Совершенствование проектных норм надежности магистральных трубопроводов. Диссертация к.т.н., Уфа – 2015. -106 с.
6. СТО Газпром 2-2.3-351-2009 Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром» (взамен СТО РД Газпром 39-1.10-084-2003). -376 с.
7. Методическое обеспечение анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром». Сафонов В.С., Ковалев С.А., Ганага С.В. Презентация доклада на ежегодном семинаре ДПБ-2009. М., 20 октября 2009 г. -21 с.
8. Ю.А. Маянц, С.В. Карпов, А.С. Алихашкин, С.В. Овчаров Назначение участков предварительных испытаний и охранных зон при проведении испытаний магистральных трубопроводов. Н.-г. сб. «Вести газовой науки», № 1(17)/ 2014. С. 88-92.
9. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий. ВНИИ противопожарной обороны. М. – 2006. -61 с.
10. FPS Home Affairs Directorate-General for Civil Security. Manual Dealing with incidents involving pipelines. Natural Gas Action Card. June 2009 – version 2.2. Brussels. p. 32.
11. Снижение интенсивности действия поражающих факторов при разрывах магистральных газопроводов. А.С. Мазур, И.Г. Янковский, А.А. Козлов, Т.В. Украинцева, Л.В. Костюк, Е.В. Харьковец. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2013, № 19 (45). С. 86-88.
12. Швыряев А.А. Химический факультет МГУ. Количественный анализ риска при обосновании проектных решений прокладки газопроводов методом «труба в трубе». Ежегодный тематический семинар ДПБ и страхование 2011. -28 с.
13. Савина А.В. Анализ риска аварий при обосновании безопасных расстояний от магистральных трубопроводов сжиженного углеводородного газа до объектов с присутствием людей. Диссертация к.т.н., М. – 2013. -121 с.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

А.В. Лун-Фу, М.А. Бубенчиков (ООО «Газпром трансгаз Томск», РФ, Томск)

E-mail: m.bubenchikov@gtt.gazprom.ru

Высокий динамизм развития производительных сил обуславливает рост объемов потребления энергоресурсов, что в условиях ограниченности природных запасов последних актуализирует проблему выявления не только альтернативных источников энергообеспечения, но и эффективных подходов к организации их производства. Объектом исследования статьи выступила ветроэнергетика, характеризующая высокими темпами развития и занимающая 2-3 % от общего объема потребляемой энергии в мире. Проведен элементный анализ состояния европейского и мирового рынков ветровой энергии, позволивший констатировать более чем двукратный рост мощностей за истекшее десятилетие. На основе сопоставления себестоимости 1 кВт·ч энергии, получаемой из различных источников, в том числе традиционных, показана конкурентоспособность энергии ветра.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, ветроэнергетическая установка, рынок ветроэнергетики, инвестиции, себестоимость производства, сравнение себестоимости различных видов энергии.

Интенсификация развития производительных сил, обусловившая рост энергопотребления и, как следствие, истощение запасов «традиционных» топливно-энергетических ресурсов, требует исследования по выявлению альтернативных источников энергии. Происходящая при этом трансформация структуры энергопотребления предполагает формирование новых видов хозяйственной деятельности, создание соответствующей инфраструктуры. Настоящая работа посвящена оценке состояния мирового рынка ветроэнергетики, в том числе стран Европейского экономического сообщества, и выявлению на его основе перспектив развития [1].

На протяжении многих лет индустрия ветровой энергетики развивалась в направлении увеличения мощности ветрогенератора. Первое поколение продаваемых ветроэнергетических установок (ВЭУ) обладало мощностью от 10 до 100 кВт. Главным рынком для этих установок традиционно являлись европейские государства. Однако активное внедрение достижений научно-технического прогресса в области ветроэнергетики в начале 90-х гг. XX в. способствовало созданию ВЭУ с мощностью более 500 кВт. В середине 90-х гг. прошлого века произошло дальнейшее увеличение максимальной установлен-

ной мощности проектируемых ВЭУ до 1 МВт, при этом их средняя мощность составляла около 850 кВт. Начало XXI в. характеризуется ростом спроса на ВЭУ, который наблюдается не только на традиционном европейском рынке, но и в других регионах, в первую очередь в США, странах Юго-Восточной Азии [2].

По результатам исследований Европейской ассоциации ветроэнергетики, объем мирового рынка в 2014 г. составляет 137 ГВт энергии, включая 3,2 ГВт (или 2,3 %) морских ВЭУ.

Структура европейского рынка по странам-производителям ВЭУ представлена на рис. 1.

Как свидетельствуют приведенные данные, несомненными лидерами являются Германия, Великобритания и Испания, на долю которых приходится 22 %, 13 % и 11 % европейского рынка, соответственно.

Динамика мощности ВЭУ за период 2005–2014 гг. приведена на рис. 2.

Полученные результаты подтверждают интенсивный характер развития рынка ветроэнергетики в странах ЕС. Характеризуя названных выше лидеров, хотелось бы отметить более чем двукратное увеличение мощностей ВЭУ Германии, практически

Wind power development prospects

Lun-Fu A.V., Bubenchikov M.A. (ООО Gazprom Transgaz Tomsk, RF, Tomsk)

E-mail: m.bubenchikov@gtt.gazprom.ru

Industry dynamics is the key driver for energy demand growth. Given the limited natural resource additions, it is believed critical to identify, on a timely basis, alternative energy sources and find more efficient approaches to resource management. This study mainly focuses on wind power which presently reports high development rates and presently stands for 2-3 % of total global energy consumption. The authors summarise here their detailed analysis of European and global wind power markets and report more than two-fold capacity growth in this sector over the past decade. Based on comparisons for 1 KWh generation costs for different power sources, including conventional generators and renewables, the authors believe the wind power is set to be essentially competitive.

Keywords: renewables, power, wind generators, coastal plant, offshore generation, wind power market, investment, generation costs, profitability.

трехкратный рост мощностей Испании за истекшее десятилетие. Ветроэнергетика Великобритании, бурно развиваясь в период 2005–2010 гг., переходит в состояние стагнации с 2010 г. по настоящее время.

Несмотря на усиление значимости ветроэнергетики в организации жизнедеятельности стран, о чем свидетельствует приведенная динамика мощностей, энергия ветра, к сожалению, является нерегулируемым источником энергии, зависимым



Рис. 1. Структура европейского рынка ВЭУ (2014 г.)

от силы ветра – фактора, не поддающегося внешнему влиянию. И как следствие, объемы вырабатываемой электроэнергии не постоянны, что предполагает необходимость создания страховых запасов энергии (станций обеспечения бесперебойного снабжения), разработки альтернативных технологий сопутствующих либо заменяющих ВЭУ. Еще одной проблемой (преодолеваемой посредством проведения исследований и разработки проектных решений) является снижение отдачи ветрогенераторов после достижения ими износа в 20–25 % [3].

Важным условием эффективности ВЭУ является их массовость. Это связано с тем, что расходы по установке единичных установок нецелесообразны в связи с необходимостью существенных затрат на создание сетевой инфраструктуры (затраты на обеспечение линии электропередач и распределительных устройств).

Большие ветроустановки помимо проблемы обеспечения прочности конструкции имеют проблему, связанную с ремонтом и поддержанием надежности их функционирования, так как, например, замена важнейших деталей, в число которых входят лопасти и ротор, на высотах более 100 м – довольно сложная процедура.

В 2014 г. темпы прироста инвестиций в мировую ветроэнергетику составили примерно 150 млрд долл., что связано со стремительным развитием технологий использования альтернативных источников энергии на Дальнем Востоке, снижением цен на ВЭУ, климатическими изменениями на территории Европы [2]. И эта тенденция будет продолжаться. По различным оценкам, в ближайшее десятилетие объем инвестиций в возобновляемые источники энергии удвоится, что приведет к увеличению доли ветроэнергетики в общем объеме до 10 % к 2030 г. (против 2 % в 2010 г.).

Развитость отрасли ветроэнергетики, которая, безусловно, является передовой в области возобновляемой энергетики (не считая гидроэнергетику) сказывается не только на технических характеристиках ВЭУ, но и на экономических параметрах. Признание ветроэнергетики как одного из наиболее перспективных направлений обусловило ее высокий уровень развития, что нашло отражение в значении параметров ВЭУ, обеспечивающих эффективность их функционирования. Для подтвержде-

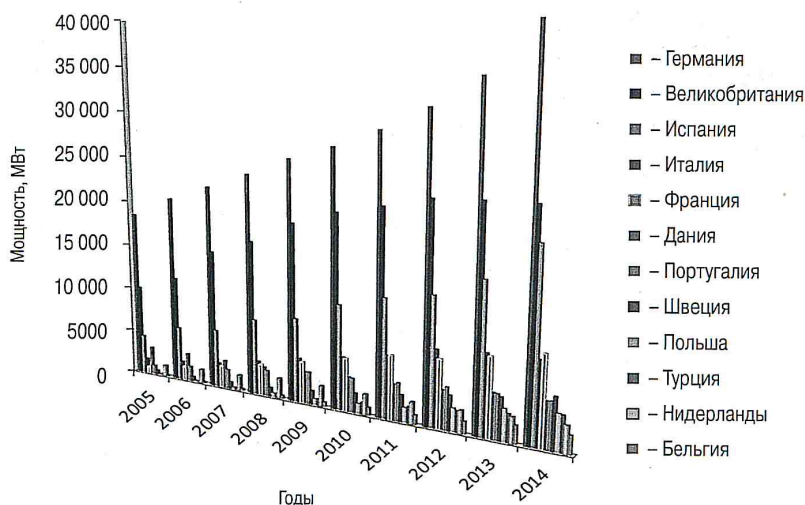


Рис. 2. Динамика мощностей ВЭУ европейских стран (2005–2014 гг.)

ния данного тезиса проведем сравнение себестоимости 1 кВт·ч электроэнергии, получаемой на различных типах станций (табл. 1), в условиях коридора изменения некоторых производственно-экономических показателей (таких как интенсивность ветра или солнечного излучения и др.).

Как свидетельствуют данные табл. 1, затраты на производство электроэнергии ВЭУ вполне сопоставимы с традиционными способами получения энергии. Себестоимость электроэнергии, получаемой береговой ВЭУ, занимает второе-третье место в каждой градации, уступая лишь атомной и парогазовой электростанции. Самый дорогой 1 кВт·ч электроэнергии получают на фотоэлектрических станциях – превышение над стоимостью «ветрового» 1 кВт·ч в 4–6 раз, значимый разрыв демонстрирует и электроэнергия тепловых солнечных электростанций.

Хотелось бы обратить внимание на существенную дифференциацию себестоимости энергии, получаемой на береговых и морских ВЭУ. Конечно же, энергия, вырабатываемая морскими ВЭУ,кратно дороже энергии береговых ВЭУ, что связано с удорожанием процедур монтажа и обеспечения сетевыми подключениями, издержки, также связанные с получением разрешительной документации, а также с проблемами защиты от коррозии. Необходим учет технических особенностей, обусловленных сложностью (а зачастую и невозможностью) контроля и регулирования морских территорий. Тем не менее даже более дорогой морской 1 кВт·ч электроэнергии вполне конкурентоспособен по сравнению с другими источниками альтернативной энергии.

