

### **ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

*Мешалкин В. П.*

методы логистики ресурсоэнергосбережения  
как организационно-управленческие инструменты модернизации  
нефтегазохимического комплекса 4

*Ульев Л. М., Нечипоренко Д. Д.*

Энергосберегающий потенциал процесса гидроочистки на установке  
каталитического риформинга 20

*Подустов М. А., Дзевочко А. М., Литвиненко Е. И., Бабиченко Ю. А.,  
Черноног Р. С.*

Энерго- и ресурсосберегающие технологии в производстве поверхностно-активных  
веществ 29

### **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ**

*Капустенко П. А., Илюнин О. О., Перевертайленко А. Ю., Самер Лага*

Моделирование процесса непрерывного травления листовой углеродистой стали в  
условиях неопределенности 35

*Шапорев В. П., Себко В. В., Михайлюк В. М.*

Принципиальная схема реакторной установки для пиролиза твердых бытовых  
отходов в подвижном слое и экспериментально установленные особенности  
процесса 45

*Болюх В. Ф., Винниченко А. И.*

Концепция баллистического лазерного гравиметра повышенной эффективности 55

*Кравченко И. В.*

К вопросу о сосуществовании NO<sub>2</sub>, NO и O<sub>2</sub> 64

*Огурцов О. М., Масалітіна Н. Ю., Близнюк О. М.*

Моделювання кінетики дегідрування біополімерів ДНК стимульованого  
дисоціативним приєднанням електронів в технології модифікації матеріалів  
електронними збудженнями 72

### **ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

*Анипко О. Б., Хайков В. Л.*

Дефекты производства и старение как основные факторы возможного  
ненормального действия артиллерийских боеприпасов 80

<i>Борисюк М. Д., Вакуленко В. В., Бобер А. В., Зарянов В. А., Иванов Ю. П., Фолунин С. А.</i>	
О применении силовой установки с двигателем ЗТД-3А в бронетранспортере БТР-4Е	96
<i>Вакуленко В. В., Толстоуцкий В. А., Муцинский Ю. М., Герасименко В. И., Чучмарь И. Д.</i>	
Исследование возможности экономичного управления двигателем ЗТД-3А на изделии БТР-4	102
<i>Сядристый М. А., Федоренко Е. В., Воловик Н. В., Мормило Я. М., Рассказов И. И.</i>	
Анализ современных тенденций развития конструкций силовых установок моноблочного типа для колесных боевых бронированных машин	107
<i>Толстоуцкий В. А.</i>	
Исследование возможности динамического и экономичного управления трансмиссией БТР-4 с двигателем ЗТД-3А	117
<i>Рассоха А. Н., Черкашина А. Н., Храмова Т. И.</i>	
Влияние природы межфазного слоя на свойства фурано-эпоксидных композитов	124
<i>Хавина Д. Г.</i>	
Технико-экономические аспекты внедрения нового теплообменного оборудования	129

#### **СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ**

<i>Ковтонюк И. Б., Анипко О. Б., Иленко Е. Ю., Ковтонюк Я. И.</i>	
Статический показатель рациональности аэродинамической компоновки органов управления истребителя для оценки влияния принимаемых конструктивно-компоновочных решений на эффективность поперечного управления	135
<i>Сторінка редколегії</i>	139

## ЧЛЕНУ-КОРРЕСПОНДЕНТУ РАН В.П. МЕШАЛКИНУ – 70 ЛЕТ



Валерий Павлович Мешалкин – известный ученый в области химических технологий, предложивший и успешно развивающий новое научное направление исследований – теория синтеза (разработки структуры) и оптимального логистического управления эксплуатацией ресурсоэнергосберегающих высоконадежных экологически безопасных химико-технологических систем (ХТС) производств нефтегазохимического комплекса. Он автор более 790 научных трудов, в том числе 3-х монографий, 30-ти книг, учебников, учебных пособий, 15-ти авторских свидетельств и патентов; подготовил 9 докторов и 90 кандидатов наук.

В.П. Мешалкиным разработаны эвристическо-эволюционные и термодинамические методы синтеза оптимальных ресурсоэнергосберегающих неоднородных ХТС, теплообменных систем, систем ректификации многокомпонентных смесей и водопотребляющих ХТС; способы повышения ресурсоэнергоэффективности ХТС; новые конструкции ресурсоэнергоэффективных струйно-вихревых тепло-массообменных и фотохимических аппаратов; математические модели процессов кристаллизации металлических расплавов; методы физико-математического и компьютерного анализа текстуры и нейронно-сетевые методы прогнозирования свойств наноматериалов; методы компьютерного текстурно-фрактального анализа гидродинамики не-стационарных потоков; методы анализа и оптимизации надежности ХТС; принципы построения моделей представления неформализованных знаний и разработки экспертных систем в химической технологии; принципы логистики ресурсоэнергосбережения в нефтегазохимическом комплексе; методы ситуационного управления ХТС; магистральными трубопроводами и «зелеными» цепями поставок химической продукции; методы эколого-экономической оптимизации и процессно-структурного проектирования химических компаний.

Под руководством В.П. Мешалкина разработаны малоотходные технологические схемы и системы оптимального управления эксплуатацией ряда производств органических и неорганических продуктов; проекты стратегических программ повышения энергоресурсоэффективности промышленности Смоленской, Тульской и Кировской области. Научные исследования осуществляет в сотрудничестве с учеными Университетов Великобритании, Испании, Германии, Италии, Венгрии, Украины и Китая.

Профессор Мешалкин В.П. – директор Международного Института Логистики Ресурсосбережения и Технологической Инноватики, зав. кафедрой Логистики и экономической информатики РХТУ им. Д.И. Менделеева; гл. научный сотрудник ИОНХ им. Н.С. Курнакова РАН; зам. председателя Экспертного Совета по неорганической химии ВАК РФ; член редколлегии 7 российских и 2-х иностранных журналов. С 1997 г. – по н/в – координатор 4-х транс-европейских проектов по программам ЕС.

В.П. Мешалкин – Заслуженный деятель науки РФ, Лауреат Премии Президента РФ в области образования, Лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники, Почетный работник высшего профессионального образования РФ.

УДК 658.26:665.63

Мешалкин В.П.

**МЕТОДЫ ЛОГИСТИКИ РЕСУРСОЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ  
КАК ОРГАНИЗАЦИОННО-УПРАВЛЕНЧЕСКИЕ ИНСТРУМЕНТЫ  
МОДЕРНИЗАЦИИ НЕФТЕГАЗОХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

*Международный институт логистики ресурсосбережения  
и технологической инноватики*

*Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева*

Для успешного решения актуальных задач инновационного развития нефтегазохимических технологий и модернизации предприятий нефтегазохимического комплекса (НГХК) важное значение имеют современные методы логистики ресурсосбережения [1]. Химические предприятия, входящие в структуру нефтегазохимического комплекса (НГХК), представляют собой совокупность различного уровня сложности и способов функционирования химико-технологических систем (ХТС). Различного уровня сложности ХТС соответствуют либо технологическим блокам и технологическим узлам, входящим в состав технологических установок, либо технологическим установкам в целом, или производствам химических предприятий.

ХТС потребляют для выпуска разнообразных продуктов и полупродуктов огромные количества всех видов сырья, топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и конструкционных материалов, а также воды и воздуха. Расчет и оптимизация технологических режимов отдельных химико-технологических процессов (ХТП) и аппаратов без учета их взаимосвязей с остальными ХТП и аппаратами, входящими в ХТС данного производства, могут привести к неоптимальным значениям параметров технологических режимов и показателей эффективности функционирования всего производства, т.е. ХТС в целом. Исходя из особенностей способа функционирования отдельных ХТП и ХТС в целом, который характеризуется на определенном интервале времени законом изменения входных и выходных материальных потоков, т.е. входных и выходных переменных ХТС, а также составом выпускаемой продукции, выделяют следующие основные классы ХТС: непрерывные и периодические. Периодические ХТС (П-ХТС) для выпуска многоассортиментной продукции, способ функционирования которых характеризуется периодическим законом изменения во времени входных переменных и переменных состояния отдельных ХТП и ХТС в целом, подразделяют на следующие классы: индивидуальные, совмещенные и гибкие многоассортиментные ХТС производства малотоннажной продукции.

Гибкие многоассортиментные ХТС (ГМ-ХТС) принципиально дают возможность существенно интенсифицировать и повысить технико-экономические показатели эффективности производств различных малотоннажных продуктов.

Классификация передовых концепций и парадигм современной логистики и управления цепями поставок (ЦП) представлена на рис. 1

В условиях рыночной конкуренции изменились показатели эффективности функционирования предприятий НГХ комплекса как объектов промышленной логистики. Ранее в качестве основного традиционного показателя эффективности НГХ предприятий использовалось соотношение «затраты-выгоды», а увеличение объемов

выпуска продукции служило основой развития предпринимательской деятельности. В настоящее время для оценки экономической эффективности НГХ предприятий и цепей поставок ХП широко используются инновационные показатели: объем товарно-материальных запасов (ТМЗ), гибкость производства и цепи поставок, качество продукции, показатели надежности и безопасности производства, а также показатели воздействия производства на окружающую природную среду (ОПС), длительность производственного цикла и ресурсоемкость продукции. Совокупность традиционных и инновационных показателей эффективности позволяет комплексно оценивать экономическую эффективность предпринимательской деятельности НГХ предприятий и цепей поставок ХП в условиях рынка и необходимости обеспечения устойчивого экономического и социального развития.