Рассмотрим производственно-экономическое положение лидера рынка ветроэнергетических установок 2014 г. – компанию

Таблица 1

Себестоимость электроэнергии при различных типах электростанций, долл./кВт·ч

Тип электростанции	Минимум	Средняя	Максимум
Фотоэлектрическая станция	0,14	0,25	0,48
Тепловая солнечная электростанция	0,17	0,19	0,2
Морская ветроэнергетическая станция	0,09	0,12	0,17
Геотермальная электростанция	0,04	0,06	0,12
Крупная гидроэлектростанция	0,03	0,06	0,11
Атомная электростанция	0,01	0,06	0,11
Угольная ТЭС с пылеугольным котлом	0,04	0,05	0,11
Парогазовая электростанция	0,02	0,05	0,07
Береговая ветроэнергетическая станция	0,03	0,04	0,09

Таблица 2

Топ-10 стран по объему установленной мощности ВЭУ

Страна	Мощность, МВт	Доля, %
Китай	75 325	26,7
США	60 007	21,2
Германия	31 332	11,1
Великобритания	22 796	8,1
Индия	18 421	6,1
Испания	13 445	3,4
Италия	8144	2,9
Франция	7564	2,7
Канада	6200	2,2
Португалия	4525	1,6
Остальной мир	39 853	14
Итого (Топ-10) стран	242 734	86
Итого (мир)	282 587	100

Vestas. Согласно данным отчетов компании за 2014 г. ее валовая прибыль составила 6,9 млрд евро; объем заказов, выполненных компанией, – 7,4 ГВт по мощности установок. Работа компании Vestas рентабельна, что подтверждает значение чистой прибыли в размере 392 млн евро. Рентабельность капитала оценивается в 24,5 %, что говорит об эффективном использовании средств. Добавленная стоимость в расчете на единицу продукции за 2014 г. оценивается в 1,62 евро/кВт·ч, что считается высоким показателем для рынка ветроэнергетики.

Ограниченное распространение ВЭУ связано с такими аспектами, как сильная зависимость от природных факторов, ставящая под сомнение вероятность бесперебойного снабжения энергией, высокие вложения в научные разработки, в установку, монтаж устройств, ориентация потребителей на использование традиционных энергоносителей и т. д. Однако научно-технический прогресс планомерно подводит к тому, что с рынком ветроэнергетики в самые ближайшие годы предстоит считаться – готовятся к серийному выпуску ВЭУ мощностью 225 МВт, что позволит существенно повысить рентабельность данного типа установок. Среди конкурентов – производителей ветровой энергии следует выделить в первую очередь рынки Азии и Северной Америки.

В табл. 2 представлена сегментация установленной мощности ВЭУ по странам, на рис. 3 – сегментация мирового рынка ВЭУ по компаниям-производителям.

По данным Global Wind Energy Council, запущенные в эксплуатацию мощности

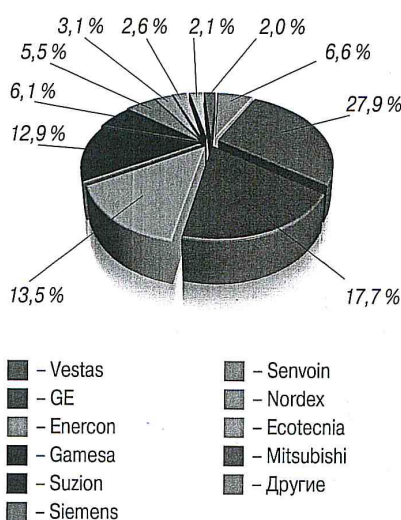


Рис. 3. Сегментация мирового рынка ВЭУ за 2014 г. по производителям

ВЭУ за 2012 г. составили 283 ГВт, что выше на 18,7 % в сравнении с 2011 г. Мощности морских ВЭУ составили 5,4 ГВт, что на 31,4 % выше, чем годом ранее. По данным BP Statistical Review of World Energy, 2013 г., с помощью ВЭУ было произведено 521,3 млрд кВт·ч электроэнергии в мире (2,3 % от мирового производства электроэнергии).

Таким образом, мировой ветроэнергетический рынок демонстрировал бурный рост на протяжении 2005–2014 гг. Рост объема мирового рынка ВЭУ в стоимостном выражении с 16,5 млрд долл. США в 2005 г. до 70 млрд долл. в 2013 г. показывает явную заинтересованность в развитии этого направления.

Наибольший объем продаж ВЭУ по итогам 2013 г. приходился на рынок стран Азии (35,5 % мирового рынка), Северной Америки (28,4 %), Европы (27,4 %). Наибольшая суммарная установленная мощность ВЭУ по итогам 2014 г. приходилась на Европу (47,8 %), Азию (25,1 %), Северную Америку (24,2 %).

ВЭУ при эксплуатации не использует ископаемое горючее. Работа ВЭУ мощностью 1 МВт за одно десятилетие может сэкономить около 15 тыс. т угля или 50 тыс. баррелей нефти.

Европейская ассоциация ветроэнергетики (European Wind Energy Association, EWEA) сообщает, что к 2020 г. суммарная мощность офшорных ветропарков должна вырасти до 40 ГВт, а к 2030 г. – до 150 ГВт.

Однако все эти оптимистичные прогнозы могут быть нарушены возросшей активностью Дальневосточного региона (Китай, Япония). Существует угроза повторения ситуации с солнечными батареями, когда азиатские компании вытеснили с европейского рынка собственных производителей за счет более низкой себестоимости производимой продукции.

Но внутриотраслевая конкуренция, несомненно, будет только способствовать развитию всего рынка ветроэнергетики в целом. Динамика роста в последнее десятилетие неизменно имела положительную тенденцию, и в ближайшем будущем, с выходом на рынок новых, усовершенствованных установок, можно ожидать прорыва ветроэнергетического рынка на мировой энергетической арене.

Список литературы

1. Малхотра Н. Маркетинговые исследования. Практическое руководство, 4-е изд. / Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2007. – 1200 с.
2. Алхасов А.Б. Возобновляемая энергетика. – М.: Физматлит, 2010. – 256 с.
3. Алексеев Б.А. Ветроэнергетика мира и ее проблемы // Энергетика за рубежом. – 2007. – № 5. – С. 31–47.

References

1. Malkhotra N. *Marketingovy issledovaniya. Prakticheskoe rukovodstvo, 4-e izd.* [Malhotra N. Marketing Research: an applied orientation, 4th edition]. Moscow, Vil'yams Publ., 2007. 1200 p.
2. Alkhasov A.B. *Vozobnovlyаемая энергетика* [Renewable Energetics]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2010. 256 p.
3. Alekseyev B.A. *Vetroenergetika mira i ee problemy* [Wind-power engineering of the world and its problems]. *Energetika za rubezhom*, 2007, no. 5, pp.31–47.

УДК 665.73/.753

Технологическое оборудование АГНКС – НОВЫЙ формат

М.А. Хренов, А.С. Кудинов, К.Н. Козловский (ООО «Газпром газомоторное топливо», РФ, Санкт-Петербург)
E-mail: Hrenov-MA@gmt.gazprom.ru

Фундаментом развития рынка газомоторного топлива (ГМТ) выступает инфраструктура. На сегодняшний день первоочередной задачей ООО «Газпром газомоторное топливо» является создание на территории России единой федеральной производственно-сбытовой сети компримированного природного газа (КПГ). Для эффективного решения поставленной задачи специалистами компании проанализированы различные технологические решения и подходы к созданию автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС). Целью данной работы являлась разработка унифицированного технологического решения, которое позволило бы осуществлять развертывание сети АГНКС ускоренными темпами. Результатом взаимодействия с ведущими отечественными конструкторскими бюро стало создание АГНКС нового формата. Ее построение производится на базе контейнеров стандартных габаритных размеров с монтажом всего комплекса технологического оборудования в заводских условиях. Данный формат позволяет существенно сократить сроки проведения проектных и строительно-монтажных работ, а также повысить функциональность и безопасность работы станции.

Ключевые слова: автомобильная газонаполнительная компрессорная станция, компримированный природный газ, основное технологическое оборудование, блок КПГ, передвижной автомобильный газовый заправщик.

История создания АГНКС берет свое начало с 1930-х гг. Родоначальником развития сети АГНКС считают Италию, после которой идея строительства метановых заправочных станций получила дальнейшее распространение во всем мире.

В 80-х гг. прошлого столетия, ввиду мирового первенства по добыче природного газа, в СССР было принято решение о начале создания сети АГНКС, являющееся «точкой отсчета» зарождения новой инфраструктуры, повлиявшей на дальнейший ход развития страны. Разработанная в 1983 г. программа формирования газомоторной отрасли являлась перспективной, стратегически правильной и соответствовала мировым тенденциям по расширению использования экологичного и доступного моторного топлива.

Проектным институтам страны была поставлена задача по разработке типовых проектов форматов АГНКС, которые в последующем должны заложить, с одной стороны,

основу видового представления АГНКС, а с другой – создать распространенное техническое решение, удобное при проведении строительных работ и эксплуатации.

Первая АГНКС в СССР была построена в 1983 г. в пос. Развилка на пересечении Московской кольцевой автодороги и Каширского шоссе. Производственные мощности АГНКС позволяли осуществлять в среднем 500 заправок в сутки посредством компрессорного оборудования итальянского производства Nuovo Pignone.

В последующем, с 1985 по 1987 г., с незначительным интервалом, в Московской обл. было построено и открыто еще 6 АГНКС, оснащенных отечественным компрессорным оборудованием производства ПО «Борец» (г. Москва). В результате формат исполнения заправочной станции получил название АГНКС-500 («Борец»). Отличительной особенностью АГНКС данного формата является его цеховое исполнение,

состоящее из одного капитального здания, укомплектованного практически всем технологическим оборудованием, позволяющим обеспечивать производственный процесс и поддержание режима работы станции. В состав цеховой АГНКС-500 входят: производственно-технологический корпус, наружное технологическое оборудование, внешние инженерные коммуникации, а также автозаправочная галерея из восьми постов с газозаправочными колонками, осуществляющими заправку до 48–60 грузовых автомашин за один час.

Чуть позже, к 1987 г., в Московской обл. было построено еще шесть АГНКС уже на базе оборудования немецкого производства Zwickauer Maschinenfabrik, мощностью до 500 заправок в сутки. По формату исполнения АГНКС-500 (Германия) практически ничем не отличается от АГНКС-500 («Борец»). Аналогичное цеховое исполнение, состоящее из одного капитального здания и похожего по составу оборудования, но укомплектованное более мощными компрессорными установками.

Параллельно развитию форматов «пятисоток» в г. Сумы (Украина) на Сумском машиностроительном научно-производственном объединении им. М.В. Фрунзе и в бывшей ГДР на производственных мощностях VEB Maschinenfabrik und Eisengießerei Wurzeln было налажено производство АГНКС в формате блочно-контейнерного исполнения (БКИ), имеющих вдвое меньшую производительность, АГНКС-250 (г. Сумы) (рис. 1) и АГНКС-250 (Германия). АГНКС-250 представляет собой единый модуль, состоящий из отдельно стоящих блоков с технологическим оборудованием, связанных между собой посредством газопроводных и кабельных коммуникаций.

История создания метановых газозаправочных станций в начале 90-х гг. прошлого столетия отмечает появление АГНКС

меньшей производительности с широким разнообразием применяемого технологического оборудования.

После распада Советского Союза газомоторная отрасль пришла в упадок. Существующие станции закрывались, газомоторная техника либо переводилась на жидкое моторное топливо, либо вовсе выводилась из эксплуатации и списывалась.

В мае 2013 г. президент Российской Федерации В. В. Путин провел совещание о перспективах использования ГМТ в Российской Федерации. По его итогам было принято Распоряжение Правительства Российской Федерации № 767-р «О регулировании отношений в сфере использования газового моторного топлива, в том числе природного газа в качестве моторного топлива», предусматривающее разработку комплекса мер по достижению целевых показателей уровня использования ГМТ на общественном транспорте и коммунальной технике. Газомоторная отрасль России получила новый вектор развития.

На сегодняшний день перед ООО «Газпром газомоторное топливо» как единым оператором развития рынка ГМТ в Российской Федерации от ПАО «Газпром» поставлена сложная и многогранная задача: в короткие сроки обеспечить существенный прирост объектов производственно-сбытовой инфраструктуры КПП. За ближайшие годы необходимо осуществить реализацию строительства разветвленной сети АГНКС, что позволит придать импульс массовому переходу автотранспортного сектора на использование экологичного моторного топлива.

В ходе анализа современных технических решений АГНКС иностранного и отечественного производства специалистами ООО «Газпром газомоторное топливо» было принято решение минимизировать имеющиеся проектные и технологические ошибки ныне действующих АГНКС, снизить стоимость технологического оборудования, упростить процесс проектирования станций и сократить время проведения строительно-монтажных работ, не упуская из вида надежность и унификацию технических решений, позволяющих уменьшить эксплуатационные издержки и повысить функциональность и безопасность.

По проведению ряда консультаций с конструкторскими бюро и изучении опыта эксплуатации АГНКС, построенных в совет-

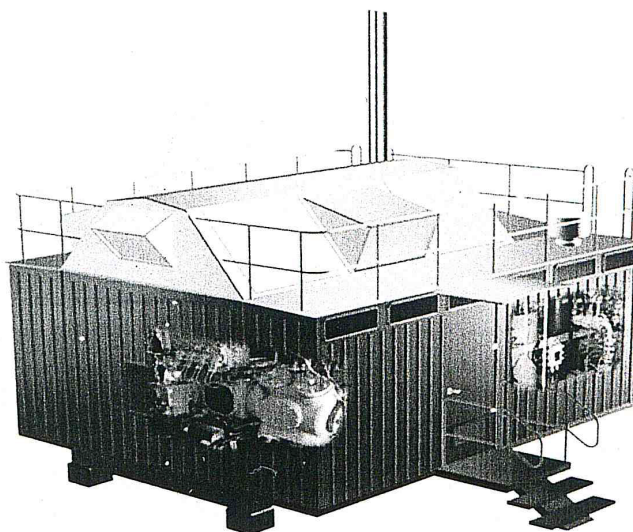


Рис. 1. АГНКС-250 (г. Сумы)

ский период, были выработаны основные технические требования и подходы к типам и компоновочным решениям газозаправочных станций. На основе сформированных требований, с учетом особенностей перспективных сегментов рынка потребления, специалисты проработали ряд типовых форматов инфраструктурных объектов со стандартизированной линейкой оборудования АГНКС.

При рассмотрении вопроса эксплуатации оборудования в широком спектре климатических условий Российской Федерации родилась идея уйти от принятого в настоящее время блочно-модульного исполнения газозаправочных станций (рис. 2), которое приводит к дополнительным строительно-монтажным работам, а также затрудняет техническое обслуживание и ремонт оборудования в условиях северных регионов.

В качестве вектора решения задачи была рассмотрена конструкция АГНКС БКИ-250 завода им. М. В. Фрунзе, выпускаемая в 80-х гг. прошлого века. Это единое блок-модульное решение, разделенное перегородкой на технологический отсек и хозяйственно-бытовой блок. Конструкция позволяла проводить комфортное обслуживание технологического оборудования, находясь в теплом производственном цехе, и включала ряд вспомогательных помещений, таких как мастерская и склад.

Принимая во внимание снижение массогабаритных показателей современного технологического оборудования, специалисты ООО «Газпром газомоторное топливо» при поддержке отечественных конструкторских бюро пошли дальше. Итогом плотной совместной работы стало создание АГНКС цехового исполнения из контейнеров стандартных габаритных размеров с мон-

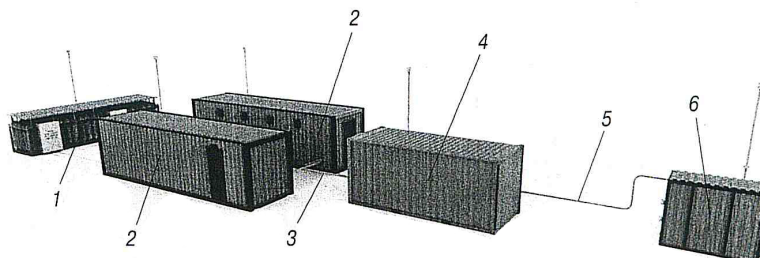


Рис. 2. Типовая схема компоновки блочно-модульной АГНКС:

1 – блок аккумуляторов газа; 2 – блок компрессорной установки; 3, 5 – межблочные трубопроводы; 4 – блок подготовки газа; 6 – блок входных кранов

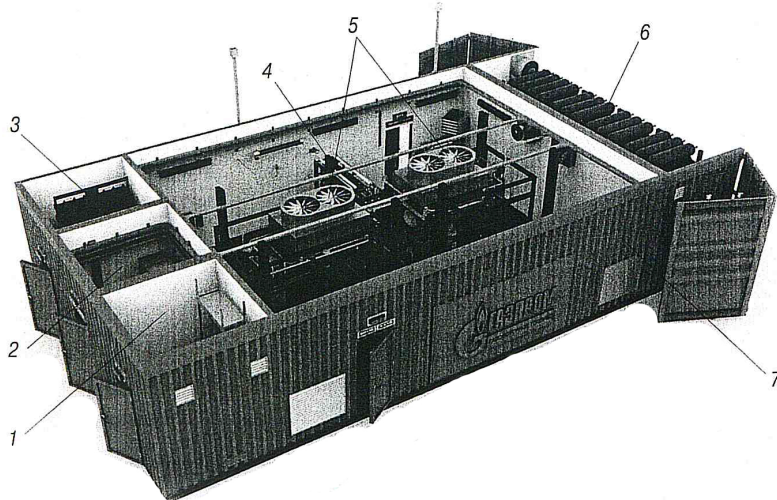


Рис. 3. АГНКС цехового исполнения нового формата:

1 – склад запасных частей; 2 – отсек АСУТП; 3 – мастерская; 4 – блок осушки природного газа; 5 – компрессорная установка; 6 – блок аккумуляторов газа; 7 – узел коммерческого учета газа

тажом всего комплекса технологического оборудования в заводских условиях (узел коммерческого учета газа, сепаратор с отбойником капельной влаги, компрессорные установки, блок осушки природного газа, блок аккумуляторов природного газа, АСУТП и прочие вспомогательные системы). Построение нового формата АГНКС (рис. 3) происходит на базе четырех контейнеров, выполненных на основе металлической рамы с заполнением стеновых панелей утепляющим материалом. В соответствии с требо-

ваниями нормативных документов станция разделена перегородками на несколько зон, технологическую часть и отсек АСУТП АГНКС. В довольно компактной конструкции нашлось место и для размещения небольшой мастерской и склада запасных частей.

Нужно отметить, что особенности конструкции такой станции позволяют использовать технологическое оборудование разного типа и марок, что лишним раз может подстегнуть интерес производителей к совершенствованию своей продукции.

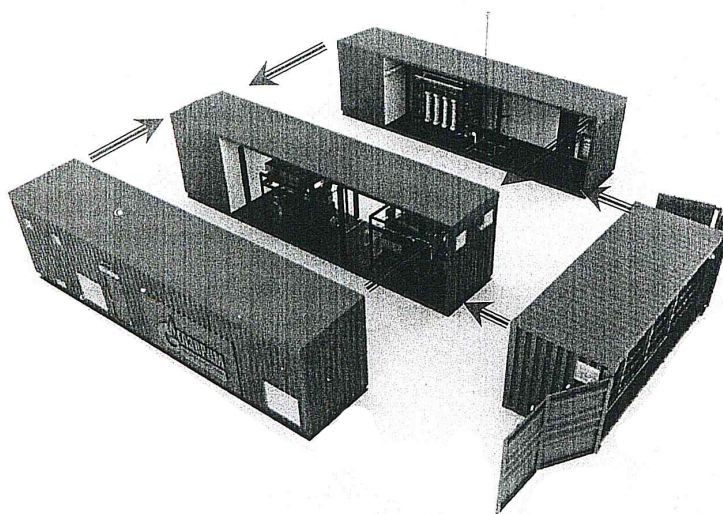


Рис. 4. Пример монтажа АГНКС цехового исполнения нового формата на площадке строительства

Для сохранения компактных размеров АГНКС и снижения энергопотребления станции в целом было принято решение использовать осушку природного газа адсорбционного типа с автоматической регенерацией адсорбента, расположенную после компрессорных установок на стороне высокого давления газа.

Монтаж АГНКС нового формата на площадке строительства сводится к стыковке контейнеров в единое изделие с подсоединением технологических трубопроводов и коммутирующих кабелей (рис. 4). По предварительным данным, работы по установке такой станции займут не более 10 дней.

Для снижения трудоемкости ведения проектных работ все технологические и инженерные подключения к блоку АГНКС осуществляются в строго зафиксированных точках, что позволит приблизиться к типизации проектных решений.

После проведения коммерческой оценки рынка и обобщения полученных данных было принято решение зафиксировать максимальную производительность АГНКС цехового исполнения нового образца на отметках 2000–2500 м³/ч (в зависимости от установленного входного давления).

В случаях недостаточного развития спроса на КПГ в районе строительства новой станции конструкцией АГНКС предусмотрено поэтапное увеличение производительности за счет установки одной компрессорной машины с возможностью дооснащения второй либо заменой компрессоров на более производительные.

Учитывая все положительные аспекты АГНКС цехового исполнения, можно с уверенностью сказать, что данное компоновочное решение вызовет большой интерес участников рынка и позволит реализовать планы массового строительства АГНКС.