Рисунок 1 – Классификация передовых концепций и парадигм современной логистики и управления цепями поставок

Предприятия НГХ комплекса как объекты промышленной логистики специального класса характеризуются следующими основными особенностями: быстрое изменение широкого ассортимента новых высококачественных материалов и веществ в соответствии с требованиями покупателей; сложность оптимального календарного и оперативного планирования выпуска многоассортиментной химической продукции при изменении видов сырья и покупательского спроса; сложность оптимальной организации упаковки, складирования и транспортирования химической продукции; комплексная оптимизация операций разработки, производства, продажи и использования химической продукции; необходимость оптимизации ТМЗ сырья, полупродуктов и ТЭР при обеспечении требуемого объема выпуска целевых продуктов; необходимость предотвращения образования в химико-технологических процессах (ХТП) производства источников отходов и выбросов, оказывающих вредное воздействие на окружающую

среду; необходимость обеспечения надежности и безопасности ХТП, аппаратов и машин химических производств для предотвращения аварий и снижения уровня химического риска; необходимость обеспечения ресурсосбережения на всех стадиях производства и во всех звеньях цепей поставок с целью сокращения удельных расходов сырья и ТЭР, а также выполнения требований защиты окружающей среды от загрязнений при выпуске высококачественной химической продукции.

С середины 1990-х годов активно развивается новое научное направление в промышленной логистике – логистика ресурсосбережения, которая изучает методы организации и управления проектированием инновационной продукции с оптимальной ресурсоемкостью; методы организации и управления разработкой ресурсосберегающих производственных технологий и ХТС для выпуска инновационной продукции; организационно-управленческие методы, способы и средства снижения материало-, ресурсо- и энергоемкости продукции в промышленности и в сфере услуг, т.е. во всех звеньях цепей поставок предприятий НГХ комплекса – «материально-техническое обеспечение - промышленное производство- распределение промышленной продукции»; оптимального планирования, организации и управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования предприятий НГХ комплекса; методы оптимального планирования и управления товарно-материальными запасами (ТМЗ); методы оптимального планирования и управления потребностями в материалах, сырье и ТЭР при производстве продукции; методы организации оптимального водопотребления на производстве, минимизации сточных вод и организации замкнутого водооборота; методы структурно-процентного проектирования ресурсосберегающих экологически безопасных цепей поставок, называемыми «зелеными» ЦП.

Ресурсосберегающие экологически безопасные ХТС, НГХ предприятия и цепи поставок ХП в целом являются объективным фактором устойчивого развития. Для практической реализации концепции устойчивого развития особую важность приобретает решение задач эколого-экономического анализа и оптимизации воздействия промышленных предприятий на окружающую природную среду. Методы эколого-экономической оптимизации предприятий и ЦП позволяют определять оптимально допустимый уровень воздействия газовых и жидких выбросов предприятий, а также твердых отходов на различные окружающие промышленное предприятие природные системы (леса, атмосферу, гидросферу и литосферу) при ограничениях на финансирование природоохранных мероприятий.

Комплексная проблема обеспечения оптимальных показателей удельной ресурсо-, энерго- и материалоемкости ХП организационно решается на всех этапах жизненного цикла производств НГХ комплекса и химической продукции (см. рис. 2). В настоящее время разработаны физико-химические и инженерно-технологические способы обеспечения ресурсосбережения как на производствах НГХ комплекса, так и в цепях поставок ХП (см. рис. 3). В научных основах обеспечения ресурсосбережения как на отдельных предприятиях НГХ комплекса, так и в цепях поставок ХП важное место занимают стратегии и методы логистики ресурсосбережения, а также методы организационного проектирования и управления «зелеными» цепями поставок ХП (см. рис. 4). При решении научно-практических задач логистики ресурсосбережения необходимо широко использовать современные информационные CALS-технологии при разработке инновационных технологических установок, а также для решения задач организации и управления производством программные комплексы планирования потребности материалов (MRP), планирования производственных ресурсов (MRP-II), планирования ресурсов предприятий (ERP), планирование потребностей распределения (DRP); для раз-

работки оптимальных технологических схем ХТС – программные комплексы информационных CASE-технологий и САPE-технологий.



Рисунок 2 – Основные этапы обеспечения оптимальных показателей удельной ресурсоемкости и энергоемкости химической продукции



Рисунок 3 – Классификация физико-химических и инженерно-технологических способов обеспечения ресурсосбережения на химических, нефтехимических, нефтеперерабатывающих и биохимических предприятиях

Предприятия НГХ комплекса производят разнообразную химическую продукцию (ХП): либо химические вещества и химические реактивы, либо химические материалы, например, горюче-смазочные, лакокрасочные материалы, пластмассы и др. Можно выделить два класса цепей поставок ХП предприятий НГХ комплекса: цепь поставок производимой ХП на предприятии-изготовителе и цепь поставок применяемой ХП на предприятии-потребителе, которое использует (применяет) эту ХП для производства некоторого конечного готового продукта.

Цепь поставок применяемой ХП, которая выпускается некоторым химическим предприятием, – это линейно упорядоченная взаимосвязанная совокупность юридических лиц, технических и транспортных средств, технологического оборудования, производственных сооружений и специальных информационно-коммуникационных устройств, которые обеспечивают движение и преобразование материальных потоков этой ХП при материально-техническом снабжении, транспортировании, хранении ТМЗ, использовании по назначению в производстве некоторого конечного продукта требуемого качества, переработке и захоронении (удалении) отходов от производственного применения по назначению этой химической продукции.

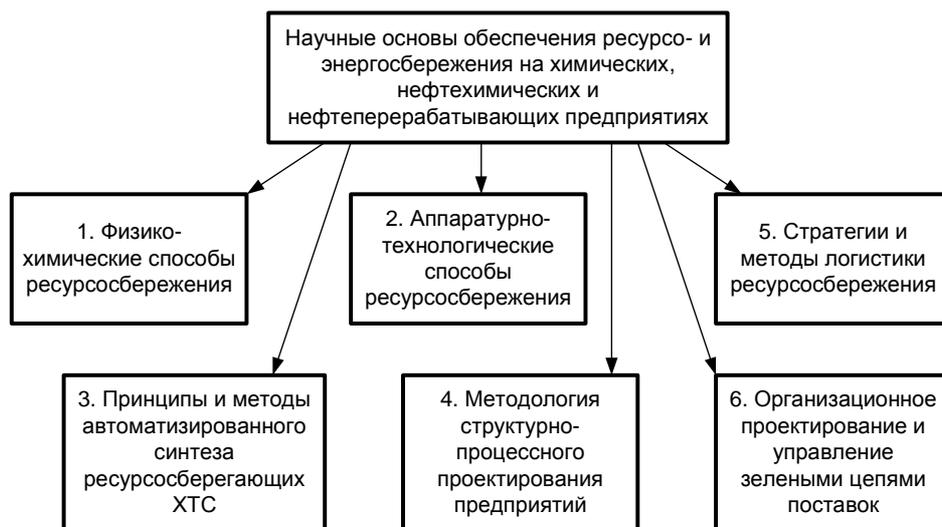


Рисунок 4 – Научные основы обеспечения ресурсоемкости и энергосбережения на предприятиях нефтегазохимического комплекса и цепях поставок химической продукции

Основным начальным этапом организационно-функционального проектирования оптимальной структуры цепей поставок, предприятий-производителей и предприятий-потребителей некоторой ХП является разработка рациональной схемы химического способа производства данной ХП, которая отображает взаимосвязь химических реакций, позволяющих синтезировать молекулы целевых веществ из молекул различного вида минерального или техногенного сырья.

В экономике каждому источнику минерального и техногенного сырья соответствует определенное предприятие добывающей или перерабатывающей промышленности. Выбор рациональной схемы химического способа производства ХП осуществляется химиками-технологами и специалистами по «зеленой химии», или промышленной экологии, при активном участии логистиков и специалистов по производственно-операционному управлению НГХ предприятий.

При выборе рациональных схем химического способа производства любой ХП необходимо учитывать воздействие химических процессов на окружающую природную среду (ОПС). Воздействие химических процессов на ОПС зависит не только от этих отдельных химических процессов, но и от того, насколько они в структуре ХТС взаимосвязаны с другими химическими процессами, а также с источниками минерального и техногенного сырья. Выявление тех химических процессов, которые могут быть эффективно объединены в общую цепь поставок, – это трудная творческая неформализо-

ванная задача. Выбор большинства экологически дружелюбных и наиболее экономически выгодных маршрутов химического синтеза – очень трудная неформализованная задача. Задача еще более усложняется, когда рассматривается полная цепь поставок (ЦП) производства некоторого продукта в некотором регионе или в целом в государстве. Для того чтобы изучить эту цепь поставок, требуется исследовать интегрированные топологические модели в виде различных классов материальных потоковых графов, энергетических потоковых графов и параметрических потоковых графов для различных предприятий в НГХ промышленности.