Учитывая опыт иностранных производителей газозаправочного оборудования, специалистами ООО «Газпром газомоторное топливо» был рассмотрен вариант создания компактного технического решения, позволяющего дооснащать уже существующие АЗС и АГЗС блоками компримирования природного газа (блоки КПГ) (рис. 5). В отличие от своих конкурентов блок КПГ отечественной разработки оборудован системой очистки и осушки метана, а его производительность находится в пределах 500–600 м³/ч. Наличие всего перечня

необходимого технологического и вспомогательного оборудования дает возможность осуществлять подключение блоков КПП малой производительности непосредственно к сетям газораспределения и реализовать заправку легкового и малотоннажного грузового и пассажирского автотранспорта через интегрированную газозаправочную колонку.

Для заправки крупногабаритного автотранспорта на территориях АЗС и АГЗС был проработан вариант реализации АГНКС на базе стандартного 40-футового контейнера, позволяющего разместить уже две компрессорные установки. Максимальная производительность блока КПП средней производительности может достигать 2000 м³/ч (рис. 6).

Конструкция такой станции позволяет осуществлять ее периодическую транспортировку и монтаж на минимально подготовленную поверхность, что допускает вариант ее использования для «разогрева» потребительского спроса до момента строительства полноценной стационарной АГНКС.

Учитывая большой перерыв в развитии газомоторной отрасли в России и слабый уровень развития газозаправочной инфраструктуры, многие автотранспортные предприятия (АТП) ставят вопрос перевода автопарка на газ под сомнение. В свою очередь, при рассмотрении возможности и расчете экономической целесообразности строительства АГНКС возле точечных потребителей операторы рынка сталкиваются с проблемой приобретения земельных участков в условиях плотной городской застройки. Даже с учетом желания владельцев автопредприятий выделять небольшие участки земли для размещения объектов газозаправочной инфраструктуры и технической возможности присоединения оборудования к сетям газо- и электроснабжения вопрос строительства АГНКС в большинстве случаев заходит в тупик, так как большинство предлагаемых участков не позволяют построить на них АГНКС, способные осуществлять заправку крупнотоннажного транспорта.

В связи с этим специалистами ООО «Газпром газомоторное топливо» было выработано концептуальное решение данной проблемы.

Было предложено на базе блока КПП средней производительности построить мобильную компрессорную газозаправочную

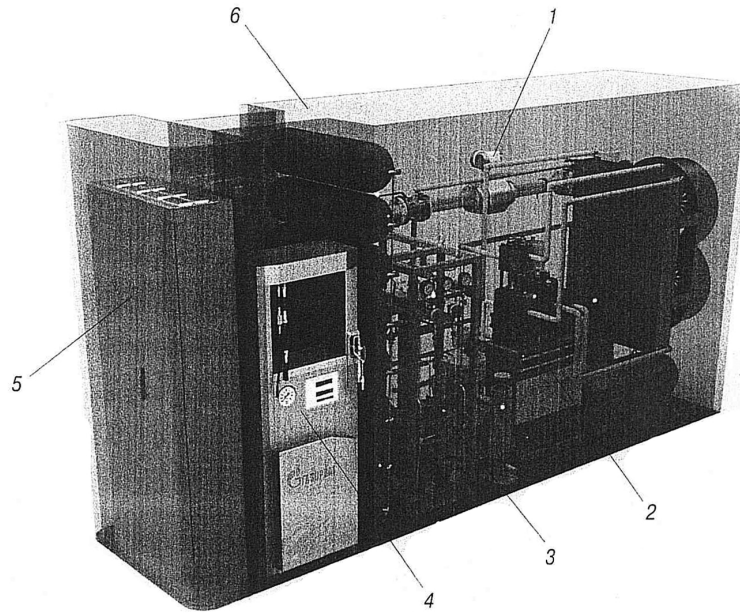


Рис. 5. Блок КПП малой производительности для заправки автотранспорта на существующих АЗС и АГЗС:

1 – узел коммерческого учета газа; 2 – компрессорная установка; 3 – блок осушки природного газа; 4 – газозаправочная колонка; 5 – щит АСУТП; 6 – блок аккумуляторов газа

станцию, способную обеспечить заправку сразу нескольких (5–15 шт.) автотранспортных средств за счет присоединения их к многопостовой заправочной рампе. Мобильная компрессорная газозаправочная станция

представляет собой блок КПП средней производительности, размещенный на колесной базе и состоящий из блока входных кранов с узлом коммерческого учета газа, двух компрессорных установок, производитель-

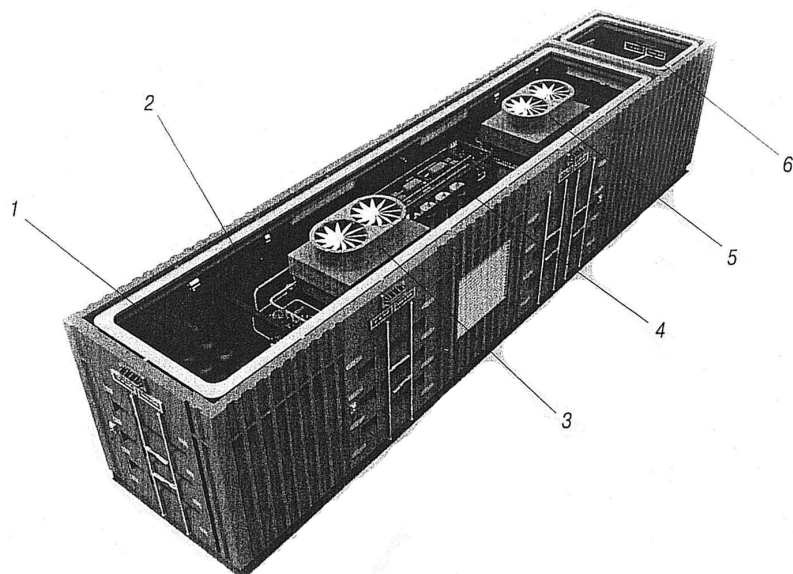


Рис. 6. Блок КПП средней производительности:

1 – блок аккумуляторов газа; 2 – узел коммерческого учета газа; 3, 5 – компрессорная установка; 4 – блок осушки природного газа; 6 – отсек АСУТП



Рис. 7. Модуль КПГ для разгрузки ПАГЗ и баллонных сборок на площадках заправки потребителей

ностью по 1000 м³/ч каждая, блока очистки и осушки газа, АСУТП и вспомогательных систем, размещенных в едином контейнере. Мобильную компрессорную станцию можно разместить на любой минимально подготовленной площадке, подключить ее к системе газоснабжения (газопровод сети газораспределения) и через многопостовую заправочную рампу обеспечить заправку автотранспортных средств. Небольшие габаритные размеры позволяют размещать данное изделие на выделяемых АТП участках своих площадей, а производительность станций способна перекрыть потребность автотранспорта предприятий в ГМТ.

Для развития производственно-сбытовой инфраструктуры в условиях плотной городской застройки и слабо развитой системы трубопроводного газоснабжения наибольший интерес представляет так называемая схема «материнская и дочерние АГНКС». В ее основе лежит принцип построения «виртуальных труб», т. е. осуществление доставки КПГ от стационарно

установленной АГНКС большой производительности до производственных площадок заправки потребителей при помощи передвижных автомобильных газовых заправщиков (ПАГЗ) или баллонных сборок.

«Материнская АГНКС» представляет собой быстросборное блочно-модульное изделие с наличием всей номенклатуры технологического оборудования. Изготовление и комплектация технологических блоков таких станций осуществляются полностью в заводских условиях. Идеи, заложенные в конструктив «материнской станции», аналогичны техническим решениям, принятым при разработке АГНКС цехового исполнения нового формата. Подключение «материнской станции», как правило, производится к сетям газораспределения высокого давления I категории (0,6–1,2 МПа). В зависимости от потребности производительность «материнской АГНКС» варьируется от 3 тыс. до 5 тыс. м³/ч.

В связи с относительно большими габаритными размерами технологического оборудования, обширной площадью заправочной зоны и высокой потребностью в природном газе и электроэнергии «материнские АГНКС» принято размещать за чертой города, в районе локации производственных предприятий. В основном такие станции рассчитаны на заправку газотранспортных емкостей передвижных заправщиков. Плечо эффективной доставки ГМТ мобильными заправщиками составляет от 50 до 80 км.

В зависимости от потребности в объемах КПГ, рентабельности проекта и месторасположения площадки заправки потребителей опорожнение ПАГЗ и баллонных сборок может осуществляться через системы как пассивной, так и активной разгрузки.

Пассивная система разгрузки представляет собой трехлинейную газозаправочную колонку, подключаемую к привозной системе хранения КПГ. Разгрузка транспортной системы хранения происходит за счет

разности давления в транспортной емкости и баллонах заправляемого транспортного средства. Для учета отгружаемого газа газозаправочная колонка оборудована массовым расходомером. Коэффициент опорожнения при реализации такой схемы достигает не более 50–60 %.

При активной системе разгрузки опорожнение транспортных емкостей осуществляется с помощью компрессорной установки. Для реализации такого способа разгрузки проработан вариант использования компактных технических решений – модулей КПГ (рис. 7). Модули КПГ могут быть оснащены компрессорными установками поршневого типа как с механическим, так и с гидравлическим приводом. Кроме компрессорной установки модуль КПГ оборудован двухпостовой газозаправочной колонкой с массовым расходомером и вспомогательными системами. Коэффициент опорожнения систем хранения при активной системе разгрузки может достигать 95 %, что существенно увеличивает эффективность транспортировки КПГ автотранспортными емкостями.

Таким образом, представленная линейка оборудования при реализации проектов газозаправочной инфраструктуры на ее основе позволит снизить негативные аспекты существующих технических решений, сократит затраты на электроэнергию, повысит скорость проведения проектных и строительно-монтажных работ. Заложившая унификация форматов станций сократит номенклатуру эксплуатируемого оборудования, что, в свою очередь, снизит финансовую нагрузку на проведение его технического обслуживания, уменьшит объемы закупаемых запасных и расходных материалов, а также сократит затраты на обучение технического персонала. Самое главное, принятый подход позволит сделать КПГ максимально доступным топливом для всех сегментов транспорта в силу оптимального расположения газозаправочных объектов.

New-generation automotive CNG filling station layouts

Khrenov M.A., Kudinov A.S., Kozlovskiy K.N. (OOO Gazprom Gazomotornoye Topливо, RF, St. Petersburg)
E-mail: khrenov-MA@gmt.gazprom.ru

Infrastructure is focal for automotive gas fuel development. Today, Gazprom Gazomotornoye Topливо directs its activities to establishment of a Russian-wide downstream value chain for compressed natural gas. Aiming to find best available solutions, the company has analysed a range of technology options and approaches to automotive gas filling stations. This development addresses a common technology-driven solution which is believed to encourage and accelerate deployment of a wider gas filling station grid. An innovative filling station scheme has been developed in cooperation with

leading domestic gas sector designers. Standard size prefabricated modular blocks a central for this solution. This format is expected to essentially cut front-line engineering and installation time and additionally benefit flexibility and operating security of these new units.

Keywords: automotive industry, gas filling station, compressed natural gas, process equipment, compression, modular block design, mobile gas filling unit.

Из специального выпуска журнала «Газовая промышленность» 2015

КОМПОНОВОЧНАЯ СХЕМА ШАССИ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА БЕЛАЗ 75710

*А.М. Насковец, нач. бюро компоновки ОАО «БелАЗ»,
А.Э. Павлович, патентный поверенный Республики Беларусь*

Согласно статье 3 Закона Республики Беларусь «О патентах на изобретения, полезные модели, промышленные образцы» [1] устройствам, как техническим решениям, предоставляется правовая охрана. К устройствам, согласно статье 53 действующего Положения [2], относятся конструкции и изделия, которые характеризуются в основном наличием конструктивных элементов и связями между ними. Следовательно, как устройства можно патентовать и компоновочную схему изделия, которая во многом определяет его конструкцию.

Сущность такого патентования приводится ниже на примере патента по компоновочной схеме карьерного самосвала БелАЗ 75710 [3].

Известна компоновочная схема шасси грузового автомобиля [4], принятая за прототип, и обеспечивающая хорошую проходимость и маневренность такого транспортного средства по бездорожью. Данная компоновочная схема выполнена с колесной формулой 4×4, содержащая раму, на которой смонтированы бортовые редукторы переднего и заднего ведущих мостов с двигателями. Причем двигатели переднего ведущего моста выполнены поворотными через систему кинематических передач с шарнирами и гидроцилиндрами от рулевого управления. Для улучшения качества поворота транспортного средства бортовые редукторы переднего ведущего моста снабжены установленным с правой стороны рамы дополнительным гидроцилиндром от рулевого управления.

Однако недостатком компоновочной схемы по прототипу [4] является то, что она не обеспечивает хорошую устойчивость грузового автомобиля

при его поворотах. Особенно это сказывается при применении шасси на карьерных самосвалах. Кроме того, такой схеме также присущи недостатки относительно наличия сложной системы кинематических передач в управлении поворотом движителей, требующей дополнительного технического обслуживания. К тому же такая конструкция кинематических передач ограничивает грузоподъемность грузовых автомобилей до 360 тонн.

Задача патентования состояла в достижении технического результата, направленного на упрощение конструкции компоновочной схема шасси карьерного самосвала, а также направленного на улучшение ее эффективности для упрощения поворотов колес такого автомобиля, и для повышения его грузоподъемности, улучшения маневренности и устойчивости на поворотах.

Для этого передний и задний мосты с колесами 1 карьерного самосвала (рис. 1) унифицированы, и закреплены подвижно на раме 2, на которой установлена грузовая платформа 3 и моторный отсек 4 с кабиной 5.

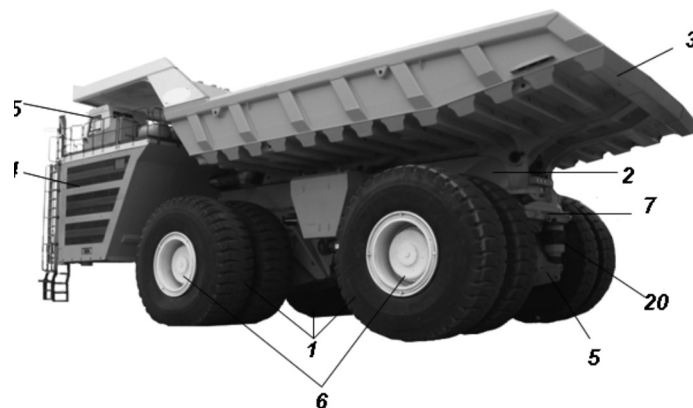


Рис. 1. общий вид карьерного самосвала БелАЗ 75710

Такой мост содержит поворотный корпус 6 и прикрепленный к нему центральный корпус 7, соединенный с бортовыми корпусами 8, на которых установлены колеса 1.

Поворотные корпуса 6 мостов снабжены опорно-поворотным кругом 9 (рис. 1–6), состоящим из неподвижного составного кольца 10 (рис. 5, 6), которое закреплено шпильками 11 (рис. 6) на раме 2 и подвижного цельного кольца 12, которое закреплено шпильками 13 на поворотном корпусе 6. Подвижное цельное кольцо 12 снабжено сверху и снизу беговыми дорожками 14, контактирующими с телами качения – роликами 15, расположенными между ним и беговыми дорожками 16 неподвижного составного кольца 10.

Причем опорно-поворотный круг 9 выполнен с возможностью своего присоединения к раме 2 транспортного средства, и с возможностью своего поворота направо и налево с помощью силовых цилиндров 17 (рис. 2–3), соединенных с поворотным корпусом 6 и с рамой 2 транспортного средства. Силовые цилиндры 17 сообщены с управляющей магистралью рулевого гидропривода (не показано).

На концах рамы 2 (рис. 2–4) установлены попарно ограничители 18. Они предназначены для ограничения поворота общих мостов бортов на углы α и δ . Для этого между ограничителями 18 расположены упоры 19, закрепленные на поворотных корпусах 6 мостов карьерного самосвала.

Центральные корпуса 7 соединены с поворотными корпусами 6 через центральные рычаги 20 (рис. 5), плечи которых соединены с элементами подвески 21, например, с амортизаторами или/и демпферами, которые также соединены с поворотным корпусом 6. Центральный корпус 7 может быть соединен с поворотным корпусом 6 с помощью монтажного элемента, например, двуплечего шарнирного рычага 22.

При движении карьерного самосвала по прямой (рис. 2), рабочие цилиндры 17 находятся в нейтральном положении, и к ним не поступает текучая среда под давлением.

При повороте карьерного самосвала (рис. 3), в результате вращения рулевого колеса (не по-

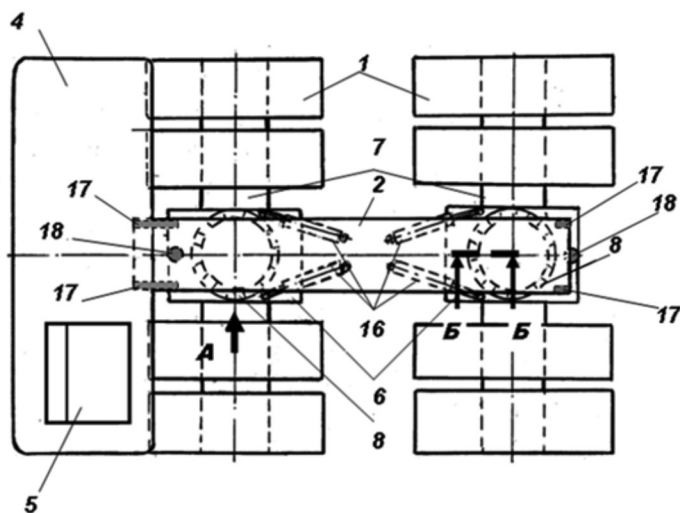


Рис. 2. схема расположения мостов карьерного самосвала

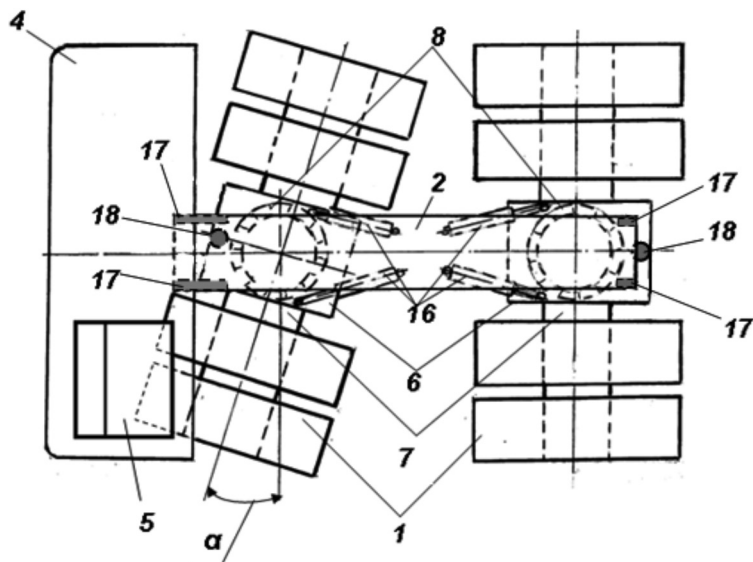


Рис. 3. схема поворота переднего моста карьерного самосвала

казано), водителем из кабины 5 (рис.1), текучая среда под давлением от управляющей магистрали рулевого гидропривода поступает в силовые цилиндры 17 мостов карьерного самосвала, и отслеживается в этих цилиндрах по давлению системой электрогидроуправления (не показана) в зависимости от величины необходимого поворота и дорожных условий.

В результате вначале поворотный корпус 6 передней части такого транспортного средства вместе с подвижным цельным кольцом 12 (рис. 6) поворачивается по роликам 15 опорно-поворотного круга 9 на необходимый угол и поворачивает колеса 1 (рис. 3) в зависимости от угла поворота рулевого колеса, с последующим прекращением

поступления текучей среды под давлением в силовые цилиндры 17, что осуществляется следящей системой рулевого гидропривода.

При необходимости дальнейшего (более крутого) поворота карьерного самосвала, упомянутое рулевое колесо поворачивается дальше, и система рулевого управления обеспечивает поворот поворотного корпуса 6 (рис. 4) вместе с колесами 1 задней части такого транспортного средства аналогичным образом, но в обратную сторону от его передней части. Ограничение поворота общих мостов бортов карьерного самосвала на углы α и δ осуществляется контактом упоров 19 к соответствующим ограничителям 18.

При выходе из поворота карьерного самосвала первым поворачивается в обратную сторону его задняя часть, а затем его передняя часть, что соответствует движению по прямой (рис. 2).

Таким образом, такое применение опорно-поворотного круга в мосте карьерного самосвала позволит:

- применить восемь шин одного типоразмера вместо традиционно применяемых шести шин, что направлено на увеличение грузоподъемности карьерного самосвала до 450 тонн и выше;
- обеспечить возможность поворота двух мостов такого транспортного средства относительно его цельной рамы, что значительно улучшит маневренность и уменьшит габариты в целом карьерного самосвала.

Такая компоновочная схема внедрена в конструкции карьерного самосвала БелАЗ-75710.

Источники информации

1. Закон Республики Беларусь от 29 октября 2004 г. № 319-З «О патентах на изобретения, полезные модели, промышленные образцы» (Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь, 2004 г., № 174, 2/1068).
2. Положение о порядке составления заявки на выдачу патента на полезную модель, проведения по ней экспертизы и вынесения решения по результатам экспертизы и Положения о порядке проведения информационного поиска по заявке на полезную модель. Утв. Постановлением СМ Республики Беларусь от 2.02.2011 №120.
3. Патент ВУ 10805 U, МПК В 60К 17/16, В 66С 23/84, приоритет 02.04.2015, опубликован 30.10.2015.
4. Патент RU 146875 U1, МПК В62D61/10, приоритет 24.09.2013, опубликован 20.10.2014.