Такого типа топологические модели (или графы) в настоящее время уже разработаны. Так, например, учеными США разработаны основные модели материальных и энергетических потоков для более чем 400 ХТС, которые обеспечивают производство более чем 200 видов химических продуктов. Эти модели материальных и энергетических потоков взаимосвязанных ХТС соответствуют комплексным ЦП предприятий НГХ комплекса. Понимание составов и структуры взаимосвязей материальных потоков в этих ЦП может использоваться для принятия оптимальных организационно-управленческих и экономических решений различных уровней. Сначала материальные потоковые графы могут использоваться, просто чтобы определить потенциальных пользователей и поставщиков химических веществ и определить виды ХТС, которые стратегически взаимосвязаны.

Как только потребители и производители химических продуктов определены, могут использоваться материальные и энергетические потоковые графы, чтобы разработать физико-химическую структуру ЦП, являющуюся принципиальной научной основой для проектирования оптимальной организационно-функциональной структуры ЦП региона или государства в целом. Ученые Германии разработали модели физико-химической структуры ЦП, которые позволяют решать задачи минимизации расходов ТЭР, использования промежуточных токсичных веществ и использования хлора; проанализировали отклик ЦП на возмущения в поставке ТЭР и ограничения на использование токсичных веществ. Поиск эффективного использования побочных химических продуктов осуществляется в химической промышленности десятки лет. Относительно новым является поиск побочных химических продуктов для предприятий других отраслей перерабатывающей промышленности.

Задачи выбора оптимальной схемы химического способа производства ХП и задача проектирования оптимальной организационно-функциональной структуры ЦП предприятий-производителей данной ХП, а также задачи ситуационного управления цепями поставок ХП представляют собой сложные неформализованные задачи. Решение такого класса неформализованных задач осуществляется в режиме диалога лица, принимающего решение (ЛПР), и ПК с использованием эвристическо-вычислительных процедур. Указанные эвристическо-вычислительные процедуры реализуются с помощью гибридных экспертных систем и специальных языков программирования (объектно-ориентированных языков программирования и агентно-ориентированных языков программирования), а также специальных комплексов программ, реализующих методы смешанного линейного и нелинейного программирования. Эти специальные комплексы программ типа «ASPEN», «PRO», «HYSYS», «HYSIM» и др. относятся к современным программным средствам информационных технологий: «CAPE»-технологий и «CASE»-технологий. Ресурсосберегающая экологически безопасная, или «зеленая», ЦП – это не оказывающая вредного воздействия на окружающую природную среду замкнутая ЦП, в каждом звене которой используются производственно-технологические и организационно-управленческие процессы с минимальными отхо-

дами и потерями всех видов материалов и ТЭР, а также в организационной структуре которой наряду с главным прямым материальным потоком «источники сырья и ТЭР-производство-конечный пользователь готовой продукции» существует обратный материальный поток от потребителя готового конечного продукта к производству и/или к источнику сырья и ТЭП (см. рис. 5). Обратный материальный поток в «зеленой» ЦП позволяет реализовать производственно-технологические процессы и бизнес-процессы накопления отходов использованной готовой продукции, частичной повторной переработки или повторного использования отходов готовой продукции, а также возврат отходов готовой продукции на полную повторную переработку.

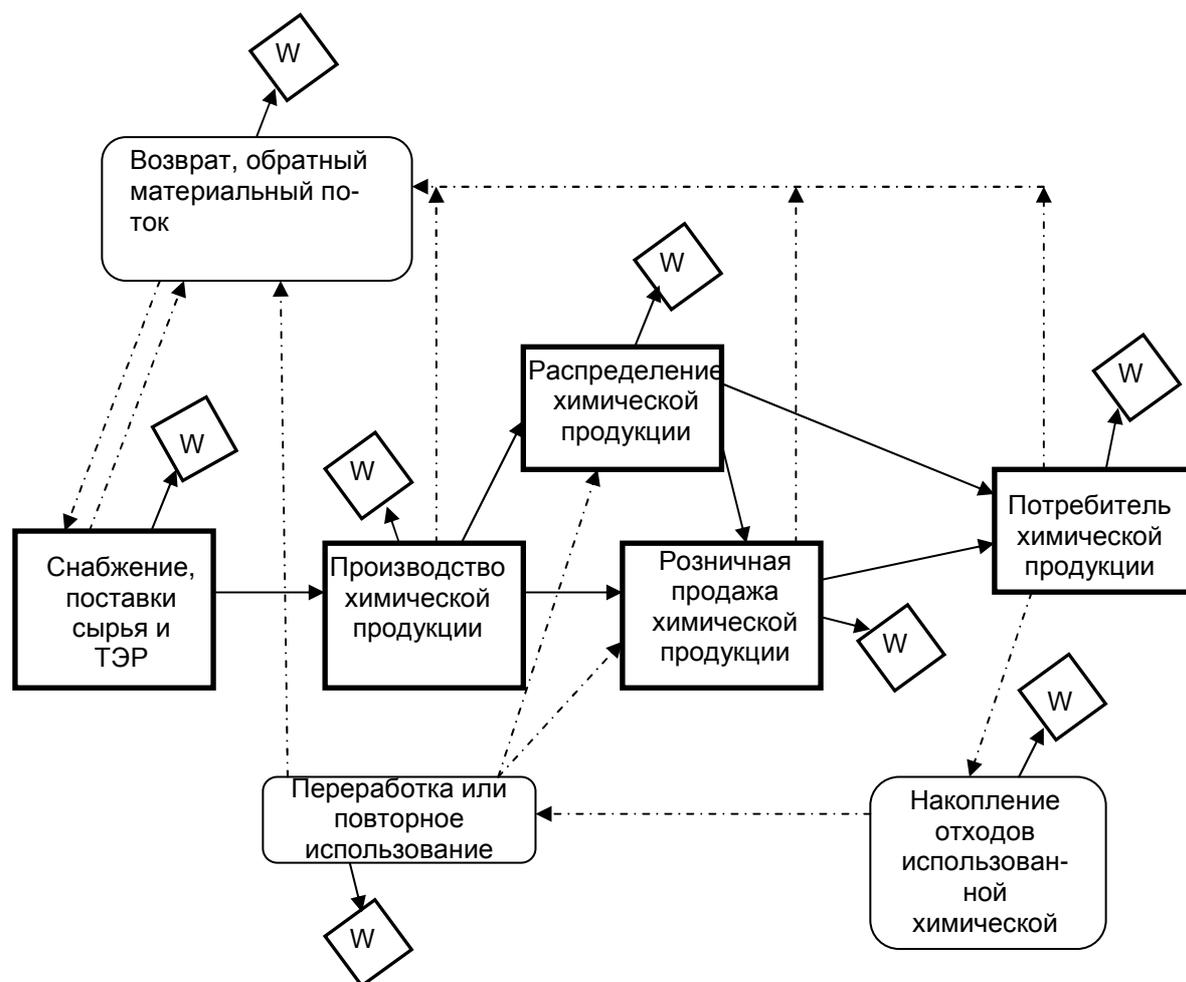


Рисунок 5 – Обобщенная блок-схема организационно-функциональной структуры ресурсосберегающей цепи поставок, или «зеленой» цепи поставок, предприятий нефтегазохимического комплекса

На рис. 5 представлена блок-схема организационно-функциональной структуры «зеленой» ЦП некоторой химической продукции. На рис. 6 представлена блок-схема методологии организационно-функционального проектирования «зеленой» цепи поставок предприятий НГХ комплекса.

Решения неформализованных задач выбора оптимальной организационно-функциональной структуры «зеленых» ЦП предприятий НГХ комплекса тесно взаимосвязаны с решением неформализованных задач разработки инновационной химической продукции (ХП) и ресурсосберегающих технологий производства этой ХП, а также за-

дач оптимального управления жизненным циклом ХП с применением информационных «CALS»-технологий.