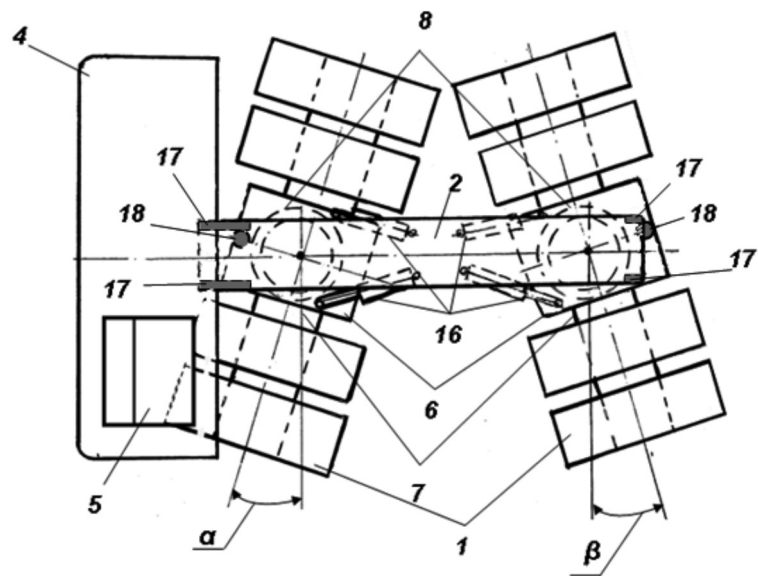


Рис. 4. Схема поворота заднего моста карьерного самосвала

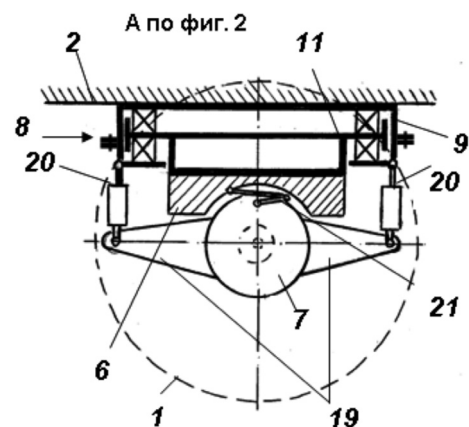


Рис. 5. Вид А по рис. 2, с изображением схемы устройства моста карьерного самосвала

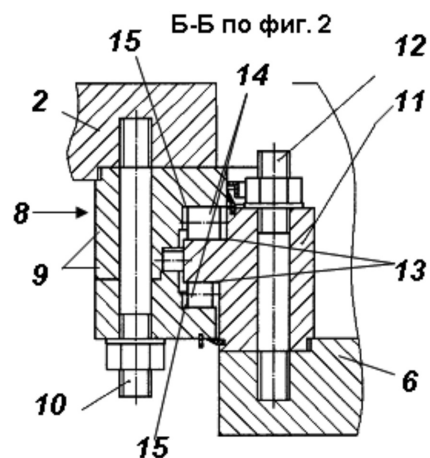


Рис. 6. Разрез Б-Б по рис. 2 с частью опорно-поворотного круга

ТРУЖЕНИК НЕБА

(Продолжение)

Клеванец Ю.В.

4.2. На Западе

С окончанием Второй Мировой войны США действительно стали ведущей мировой державой: на них приходилось 44 % мирового ВВП. Около половины мирового товарооборота составляли в то время взаимные поставки США и Великобритании. Однако для авиационных фирм союзников послевоенные годы стали временем кризиса. Так, корпорация «Дуглас» вынуждена была уволить 100 тысяч работников (конечно же, в первую очередь были сокращены чисто военные производства, но и для заводов, выпускавших ДС-3/Си-47/Си-53 настали тяжёлые времена). Армейские командования США и Англии приняли решение распродать по остаточной стоимости ставшие ненужными машины этих типов из своих парков, что сильно подкосило авиапроизводство в Старом Свете. Да и в Америке фирма Дугласа ощутила падение спроса на свою продукцию.

Коммерческие потери сопровождалась имиджевым успехом: бывшие в употреблении «Дугласы» быстро разошлись по всему свету, в

первое послевоенное десятилетие их закупили около 300 авиакомпаний разных стран. Вместе с тем нашлась работа для десятков фирм и фирмочек, занимавшихся переоборудованием транспортных и десантных машин в пассажирские.

Серийный выпуск самолётов типа ДС-3 продолжался до 1947 года. Не видя интереса гражданских авиакомпаний в новых самолётах, фирмачи с «Дугласа» вновь и вновь обращали взоры к военным заказчикам. Им были предложены варианты ТСИ-47Б и ТСИ-47Д для обучения штурманов и тренировки экипажей, ЭССИ-47 — поисково-спасательный, ВиСи-47А — транспортный, а также несколько вариантов для применения в морской авиации. Наконец, в 1949 году фирма продемонстрировала гражданским и военным заказчикам «Супер ДС-3» с двигателями «Пратт-Уиттни» R-2000 мощностью 1450 л.с. и выше. Самолёт имел максимальную скорость более 400 км/ч с тридцатью пассажирами. Однако интерес к новой машине проявили только представители Военно-морских сил. В морской авиации эта машина получила индекс ЭР4Д-8, часть поставленных флоту машин была построена заново, часть получилась переоборудованием из существующих ЭР4Д-1 (глава 3.2). С 1962 года их индекс поменялся на Си-117Д.

Больше попыток возобновить серийный выпуск «Дугласа» не было, последующие варианты самолёта являлись следствием переоборудования.

В 1951 году Управление воздушным движением США пришло к ДС-3 самолётом, не имеющим срока годности. Тогда же Управление ВВС США наградило фирму за исключительные заслуги и назвало ДС-3 лучшим



Дуглас ДС-3 в Эфиопии, послевоенный снимок

самолётом всех времён. Со второй половины 50-х годов ДС-3 постепенно вытесняется на американских линиях более новыми машинами. Однако ещё в 1958 году самолёты этого типа перевезли в мире 400 миллионов пассажиров и представляли собой 35 % мирового гражданского авиапарка. Приведём несколько примеров использования этих машин.

В Англии авиакомпания БОАК уже в 1944 году наладила с помощью «Дугласов» сообщение между Лондоном и Лагосом (Нигерия). Затем, с прекращением военных действий, открылись линии в Стокгольм и на Ближний Восток.

Британская же компания БИА организовала полёты в Париж, Брюссель, Прагу, Амстердам и на внутренних линиях.

В Западной Германии ДС-3 применялся на внутренних маршрутах.

Бельгийская авиакомпания Сабена закупила последние серийные ДС-3; один из самолётов был разбит во время посадки в лондонском аэропорту Хитроу в 1948 году, остальные служили ещё не менее 10 лет.

По мере оснащения американских и европейских авиакомпаний новыми самолётами, прежние «Дугласы» продавались в страны «третьего мира». В Латинской Америке ДС-3 долетали и до XXI века.

Отдельная строка в биографии самолёта — военная служба после Второй Мировой войны и участие в военных конфликтах.

Уже в 1946 году начались разведывательные полёты самолётов бывших западных союзников над территорией стран «социалистического лагеря». В литературе говорится, что 4 американских самолёта типа ДС-3 были сбиты истребителями над Югославией.

В следующем году начался распад колониальных империй, была, в частности, утрачена «жемчужина британской короны» — Индия. Правда, в самой Индии обретение независимости сопровождалось гражданской войной между индустрами и мусульманами — это первая Индо-Пакистанская война. Английские «Дугласы» при этом перевозили мусульман с индийской территории в Пакистан, а обратно, из Пакистана в Индию, везли беженцев-индусов.

«Свою войну» в то же самое время вела в Индокитае и Франция. 200 Си-47 снабжали французский экспедиционный корпус оружием, топливом, продовольствием, вывозили раненых. Впрочем, европейское техническое превосходство не помогло: через восемь лет боевых действий

вьетнамские силы взяли последний оплот колонизаторов, укрепленный район Дьенбьенфу. Четыре французских Си-47 были сбиты партизанами.

1947 год интересен ещё и проведением большой американской антарктической экспедиции. В её проведении участвовали морские варианты ДС-3.

В том же году транспортные «Дугласы» снабжали продовольствием Западный Берлин, блокированный Советской Армией.

В «зону турбулентности» постепенно втягивались колонии и полуколонии Ближнего Востока и Северной Африки. В 1948 году египтяне заявили о сбитии английского разведывательного «Дугласа» над Каиром, а израильтяне — о том, что они сбили над Тель-Авивом «Дуглас» египетский.

Одним из результатов трехлетней кровопролитной Корейской войны стало уничтожение 11 американских и трёх греческих транспортных Си-47.

В 1952 году — очередной международный шпионский скандал: американцы при помощи Си-47 вывозили своего агента в Китае, а китайцы сбили самолёт и все, кто в нём летел, погибли.

В 1965 году, во время второй Индо-Пакистанской войны 6 самолётов Си-47 ВВС Индии были сожжены пакистанцами на аэродромах.

«Дугласы» широко применялись во время Вьетнамской войны. После того, как Вьетнам избавился от французской зависимости, по мирному договору провозглашалось существование двух вьетнамских государств: Северный Вьетнам, руководимый коммунистической партией, отходил к «социалистическому лагерю», а Южный Вьетнам оставался в «свободном мире». Между ними по джунглям должна была пролечь демилитаризованная зона. Однако в Южном Вьетнаме продолжали действовать партизаны, стремившиеся присоединить Юг к Северу, а с Севера через джунгли якобы демилитаризованной зоны было налажено снабжение партизан по так называемой «тропе Хошимина».

Соединенные Штаты решили вмешаться и навести в Индокитае порядок. Сначала они только снабжали режим в Сайгоне, поставив туда, в частности, 90 Си-47, а затем ввели в страну свои войска.

Совершенно перерезать «тропу Хошимина» так и не удалось, контроль над одним участком джунглей означал только то, что снабжение на юг шло по другим участкам, по территории Лаоса и (или) Камбоджи. Американцы пытались «отжать» регулярные силы Северного Вьетнама от линии разграничения, прочесывали джунгли Юга, по-

ливали их дефолиантами и бомбили всё, что движется. В войне участвовали авианосные ударные группировки ВМС США и стратегическая авиация. Всё было тщетно, война закончилась штурмом Сайгона армией северян в 1972 году.

Однако нас интересует история применения самолётов типа ДС-3. В конфликте участвовали пять основных вариантов этого самолёта: разведчик-корректировщик ЭРСи-47, самолёты электронной разведки Си-47П, ИСи-47, Си-47ЭН, ИСи-47Ку, самолёт радиоэлектронной борьбы Си-47М, транспортный ВиСи-47А, самолёт огневой поддержка ЭЙСи-47А.

Опыт Вьетнамской войны и, в частности, применения там таких, казалось бы, устаревших и медлительных самолётов, обширен и достоин самого пристального изучения. К сожалению, насколько известно автору этих строк, ни в СССР, ни после распада СССР такого изучения не проводилось. А между тем переводные источники говорят о том, что помощь «Дугласов» наземным подразделениям «южан» и американцев была весьма ценной.

Понятно, что транспортные машины были загружены перевозками разнообразных грузов и поисково-спасательными операциями. Разведчики должны были засекал всякие перемещения в джунглях и наводить на них наземные войсковые части или ударную авиацию. Самолёты электронной разведки и радиоэлектронной борьбы засекали активность передатчиков партизан и частей армии Севера и «забивали» эфир помехами. Оказалось, что небольшой и «тихий» самолёт не так-то просто сбить.

Особо следует обратить внимание на самолёт огневой поддержки. У него было имя собственное: «Ган боут» (пушечный корабль). В дверном проёме и (или) в окнах этого самолёта ставились трёхствольные пулемётные установки фирмы «Дженерал Электрик» (американцы называют установку «платформой»). Платформа связывалась через бортовой вычислитель с инфракрасным прицелом. Самолёты с таким вооружением барражировали над джунглями по ночам, засекая и расстреливая грузовики с оружием, едущие к партизанам. Эти же самолёты могли действовать и днём, «работая» в паре с наземным или с воздушным наводчиком. Ещё раз повторю, что результативность «Ган боутов» была высокой. Правда, вьетнамцы всё равно научились их обманывать. По ночам они разводили костры, накрывая их железными листами. Пулемёты «Дугласов» расстреливали листы, а не автомобили. ..

В 1970-е годы транспортные «Дугласы» применялись в конфликтах в Сомали и в Мозамбике. Последний военный эпизод их биографии — гражданская война в Никарагуа в 1977–79 годах.

Была ещё одна попытка модернизировать самолёт, вместо поршневых моторов на него попробовали ставить турбовинтовые. Однако заказчиков оказалось немного, а старые машины, с поршневыми моторами, постепенно списывались.

Тем не менее, в начале XXI века ещё летали 35 «Дугласов» ДС-3.

5. Особенности конструкции

Основной материал советского варианта ДС-3 — это листовая дюралюминий Д16Т. Силовые элементы (полки лонжеронов, часть кронштейнов и т.д.) выполнена из листовой стали 30ХГСА. Детали крепления проводки управления делались из литейного алюминиевого сплава Ал9. Применялся также сплав Ал7. Для изготовления кронштейнов и фитингов применялись ковкие алюминиевые сплавы АК6, АК8. Тяги управления из сплава А1. Обшивка элеронов и рулей направления тканевая.

В целом конструкция представляет собой некий канон, основу, по которой в дальнейшем выстраивались и все последующие советские транспортные самолёты, в том числе, и самые большие.

5.1. Рассмотрим для примера более подробно конструкцию крыла.

Крыло Ли-2 состоит из 3-х частей: центроплана и двух отделяемых частей крыла — ОЧК. Центроплан (рис. 1) присоединяется к фюзеляжу, внутри него находятся баки, на центроплан крепятся gondoly двигателей и шасси. В хвостовой части центроплана навешиваются взлётно-посадочные щитки. Сам центроплан состоит из трёх частей: носка, передней и хвостовой.

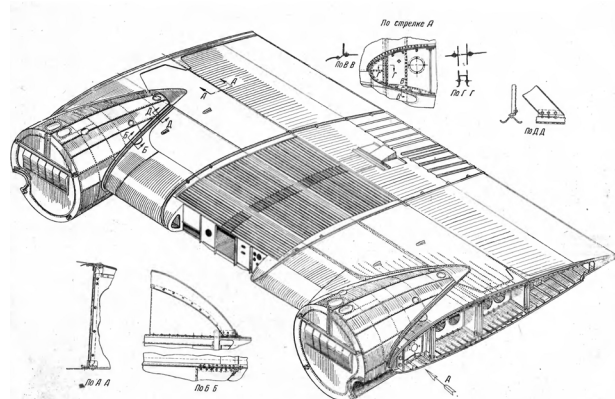


Рис. 1 Центроплан крыла

Носок центроплана не воспринимает нагрузку от крыла. Посередине носка сделан вырез для крепления фюзеляжа. Внутри носка проходит трубопровод горячего воздуха от двигателей.

Передняя часть центроплана силовая. Здесь проходят три основных лонжерона и передняя стенка. Верхняя обшивка передней части центроплана подкреплена гофрированным дюралевым листом, а нижняя шестнадцатью стрингерами из уголкового дюралюминиевого профиля.

Для соединения с обшивкой фюзеляжа к верхней поверхности центроплана приклепаны гнутые угольники из материала Д16Т. Такими же гнутыми угольниками к центроплану крепятся мотогондолы. В обоих случаях крепление осуществляется при помощи винтов.

Изгибающие моменты от крыла в центроплане воспринимаются лонжеронами. Лонжероны представляют собой сложные двутавровые балки, собранные на заклёпках из стенок (лист Д16Т толщина 1–2,5 мм) и полок (уголковый профиль из стали 30ХГСА). В местах сосредоточенных нагрузок или же в местах вырезов стенки лонжеронов усиливаются листовыми накладками на заклёпках. На концах лонжеронов к ним приклепаны фитинги из сплава АК8 под угольники разъёма ОЧК и центроплана.

На первый лонжерон через кронштейн крепится цапфа стойки шасси. Внешние концы лонжеронов усилены швеллерами, приклепанными на стенки. На стенки лонжеронов на заклёпках прикреплены уголки для крепления нервюр.

В передней части центроплана 20 нервюр. Нервюры не цельковые, а состоят из носка, первой и второй средних частей. Силовые нервюры под крепление шасси коробчатые, собраны из двух стенок, усиленных уголками. На них заклёпками крепятся кронштейны под навеску шасси.

Нормальные нервюры состоят из одной стенки, штампованной из листа Д16Т, с подкреплениями в виде уголков.

В центроплане есть и косяе нервюры, играющие роль стенок мотогондол.

Бачковые нервюры имеют

вырезы под баки.

Обшивка центроплана — это лист Д16Т, в носовой части толщина 1,5 мм, остальное — 0,8 мм. Носовая часть клепаётся заклёпками впотай, остальная — заклёпками с полукруглыми головками.

Гофр приклепывается с одной стороны к обшивке, с другой — к лонжеронам центроплана.

Снизу в центроплане сделаны 4 больших люка для установки бензобаков. Люки закрыты крышками на болтах диам. 8 мм. И болты, и крышки люков включены в силовую схему центроплана.

Хвостовая часть центроплана является отдельным технологическим агрегатом. Здесь мы имеем 18 нервюр поперечного набора и 20 стрингеров продольного. Из продольного набора 14 стрингеров расположены на верхней поверхности и 6 на нижней. Здесь же проложена труба привода взлётно-посадочных щитков.

Мотогондолы — это тоже отдельные агрегаты. Они состоят из обшивки, шпангоутов, лонжеронов, стрингеров, противопожарной стенки (жаростойкая сталь), кронштейнов крепления подмоторной рамы.

Отделяемая часть крыла (ОЧК) или консоль, (рис. 3), состоит из носка, передней части, хвостовой части и концевой обтекателя. В носке

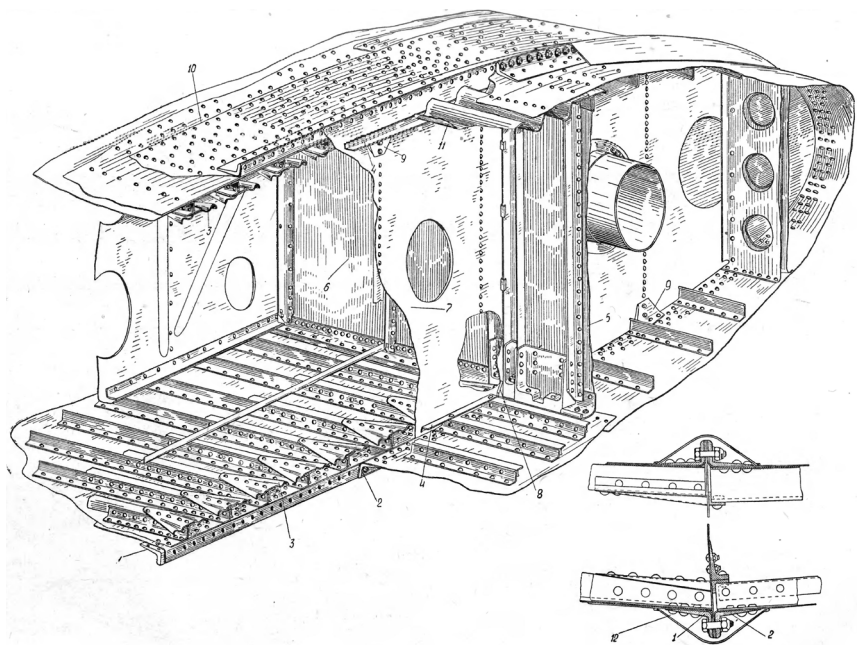


Рис. 2. Стык ОЧК и центроплана:

1 — стыковочный угольник крыла, 2 — стыковочный угольник центроплана, 3 — фитинги, 4 — упорный угольник, 5 — лонжерон центроплана, 6 — лонжерон крыла, 7 — нервюра разъёма, 8 — опорная пластина в лонжеронах, 9 — угольник для крепления нервюры разъёма, 10 — усиливающая накладка, 11 — гофр центроплана, 12 — зализ стыков

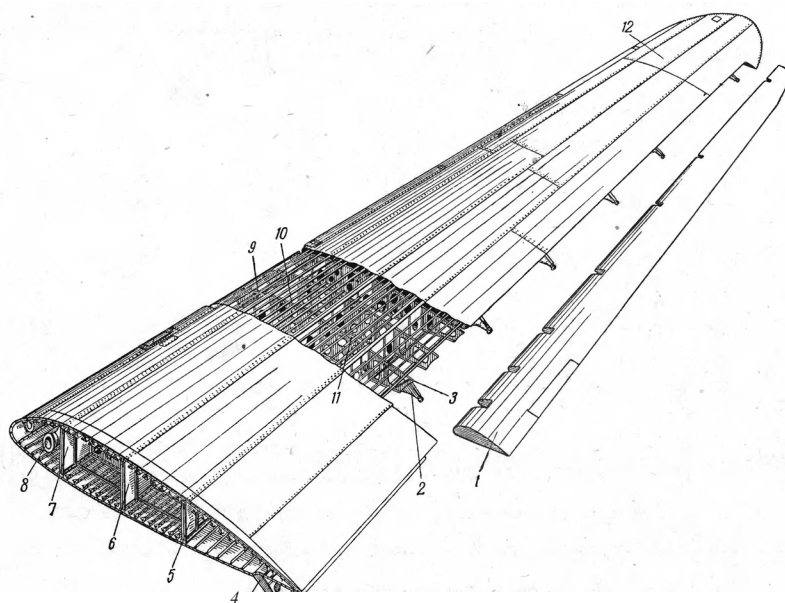


Рис.3. Отделяемая часть крыла (ОЧК):

1 — элерон, 2 — кронштейн навески элерона, 3 — хвостовая часть нервюры, 4 — щиток, 5, 6, 7 — лонжероны, 8 — трубопровод горячего воздуха, 9 — носовая часть нервюры, 10 — первая средняя часть нервюры, 11 — вторая средняя часть нервюры, 12 — концевой обтекатель крыла

крыла проходит трубопровод горячего воздуха и находится посадочная фара. В правой ОЧК установлен датчик потенциометрического дистанционного компаса.