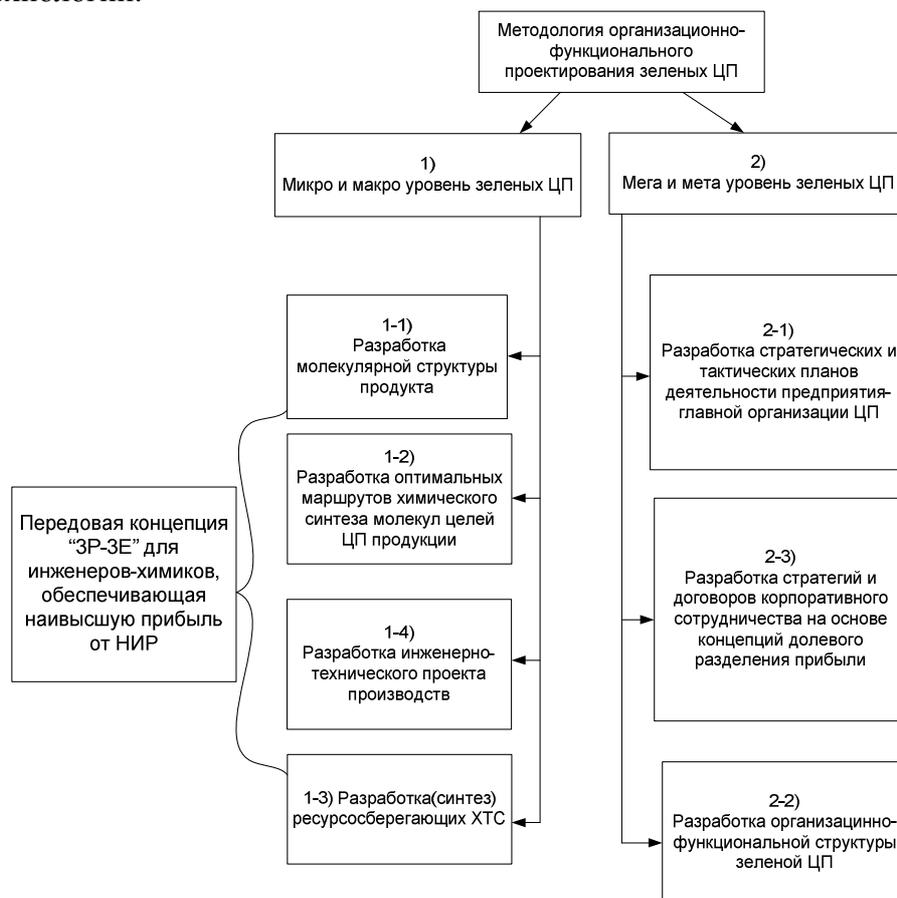


Рисунок 6 – Блок-схема методологии организационно-функционального проектирования зеленых ЦП

Целями организационно-функционального проектирования и управления эксплуатацией ЦП применяемой ХП является решение следующих проблем предприятия-потребителя данной ХП, которое изготавливает некоторый готовый продукт:

1. Обеспечение требуемого качества готового продукта.
2. Обеспечение оптимальной ресурсоемкости, энергоемкости и водоемкости готового продукта.
3. Минимизация всех видов отходов промышленного производства готового продукта.
4. Выполнение законодательных и административных требований по защите окружающей природной среды, охране здоровья и обеспечению безопасности жизнедеятельности (ОПС-ОЗ-БЖД) работников, а также требуемого уровня надежности производственных систем.
5. Оптимальный выбор требуемого множества видов химической продукции, т.е. требуемой области применения ХП, на предприятии-изготовителе конечного продукта, и выбор поставщиков химической продукции.
6. Минимизация общих затрат и повышение показателей конкурентоспособности предприятия-изготовителя за счет рационального использования ХП, имеющих требуемые физико-химические, технические и технологические характеристики и пока-

затели качества.

7. Оптимальное корпоративное сотрудничество в комплексной логистической цепи, или цепи поставок ХП, предприятия-производителя готовых конечных продуктов на основе стратегии долевого сбережения (ДС) предприятий-поставщиков химической продукции с предприятиями-потребителями этой ХП.

Каждое предприятие или организация, применяющая химическую продукцию, использует определенную стратегию управления ХП, точнее, стратегию управления цепями поставок ХП – либо разработанную специально, либо традиционную. Термин «стратегия управления цепями поставок химической продукции», или, более кратко, «стратегия управления ХП» обозначает систему, позволяющую обеспечить минимальные общие затраты (издержки) на использование ХП, наилучшие характеристики (показатели качества) ХП и наибольшие показатели эффективности ее использования. К сожалению, стратегия управления ХП, как правило (без принятия специальных мер), вырабатывается намного позднее выбора предприятием-потребителем ХП ассортимента выпускаемых продуктов и способов их производства. Как следствие, стратегия управления ХП существует как некоординированный случайный набор функций и обязанностей, распределенных между множеством сотрудников и подразделений предприятия-потребителя ХП.

Рассмотрим характеристику основных задач управления ЦП единственного вида ХП, использующегося на некотором предприятии-потребителе ХП:

1. Выбор «наилучшего» вида ХП. Данный вид ХП может выбираться отделом проектирования производственных процессов, фирмой-производителем оборудования и даже оператором оборудования. Решение может основываться на понимании технических требований используемого оборудования, но это ничем не отличается от использования ХП, «рекомендованной производителем», или того, который обычно использовался компанией.

2. Организация закупок ХП. Отдел закупок может найти поставщика ХП, предлагающего наиболее низкую цену. Или сотрудники могут задействовать традиционного поставщика ХП. Однако, тот вид ХП, который в конечном счете будет приобретен, может и не соответствовать в точности требуемым для данного предприятия характеристикам ХП.

3. Грузопереработка и хранение химической продукции. Персонал, задействованный в получении, грузопереработке и складировании ХП, может руководствоваться случайными методами управления ТМЗ и формирования повторных заказов.

4. Использование ХП по назначению в производстве. Операторы технологического оборудования или обслуживающий персонал могут нести ответственность за правильное использование ХП в производственном процессе, но при этом они могут руководствоваться устаревшими нормами и процедурами.

5. Обеспечение безопасности использования ХП. Сотрудники отдела охраны ОПС-ОЗ-БЖД обычно привлекаются для обеспечения безопасности и соблюдения нормативов при использовании и захоронении химического продукта (для осуществления контроля, обучения персонала, мониторинга, оформления документации, составления отчетов и т.п.) уже после выбора вида ХП.

Если распространить эти задачи на сотни и тысячи видов ХП, используемых на среднем производственном предприятии, то становится очевидным, что рост затрат и проблем при использовании ХП практически невозможно контролировать, и он создает объективную постоянную угрозу предпринимательскому процессу и обеспечению конкурентоспособности предприятия-потребителя ХП.

Стратегия управления цепями поставок применяемой ХП – это совокупность долгосрочных принципов, установок и правил взаимодействия предприятий-потребителей и предприятий-поставщиков некоторой ХП, которая необходима для выпуска готового продукта на предприятии-потребителе этой химической продукции.

В настоящее время целый ряд предприятий-изготовителей (поставщиков) ХП в результате использования новых принципов корпоративного сотрудничества с предприятиями-потребителями ХП осуществляют следующие инновационные виды деятельности в целях поставок ХП:

1. Постоянно ищут способы сократить номенклатуру и объемы потребления ХП, необходимой для производства готового продукта или услуг требуемого качества;

2. Помогают усовершенствовать производственные операции на предприятиях-потребителях ХП с целью уменьшения количества ХП, попадающей в отходы при производстве готового продукта;

3. Постоянно ищут возможности улучшить качество готового продукта и ценность, которую этот продукт может представлять для конечного потребителя;

4. Обеспечивают предприятие-потребитель ХП дополнительными ресурсами для управления ХП и охраны ОПС, а также повышают эффективность этой деятельности, в то же время позволяя администрации предприятия-потребителя ХП экономить средства;

5. Регулярно собирают сведения об использовании ХП, уровне ТМЗ и предоставляет эти данные предприятию-потребителю в случае их необходимости для экологического аудита и эффективного управления поставками химической продукции.

Такие инновационные виды деятельности предприятий-поставщиков ХП обусловлены тем обстоятельством, что для управления цепями поставок производимой ХП используется инновационная стратегия поставок ХП, которая называется «управление цепями поставок химической продукции на основе корпоративной стратегии долевого разделения прибыли (ДРП)», т.е. стратегии распределения прибыли «win-win» («моя прибыль-твоя прибыль»). Сущность корпоративной стратегии управления ЦП производимой ХП «win-win» состоит в следующем: поставщикам ХП предоставляется непосредственное доленое финансовое участие в прибыли от повышения эффективности использования химической продукции на предприятии-потребителе ХП. Такая корпоративная стратегия долевого разделения прибыли «win-win» не только дает ключевые выгоды при управлении предприятием-потребителем ХП, включая снижение эксплуатационных затрат и повышение производительности, но и в значительной степени повышает экологические показатели (эко-эффективность) предприятия-потребителя.

Многие предприятия используют разнообразную ХП в своих производственных операциях по выпуску готовых продуктов или предоставлению услуг. Спектр ХП может быть очень широк – от ХП, которая непосредственно становится частью готовой продукции, такой как лако-красочные материалы (ЛКМ), пленкообразующие материалы и пластики, до веществ, используемых в различных производственных и вспомогательных операциях: растворителей, смазочно-охлаждающих эмульсий, моющих средств, масел и т.д.

В настоящее время использование ХП связано на предприятиях-потребителях с появлением разнообразных взаимосвязанных проблем, трудностей и ростом затрат. Под последними подразумеваются затраты на закупку химической продукции, управление ТМЗ, соблюдение нормативов по охране ОПС-ОЗ-БЖД, захоронение (или удаление) отходов и множество других действий, связанных с использованием ХП. Эти затраты предприятия-потребителя ХП далеко не минимальны – в действительности, они в

несколько раз могут превосходить закупочную цену самой ХП, причем эти затраты могут возникать даже несмотря на самые лучшие намерения и усилия как потребителя, так и поставщика ХП.