Силовой является передняя часть ОЧК. В ней установлены 3 лонжерона. По размаху передняя часть ОЧК ограничена в комле нервюрой разъёма с центропланом (нервюра 1), а на конце — нервюрой разъёма с концевым обтекателем (нервюра 19).

Хвостовая часть ОЧК — всё, что расположено за задним лонжероном. От нервюры разъёма с центропланом до нервюры №6 в хвостовой части консоли крепится взлётно-посадочный щиток, а от нервюры №6 до концевого обтекателя — элерон.

Каркас передней части консоли состоит из продольного и поперечного наборов силовых элементов. В продольный набор входят три лонжерона, 25 сквозных и 16 укороченных стрингеров. Количество стрингеров уменьшается по мере сужения крыла.

Поперечный набор консоли состоит из 19 составных нервюр. В это число входят 5 усиленных нервюр с кронштейнами под навеску элерона.

Лонжероны ОЧК собраны на заклёпках из стенок и полок. Стенки — лист Д16Т, имеют по размаху технологические отверстия и усиления в виде отбортовок и накладок. В месте стыка ОЧК с

центропланом лонжероны усилены приклёпанными швеллерами и фитингами, к которым крепятся стыковочные уголки. На передний лонжерон между нервюрами №№ 18 и 19 приклёпан кронштейн для крепления швартовочного крюка. На заднем лонжероне таким же способом крепятся кронштейны для установки качалок управления элероном. На лонжеронах правой консоли дополнительно ставятся кронштейны управлением триммером элерона. На верхней поверхности консоли есть отверстия под лючки.

Концевой обтекатель состоит из продольного набора, поперечного набора и обшивки. Продольный набор — это 3 лонжерона и 13 стрингеров (7 сверху и 6 снизу). Поперечный набор — из 1 целиковой и 4-х составных нервюр. Нервюра №21 — силовая, имеет кронштейн под навеску элерона (рис. 4). Нервюра стыка с

ОЧК (№20) целиковая, на ней сделана отбортовка которая телескопически надевается на нервюру №19, принадлежащую консоли крыла и крепится к ней винтами М5 по анкерным гайкам.

На крыле установлены составные взлётно-посадочные щитки (рис. 5) с гидравлическим приводом. Два из них крепятся на центроплане, и ещё два — на консолях крыла. На рисунке показан щиток с центроплана. Он имеет несколько большую длину, чем щиток с консоли. Щитки приводятся в действие общей трубой, вращающейся в подшипниках от штока гидроцилиндра и соединённой с щитками через тяги и кронштейны. Поверхность крыла в месте прилегания щитков имеет фетровые прокладки.

Стык фюзеляжа с центропланом осуществляется при помощи 8-ми узлов (по 4 с каждого борта) и 2-х стыковочных угольников, приклёпанных к обшивке центроплана. Дополнительно в носовой и в хвостовой частях центроплан с фюзеляжем стыкуется специальными косынками и диафрагмами. Стыковочные узлы устанавливаются по осям основных лонжеронов центроплана и по передней стенке. По расположению все эти силовые элементы совпадают со шпангоутами №15, №17, №19, №21 фюзеляжа. На рис. 6 показано крепление центроплана к фюзеляжу по основ-

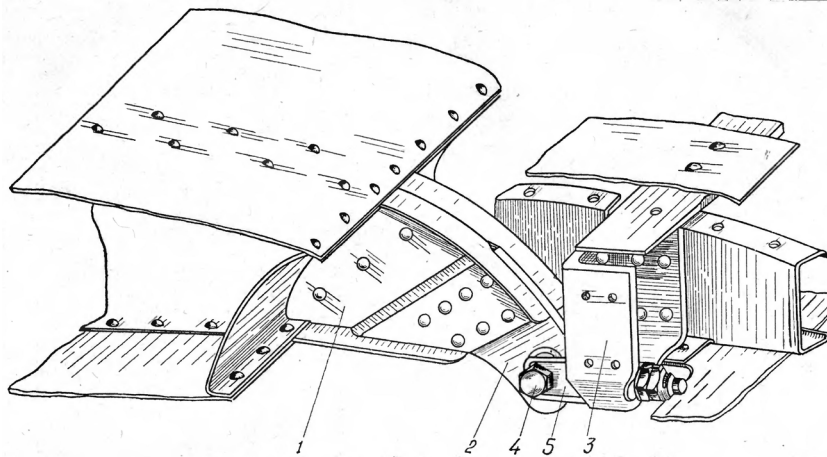


Рис. 4. Элерон, узел навески элерона на концевой обтекатель крыла:
 1 — нервюра крыла, 2 — пластина кронштейна навески элерона,
 3 — кронштейн элерона, 4 — шарнирный болт, 5 — вильчатый болт

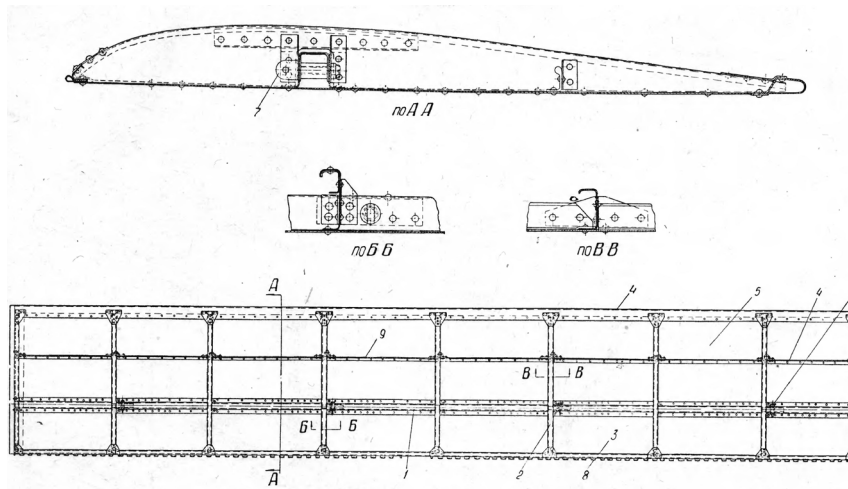


Рис. 5. Щиток:
 1 — лонжерон, 2 — нервюра, 3 — передний профиль, 4 — задний профиль,
 5 — обшивка, 6 — сварной узел, 7 — ушковый болт, 8 — петля,
 9 — стрингер

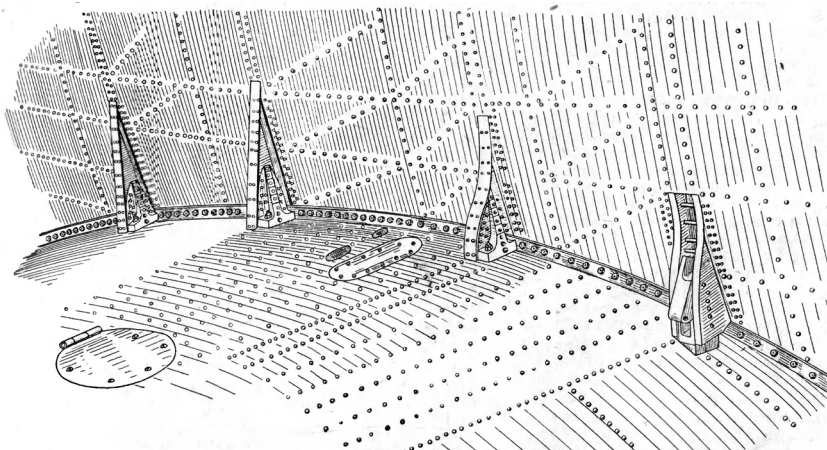


Рис. 6. Стык крыла и фюзеляжа по лонжеронам

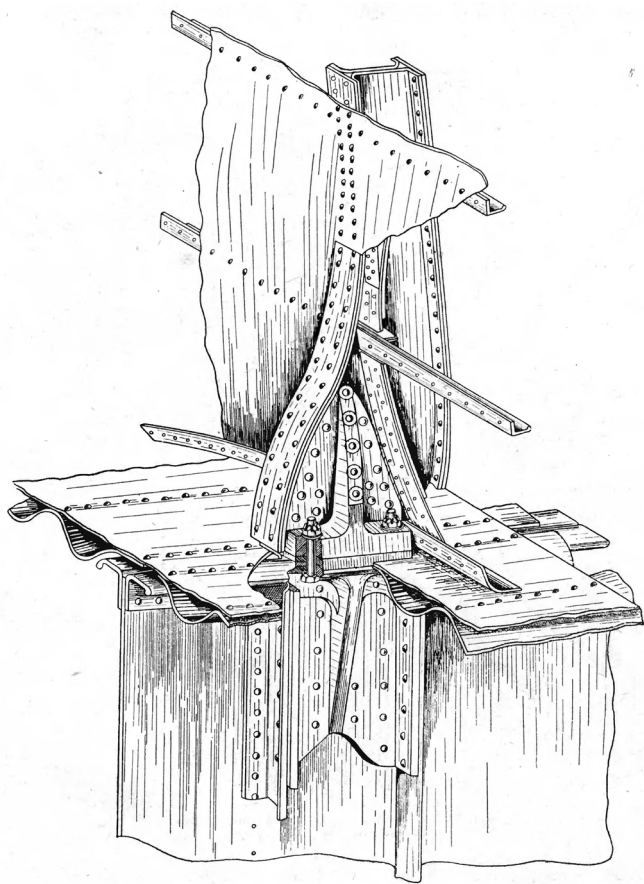


Рис. 7. Кронштейны и фитинги стыка крыла и фюзеляжа по стенке

ным трём лонжеронам центроплана, а на рис. 7 — по передней стенке центроплана.

На рис. 6 внизу виден гнутый угольник центроплана, который прикрепляется непосредственно к обшивке фюзеляжа при помощи 135 болтов М5.

Стыковочные узлы центроплана и фюзеляжа стягиваются между собой болтами из стали 30ХГСА с пределом прочности 120 кг/мм. На каждый узел по лонжеронам ставится по 4 таких болта с диаметром 10мм, на узел по стенке — 2 болта М8.

Дополнительное крепление по носку центроплана и по хвостовой части центроплана осуществляется при помощи диафрагм и козынок винтами М5.

Список использованных источников

1. Американские военные самолёты Второй Мировой войны. Под ред. Д. Дональда. М., 2002.
2. Английские военные самолёты Второй Мировой войны. Под ред. Д. Дж. Марча. М., 2002.
3. Д. Дорошкевич. Самолёты США Второй Мировой войны. Мн., 2003.
4. Ли-2 на войне. // Мир авиации. №/1999.
5. Кнатько Г., Семенёв В., Авиация — партизанам. Мн., НАРБ, 2005
6. В. Б. Шавров. История конструкций самолётов в СССР. 1938—1950 г.г. М., 1994.
7. Н. А. Якубовский, В. Н. Якубовский. Крылатые помощники партизан. Мн., 1998.
8. Н. А. Якубовский. Помощь советского тыла партизанам. Мн., 1973.
9. Самолёт Ли-2 техническое описание и руководство по эксплуатации. М., 1951.