С конца 1990-х годов ряд передовых компаний США широко используют инновационную корпоративную стратегию управления цепями поставок ХП «win-win», которая обеспечивает уменьшение объемов использования ХП, общих затрат на использование ХП, и повышение эффективности использования ХП в нескольких инновационных компаниях. Эта новая стратегия «win-win» позволяет разработать важные рекомендации для управляющих всех уровней и функциональных подразделений компании, включая отделы защиты ОПС-ОЗ-БЖД, отделы закупок, производственный отдел, инженерно-технический отдел, отдел технического обслуживания и другие подразделения предприятий-потребителей ХП.

Нескольким предприятиям-потребителям ХП в США, которыми являются: Navistar International, завод по производству двигателей; General Motors Corporation, завод по сборке грузовых автомобилей и автобусов; Ford Motor Company, сборочный автомобильный завод в Чикаго; Chrysler Corporation, сборочный завод Belvidere; General Motors Corporation, подразделение производства электродвигателей, удалось в конце 1990-х годов достичь существенного снижения затрат на использование ХП за счет корпоративных ДС с предприятиями-производителями этой ХП.

С середины 1990-х годов за рубежом для оптимизации деятельности многоассортиментных предприятий химической промышленности, с успехом применяются следующие логистические стратегии: «точно в срок» («Just In Time», «JIT»), «планирования потребности в материалах» («Material Requirements Planning», «MRP»), «оптимизированной производственной технологии» («Optimized Production Technology», «OPT»), «планирования потребностей распределения» («Distribution Requirements Planning», «DRP»), «планирования ресурсов предприятия» («Enterprise Resource Planning», «ERP») и логистическая концепция «стройного» производства («lean production»), т.е. производства с минимальным объемом всех видов запасов; логистическая стратегия «стройной 6-сигма» («Lean Six-sigma») управления ЦП, которая обеспечивает получения «нуля»-дефектов в ЦП. Дефекты определяются потерями (затратами) времени, денег, неудовлетворенностью потребителей, нарушениями-отказами различных показателей производственно-технологических процессов и бизнес процессов. Точнее стратегия 6-сигма гарантирует наличие не более 3,4 дефекта (отказа) на  $10^6$  возможных проверок.

Одним из важнейших факторов обеспечения эффективности и конкурентоспособности ЦП предприятий НГХ комплекса является использование концепции «всеобщего управления качеством» («Total Quality Management», «TQM»), предполагающей внедрение на предприятии совокупности взаимосвязанных процедур и методик, которые обеспечивают реализацию политики предприятий НГХ комплекса и в ЦП в области качества и выпуска продукции с требуемым уровнем качества. Основные принципы концепции TQM состоят в следующем: цели предприятия соответствуют интересам потребителей; руководство предприятия играет ведущую роль в разработке стратегии управления качеством; все сотрудники предприятия привлечены к управлению качеством; принятие управленческих решений строится на основе анализа данных и информации; деятельность по улучшению качества – это непрерывный процесс; управление качеством осуществляется на основе системного подхода; поставщики материальных ресурсов – это партнеры, с которыми поддерживаются долгосрочные корпоративные взаимовыгодные отношения.

Управление качеством и использование стратегии «стройной» 6-сигма в управле-

нии ЦП необходимо рассматривать по отношению к каждому компоненту этой ЦП, а именно, к качеству производственных технологий, к качеству готовой продукции и к качеству обслуживания покупателей. Поэтому в соответствии с концепцией TQM и стратегией «стройной 6-сигма», учитывая большое количество промежуточных звеньев в ЦП, гарантией высокого качества ХП станет обеспечение качества начиная «с источника» ЦП, где поставщик обязан предоставить сырье и ТЭР требуемого качества, что позволит исключить приемочный (входной) контроль у производителя ХП и, таким образом, устранить возможные дефекты, отказы и простои производства, связанные с несоответствием поставляемого сырья и ТЭР стандартам и технологическим требованиям.

Одной из наиболее эффективных методик, обеспечивающих достижение вышеуказанной цели обеспечения качества и устранения дефектов в ЦП на всех стадиях жизненного цикла ХП и в каждом компоненте ЦП, является применение информационных CALS-технологий как при проектировании новых производств НГХ комплекса, так и при оптимизации и реорганизации работы уже действующих предприятий.

Первые разработки промышленных систем на основе CALS-технологий стали проводиться в США с середины 1980-х годов, причем изначально аббревиатура CALS расшифровывалась как Computer Aided Logistics Support – автоматизированная система поддержки логистических решений. Однако с середины 1990-х годов расширился круг вопросов, рассматриваемых в рамках CALS-технологий, и аббревиатура CALS получила новое толкование: Continuous Acquisition and Life Cycle Support – система непрерывного накопления информации и поддержки жизненного цикла продукции.

С использованием CALS-технологий создается и поддерживается интегрированное электронное описание продукции, технологических процессов и схем на всех стадиях жизненного цикла инновационного ХП, включая предварительные маркетинговые исследования; поиск и синтез химического вещества с требуемыми свойствами; проектирование и планирование производства; разработку оптимальной ХТС, обеспечивающей выпуск качественной продукции с использованием ресурсосберегающих технологий; материально-техническое снабжение производства сырьем и ТЭР; распределение готовой продукции, а также переработку отходов после использования.

Следует особо отметить, что гарантией стабильно высокого качества выпускаемой ХП, пользующейся спросом у потребителей, является логистическое управление согласованной деятельностью всех подразделений предприятий и звеньев ЦП.

Необходимо особо подчеркнуть, что качество химической продукции оказывает непосредственное влияние на качество ОПС – важнейший фактор обеспечения качества жизни населения и устойчивого развития страны [3]. Под качеством ОПС понимается соответствие условий среды обитания человека его потребностям, включая требуемый уровень качества воды, воздуха, почвы и природной среды в целом.

Одним из основных критериев деятельности химического предприятия является оценка его воздействия на ОПС, причем главной целью предприятия должно стать уменьшение ущерба, наносимого ОПС химическим предприятием НГХ комплекса и выпускаемой им продукцией во всех компонентах ЦП предприятия: от поставки сырья и ТЭР до переработки отходов использованной химической продукции.

Следует отметить, что помимо применения систем управления качеством выпускаемой ХП важным фактором роста конкурентоспособности, экономической эффективности и экологической безопасности химических предприятий и ЦП являются: создание для всей ЦП системы управления качеством ОПС, которая будет гарантировать согласованность действий различных подразделений предприятия с государственными и общественными организациями, занимающимися экологическим аудитом,

оценкой и предотвращением ущерба природной среде в данном регионе или стране.

Под системой управления качеством ОПС, или системой экологического менеджмента (*environmental management system*), понимается целостная совокупность взаимосвязанных правил, норм, методов и методик, которые обеспечивают обоснованность разработки и выбора оптимальных технологических и организационно-управленческих решений по планированию и практической реализации мероприятий по контролю параметров состояния ОПС и ее защите от загрязнений.

Стратегия устойчивого развития современных химических предприятий должна включать следующие операции обеспечения требуемого качества химической продукции, производственных технологий и ОПС: регулярное проведение тщательного анализа воздействия химико-технологических процессов, ХТС предприятия и всех компонентов ЦП на ОПС; использование ресурсосберегающих технологий и ХТС, позволяющих увеличить степень переработки сырья и ТЭР, снизить или полностью устранить выбросы, стоки и отходы, способные причинить вред окружающей среде; обеспечение надежности и безопасности работы технологического оборудования с целью предотвращения аварий и связанных с ними выбросов в ОПС вредных химических веществ; сокращение потребления опасного и вредного сырья, частичная или полная замена его безвредными.

Прогрессивные показатели для измерения характеристик устойчивости развития некоторого действующего предприятия подразделения или некоторого бизнес-процесса в НГХ комплексе представлены в виде трех групп: показатели состояния ОПС, или природно-ресурсные показатели, экономические показатели и социальные показатели, которые отражают три основных компонента устойчивого развития.

Не все прогрессивные показатели устойчивого развития могут быть применимы для каждого предприятия, действующего подразделения, технологической операции или бизнес-процесса. Чтобы осуществить сбалансированный анализ показателей устойчивости развития, необходимо выбрать основные, или ключевые, показатели в каждой из трех областей, связанных с технологической или предпринимательской деятельностью человека: ОПС, экономической и социальной.

Большинство прогрессивных показателей устойчивости развития рассчитываются в виде соответствующих относительных коэффициентов. Относительные индексы, или показатели, могут быть выбраны для обеспечения измерения независимости воздействия от масштаба технологической операции, или чтобы оценить затраты по сравнению с прибылью, и в некоторых случаях они могут сделать возможным сравнение различных операций между собой. Например, воздействие на ОПС по отношению к стоимости продукции или обслуживания является хорошей мерой экологической эффективности, или эко-эффективности, предприятия. Стоимость продукции на рынке или обслуживания – это добавленная стоимость и это в основном используемый масштабный фактор. Однако добавленную стоимость иногда бывает сложно оценить точно, поэтому могут использоваться показатели-заменители, такие, как чистый объем продаж, прибыль или даже масса продукции предприятия.

В современной теории управления ЦП для оценки результативности и эффективности функционирования ЦП рекомендовано использовать двенадцать ключевых методик (см. рис. 7). Передовые концепции эффективного управления конкурентной способностью предприятий и ЦП нефтегазохимического комплекса основаны на выравнивании (тесном сближении) стратегий управления предприятиями с позиций охраны окружающей среды (с позиций экологического менеджмента) и с позиций управления цепями поставок.





Рисунок 8 – Принципы управления цепями поставок. Выравнивание стратегий управления предприятиями с позиции охраны окружающей среды и с позиции управления цепью поставок

### Литература

1. Мешалкин В.П. Ресурсоэнергоэффективные методы энергообеспечения и минимизации отходов нефтеперерабатывающих производств: МОСКВА-ГЕНУЯ, <ХИМИЯ>.- 2010.- 393с.
2. Мешалкин В.П., Дови' В., Марсанич А. Принципы промышленной логистики.- Москва/Генуя, «РХТУ», 2002.- 727 с.
3. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Анализ и синтез химико-технологических систем: Учебник для вузов. – М.:«Химия», 1991. – 432 с.
4. Мешалкин В.П. Экспертные системы в химической технологии. Основы теории, опыт разработки и применения. – М.: «Химия», 1995. – 368 с.
5. Мешалкин В.П., Дови' В.Г., Марсанич А. Стратегия управления логистическими цепями химической продукции и устойчивое развитие – Москва/Генуя, «РХТУ», 2003.- 531 с.
6. Саркисов П.Д., Мешалкин В.П. Бережливое богатство. Ресурсосбережение – важнейший фактор экономической эффективности работы химических предприятий. Журнал “Российское предпринимательство”.– №9.– 2001. – с. 10–15.
7. Мешалкин В.П. Компьютерная интеграция процессов предпринимательства в логистических системах предприятий химических отраслей промышленности. – Труды междунар. науч.-практич. конференции «Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности» (МНПК ЛЭРЭП-2002): Т.1/Под ред. В.П. Мешалкина, И.В. Зайцевского, О.Д. Проценко; «РХТУ им. Д.И. Менделеева». – М., 2002. – с. 14–24.

8. Мешалкин В.П., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., КАПУСТЕНКО П.А. Основы теории ресурсосберегающих интегрированных химико-технологических систем. – Харьков: «НТЧ-ХПИ».– 2006.– 412 с.
9. Кравченко К.А., Мешалкин В.П. Организационное проектирование и управление развитием крупных компаний.– М.: «Академический проект».– 2006.– 528 с.
10. Степанов В.И. Логистика: – М.: «Проспект».– 2006.– 488 с.
11. Уотерс Д. Логистика. Управление цепью поставок.– М.: «ЮНИТИ».– 2003.– 503 с.
12. Кристофер М. Логистика и управление цепочками поставок, – М.: «ПИТЕР», 2004. –316 с.
13. Martin J.M. Lean Six sigma for Supply Chain Management. –New York: «Mc Graw Hill».– 411 с.
14. Мешалкин В.П., ДЛИ М.И. Логистика и управление конкурентоспособностью предприятий нефтехимического комплекса: МОСКВА-ГЕНУЯ.– ХИМИЯ.– 2010.– 453 с.

Bibliography (transliterated)

1. Meshalkin V.P. Resursojenergojeffektivnye metody jenergoobespechenija i minimizacii othodov neftepererabatyvajushhijh proizvodstv: MOSKVA-GENUJA, <HIMIJA>.– 2010.– 393с.
2. Meshalkin V.P., Dovi' V., Marsanich A. Principy promyshlennoj logisti-ki.– Moskva Genuja, «RHTU», 2002.– 727 p.
3. Kafarov V.V., Meshalkin V.P. Analiz i sintez himiko-tehnologicheskijh sistem: Uchebnik dlja vuzov. – М.:«Himija», 1991. – 432 p.
4. Meshalkin V.P. Jekspertnye sistemy v himicheskoj tehnologii. Osnovy teo-rii, opyt razrabotki i primenenija. – М.: «Himija», 1995. – 368 p.
5. Meshalkin V.P., Dovi' V.G., Marsanich A. Strategija upravlenija logisticheskimi cepjami himicheskoj produkcii i ustojchivoe razvitie – Moskva Genuja, «RHTU», 2003.– 531 p.
6. Sarkisov P.D., Meshalkin V.P. Berezhlivoe bogatstvo. Resursosberezhenie – vazhnejshij faktor jekonomicheskoj jeffektivnosti raboty himicheskijh predpriyatij. Zhurnal “Ros-sijskoe predprinimatel'stvo”.– #9.– 2001. – p. 10–15.
7. Meshalkin V.P. Komp'juternaja integracija processov predprinimatel'stva v logisticheskijh sistemah predpriyatij himicheskijh otraslej promyshlennosti. – Trudy mezhdunar. nauch.-praktich. konferencii «Logistika i jekonomika resursosberezhenija i jenergosberezhenija v promyshlennosti» (MNPК LJeRJeP-2002): T.1 Pod red. V.P. Meshalkina, I.V. Zajcevskogo, O.D. Procenko; «RHTU im. D.I. Mendeleeva». – М., 2002. – p. 14–24.
8. Meshalkin V.P., Tovazhnjanskij L.L., Kapustenko P.A. Osnovy teorii resursosberegajushhijh integrirovannyh himiko-tehnologicheskijh sistem. – Har'kov: «NTCh-HPI».– 2006.– 412 p.
9. Kravchenko K.A., Meshalkin V.P. Organizacionnoe proektirovanie i upravlenie razvitiem krupnyh kompanij.– М.: «Akademicheskij projekt».– 2006.– 528 p.
10. Stepanov V.I. Logistika: – М.: «Prospekt».– 2006.– 488 p.
11. Uoters D. Logistika. Upravlenie cep'ju postavok.– М.: «JuNITI».– 2003.–503 p.
12. Kristofer M. Logistika i upravlenie cepochkami postavok, – М.: «PITER», 2004. – 316 p.
13. Martin J.M. Lean Six sigma for Supply Chain Management. –New York: «Mc Graw Hill».– 411 с.

14. Meshalkin V.P., Dli M.I. Logistika i upravlenie konkurentosposobnost'ju predpriyatij neftehimicheskogo kompleksa: MOSKVA-GENUJa.– НІМІJa.– 2010.– 453 с.

УДК 658.26:665.63

Мешалкін В.П.

**МЕТОДИ ЛОГІСТИКИ РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ  
ЯК ОРГАНІЗАЦІЙНО-КЕРІВНИЧІ ІНСТРУМЕНТИ МОДЕРНІЗАЦІЇ  
НАФТОГАЗОХІМІЧНОГО КОМПЛЕКСУ**

Розглянуто логістику ресурсоенергозбереження як інноваційний науковий напрям у промисловій логістиці стосовно промислових комплексів нафто газохімічного сектору. Описано шляхи рішення комплексної проблеми забезпечення оптимальних показників питомої ресурсо- та енергоємності хіміко-технологічних процесів. Визначено показники сталого розвитку, які доцільно використовувати для нафто газохімічного комплексу.

Meshalkin V.P.

**THE RESOURCE- AND ENERGYSAVING LOGISTICS METHODS AS MANAGING  
AND ORGANIZING TOOLS FOR OIL–GAS CHEMICAL BRANCH**

The resource- and energy saving logistical methods as innovative scientific branch in industrial logistic is considered according to oil–gas chemical plants. The ways of optimal specific resource- and energy processes consumption problem decision are described. The indicators of sustainable developments for oil–gas chemical branch plants are defined.

УДК 658.26:665.63:338.45

Ульєв Л.М., Нечипоренко Д.Д.

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ ПРОЦЕССА ГИДРООЧИСТКИ НА  
УСТАНОВКЕ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА**

**Введение.** Не смотря на то, что в Украине приняты и действуют Закон "Об энергосбережении", целый ряд ГОСТов в области энерго- и ресурсоиспользования, работает Государственный Комитет по энергосбережению, в стране сохраняется тенденция к росту энергоемкости продукции, которая появилась в Украине после экономического спада 1989 г. Даже в сравнении со странами СНГ и другими странами с переходной экономикой, этот показатель остается выше.

В 1987 г. энергоемкость внутреннего валового продукта (ВВП) Украины составляла 1,53 кг.у.т./дол. Это значительно превышало данный показатель ведущих стран мира (США – 0,81 кг.у.т./дол., Германия – 0,49 кг.у.т./дол., Великобритания – 0,47 кг.у.т./дол., Франция – 0,32 кг.у.т./дол.). За 20 лет этот показатель в Украине снизился и в 2006 г. составил 0,89 кг.у.т./дол. Снижение произошло за счет уменьшения производства. В Германии за этот период энергоемкость ВВП уменьшилась до 0,19.

Существуют другие методики оценки энергоэффективности экономики. Например, по потреблению единиц нефтяного эквивалента на 1 доллар продукции с учетом паритета реальной покупательной способности. Для Украины этот показатель составляет 0,50 кг нефтяного эквивалента на 1 доллар. Среднее значение этого показателя в мире составляет 0,21 кг.н.э./дол., в Дании – 0,13 кг.н.э./дол., Великобритании – 0,14; ФРГ, Японии, Франции – 0,16; США – 0,22; России – 0,49 кг.н.э./дол. [1].

По этой методике отставание энергоэффективности экономики Украины от ведущих стран мира менее существенно, но все равно по энергоемкости ВВП в 2,5 раза выше.

Неэффективное внутренне потребление топливно-энергетических ресурсов требует значительного их импорта – более 50 %. В связи с последним увеличением цен на импортный газ возросло и внимание к проблемам энергоэффективности.

Нефтяная и нефтехимическая отрасли промышленности Украины являются одними из самых более энергоемких производств, и уровень энергозатрат в значительной степени влияет на себестоимость готовой продукции [2].

Наиболее энергоемкими в вышеперечисленных отраслях промышленности являются процессы гидрокрекинга, каталитического крекинга и риформинга, коксования, производства масел.

Снижение удельного энергопотребления можно достичь путем модернизации отдельных систем производства, установок и заводов в целом, а также совершенствованием отдельных производственных операций.

Литературные данные, опубликованные в различных источниках [3–9], говорят, что применение пинч-анализа в среднем приводит к снижению стоимости потребляемой энергии на (30–50) % и значительно снижаются капитальные затраты при создании новых предприятий.

Поэтому применение методов теплоэнергетической интеграции практически на всех установках нефте- и газоперерабатывающих заводах, построенных во времена относительно дешевых энергоносителей, приведет к значительному снижению удельного энергопотребления.

В данной работе анализируется энергопотребление на установке каталитического риформинга Л-35-11/600.

**Экстракция технологических данных.** Установка каталитического риформинга Л-35-11/600 предназначена для переработки широкой фракции прямогонного бензина с температурой 85–180 °С методом каталитического риформирования с целью получения компонентов бензина с октановым числом по моторному методу 78–85 пунктов.

Привязка установки осуществлена институтом ВНИИПКнефтехим г.Киева, в настоящее время Укрнефтехимпроект. Генеральный проектировщик – АО «Укрнефтехимпроект» г. Киев.

Установка каталитического риформинга состоит из шести отделений:

- блока гидроочистки сырья;
- блока каталитического риформинга;
- блока деэтанзации и стабилизации катализата;
- узла приготовления и подачи хлорорганики;
- узла осушки водородосодержащего газа риформинга;
- узла газгольдеров водородосодержащего газа.

Для того чтобы выполнить пинч-проектирование установки целиком необходимо провести пинч-диагностику и выполнить пинч-проектирование для всех блоков установки [4].

В представленной работе более детально проведено обследование блока гидроочистки сырья.

Гидроочистка – это процесс удаления из сырья сернистых и азоткислородосодержащих соединений.

Блок гидроочистки сырья установки Л-35-11/600 состоит из отпарной колонны К-1, где происходит стабилизация гидрогенизатов и отпаривание воды, реактора гидроочистки Р-1, где на алюмокобальтмолибденовом катализаторе происходит гидроочистка сырья, абсорбера К-2 очистки циркулирующего газа гидроочистки, абсорбера К-3 очистки углеводородного газа, а также теплообменных аппаратов.

Используя данные технологического регламента и литературные и справочные данные, а также интервьюирование технологов и проектировщиков, были установлены параметры технологических потоков, которые могут быть включены в интеграцию.

Поток № 1 – нестабильный гидрогенизат с Р-1. Выходит из реактора Р-1, охлаждается и направляется в сепаратор С-1.  $T_S = 309$  °С,  $T_T = 68$  °С,  $G = 56$  т/ч.

Поток № 2 – водородосодержащий газ гидроочистки. Направляется с С-1 на компрессоры гидроочистки.  $T_S = 68$  °С,  $T_T = 22$  °С,  $G = 6,7$  т/ч.

Поток № 3 – пары верха К-1. Охлаждаются и направляются из колонны К-1 в сепаратор С-2.  $T_S = 93$  °С,  $T_T = 38$  °С,  $G = 14$  т/ч.

Поток № 4 – стабильный гидрогенизат. Выходит с низа колонны К-1, охлаждается и направляется в тройник смешения риформинга.  $T_S = 210$  °С,  $T_T = 116$  °С,  $G = 47$  т/ч.

Поток № 5 – сырье гидроочистки. Газосырьевая смесь направляется в реактор Р-1 на гидроочистку.  $T_S = 42$  °С,  $T_T = 310$  °С,  $G = 56$  т/ч.

Поток № 6 – загрузка К-1. Направляется из сепаратора С-1 в колонну К-1.  $T_S = 68$  °С,  $T_T = 106$  °С,  $G = 50$  т/ч.

Поток № 7 – подогрев низа К-1. Проходит через ребойлер Т-3.  $T = 210$  °С,  $G = 34$  т/ч.

Поток № 8 – Горячая струя К-1. Выход из колонны К-1 подогревается в печи П-2 и возвращается обратно в колонну.  $T_S = 206 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_T = 211 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 82 \text{ т/ч}$ .

Поток № 9 – газ в печи П-1. Технологический газ риформинга используется как топливо печей.  $T_S = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_T = 144 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 3 \text{ т/ч}$ .

Оборотная вода. Охлаждающая вода оборотного цикла.  $T = 14\text{--}16 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 1150 \text{ т/ч}$ .

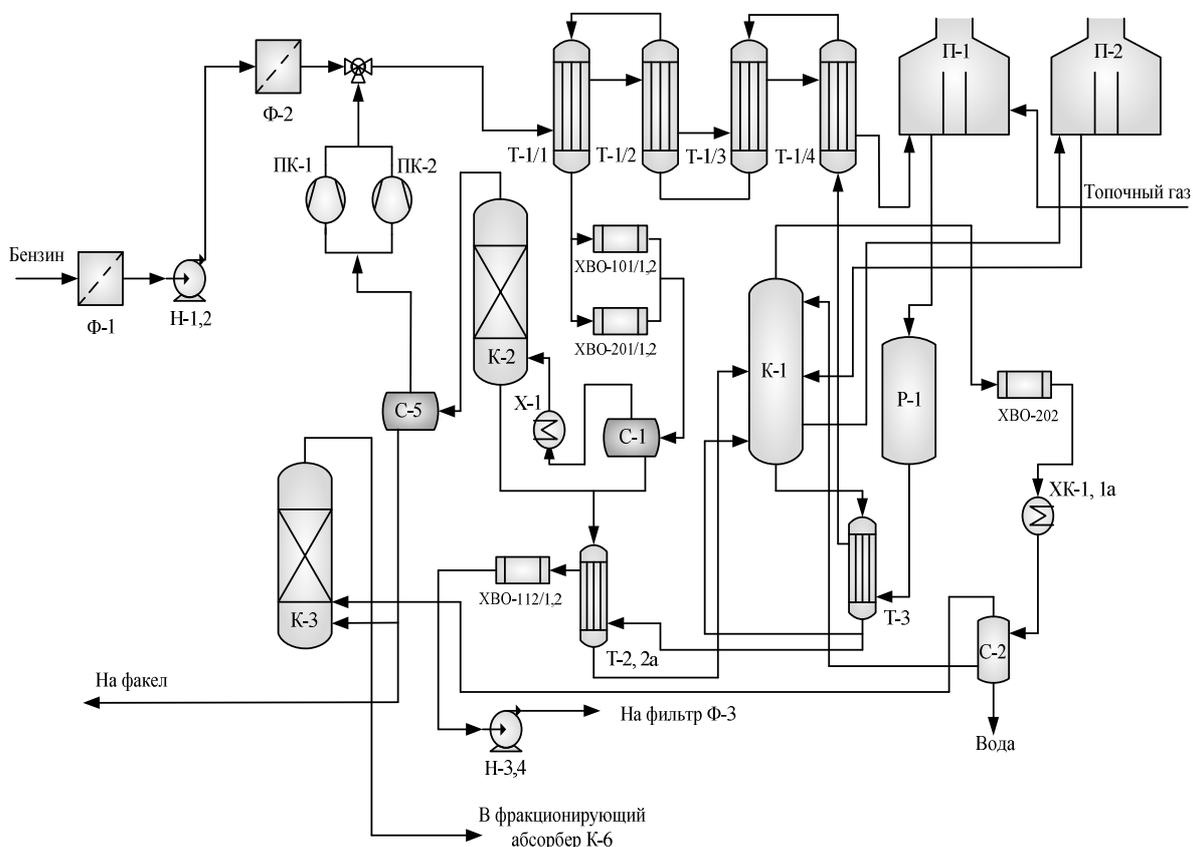


Рисунок 1 – Блок гидроочистки сырья технологической схемы установки Л-35-11/600

К-1 – отпарная колонна; К-2 – абсорбер очистки циркулирующего газа гидроочистки; К-3 – абсорбер очистки углеводородного газа; Н – насосы П-1 – печь риформинга и гидроочистки; ПК – компрессоры; Р-1 – реактор гидроочистки; С – сепараторы; Т-1/1 – Т-1/4 – кожухотрубчатые теплообменники; Х – кожухотрубчатые холодильники ХВО – холодильники воздушного охлаждения; ХК – кожухотрубчатые конденсаторы; Ф – фильтры, Е – емкости

Используя результаты изучения технологической схемы, регламента, составим таблицу потоковых данных, необходимых для определения тепловой мощности потребляемой предлагаемым процессом гидроочистки сырья (таблица 1).

В целом, в распоряжении есть 4 горячих технологических потоков и 5 холодных технологических потоков с определенными потоковыми данными.

Для дальнейшего анализа необходимо определить величину мощности рекуперации в существующем процессе [6].

**Определение энергосберегающего потенциала.** Построим популяцию горячих и холодных технологических потоков по таблице 1 на сеточной диаграмме согласно с

температурными интервалами в которых расположены исследуемые потоки. Сеточная диаграмма существующей сетки теплообмена показана на рисунке 2.

По измеренным температурам технологических потоков и их потоковым теплоемкостям определяем нагрузку каждого из рекуперативных теплообменников.

Таблица 1 – Система потоков для анализа энергопотребления блока гидроочистки сырья установки Л-35-11/600

	Название потока	тип	$T_s, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_T, \text{ }^\circ\text{C}$	$G, \text{ т/ч}$	$r, \text{ кДж/кг}$	$CP, \text{ кВт/К}$	$\Delta H, \text{ кВт}$	$\alpha, \text{ кВт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
1	Нестабильный гидрогенизат из Р-1	гор	309	250	56,224		59,33	3500,71	0,28
			250	200	56,224		54,11	2705,48	0,28
			200	150	56,224		49,43	2471,50	0,28
			150	100	56,224		44,67	2233,36	0,28
			100	68	56,224		40,81	1305,85	0,28
2	Газ из С-1	гор	68	22	6,684		4,68	215,22	0,06
3.1	Охлаждение паров К-1	гор	93	50	13,91		9,74	418,69	0,02
3.2	Конденсация паров К-1	гор	50	50	13,91	75		289,79	1
3.3	Охлаждение конденсата пара К-1	гор	50	38	13,91		8,97	107,66	0,4
4	Стабильный гидрогенизат из К-1	гор	210	150	46,771		44,26	2655,43	0,1
			150	116	46,771		36,51	1241,26	0,1
5	Сырье гидроочистки	хол	42	100	56,224		39,58	2295,46	0,28
			100	150	56,224		44,65	2232,61	0,28
			150	200	56,224		49,40	2470,09	0,28
			200	250	56,224		54,07	2703,41	0,28
			250	310	56,224		59,33	3559,59	0,28
6	Загрузка К-1	хол	68	106	49,95		35,45	1346,93	0,1
7	Ребойлер К-1	хол	210	210	34,018	75		2551,37	0,12
8	Горячая струя К-1	хол	206	211	81,697		82,54	412,68	0,6
9	Газ к печам	хол	23	144	2,9764		2,08	252,10	0,06

После определения и суммирования тепловых нагрузок всех теплообменных аппаратов получена мощность рекуперации, равная примерно 12 МВт.

Горячие утилиты в процессе, который мы рассматриваем, составляют величину 5,68 МВт, а холодные утилиты – 4,99 МВт.

Используя данные из табл. 1 и сеточной диаграммы (рис. 2), строим на энтальпийно-температурной диаграмме горячую и холодную составные кривые выбранной системы технологических потоков [7–9]. Расположение кривых должно быть таким, чтобы интервал перекрытия между ними составлял рассчитанную величину рекуперации мощности, как показано на рис. 3.

Для разработки теплообменной сетки необходимо будет создать новую теплообменную сетку, используя основные принципы пинч-проектирования теплообменных систем. Для этого сначала необходимо определить  $\Delta T_{\min}$  для теплообменной сети, которую будем создавать, и определить удельные стоимости теплообменной поверхности для каждого технологического потока, который включается в интеграцию.

Проекция горячей составной кривой на энтальпийную ось равна значению 4,99 МВт – это та мощность, которую необходимо отвести от процесса для возможности его функционирования.

Проекция холодной составной кривой на энтальпийную ось составляет величину 5,68 МВт – это та полезная мощность, которую необходимо подвести к установке для осуществления процесса.

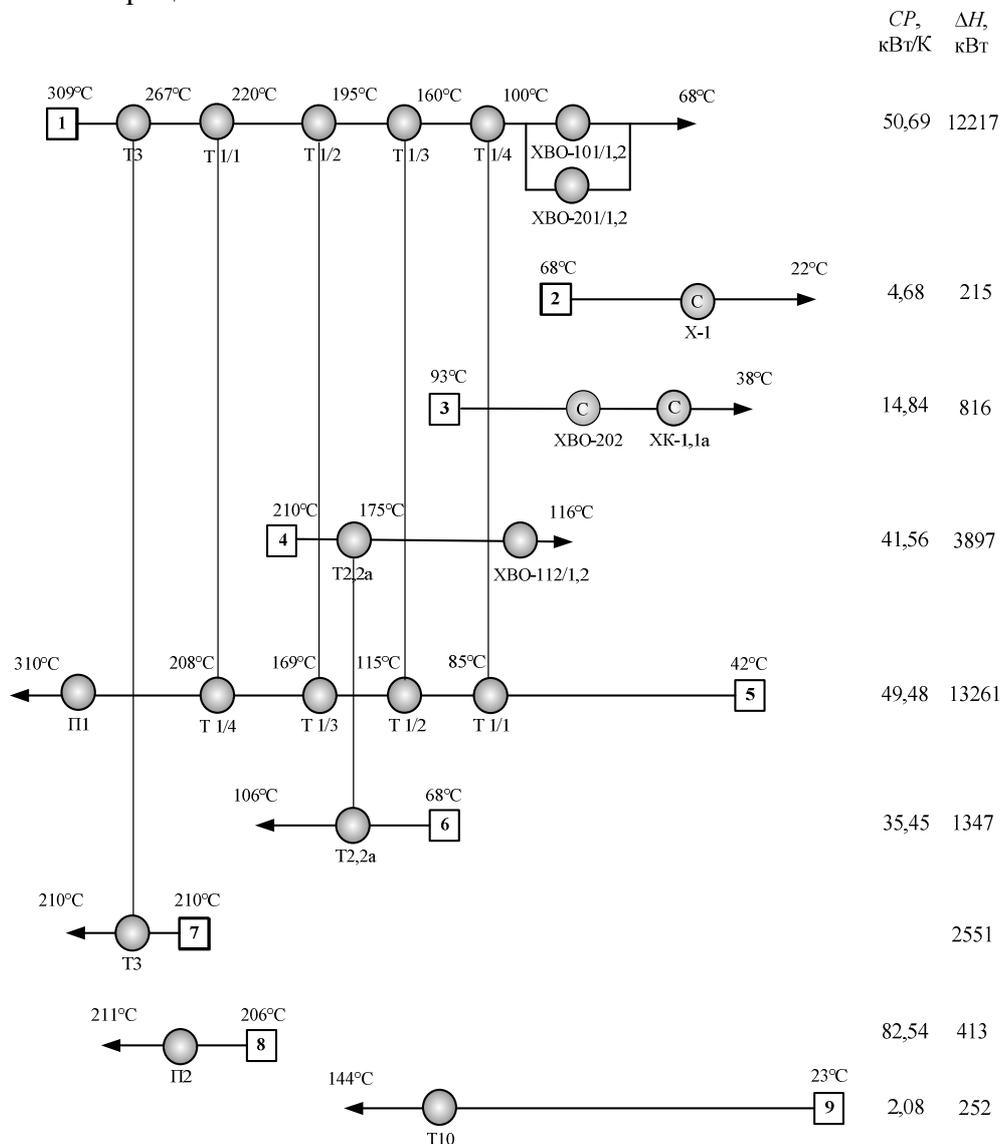


Рисунок 2 – Существующая в настоящее время система теплообмена блока гидроочистки сырья установки Л-35-11/600

1–4 – горячие потоки; 5–9 – холодные потоки;  $CP$  – потоковая теплоемкость;  $\Delta H$  – тепловые нагрузки для каждого потока

Наименьшее расстояние между кривыми по оси ординат – температурной оси показывается областью пинча выбранной системы технологических потоков. В нашем случае пинч локализуется на температурах:  $T_{H\text{ pin}} = 261\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{C\text{ pin}} = 206\text{ }^\circ\text{C}$  Разница температур в области пинча равна  $\Delta T_{\text{min}} = 55\text{ }^\circ\text{C}$

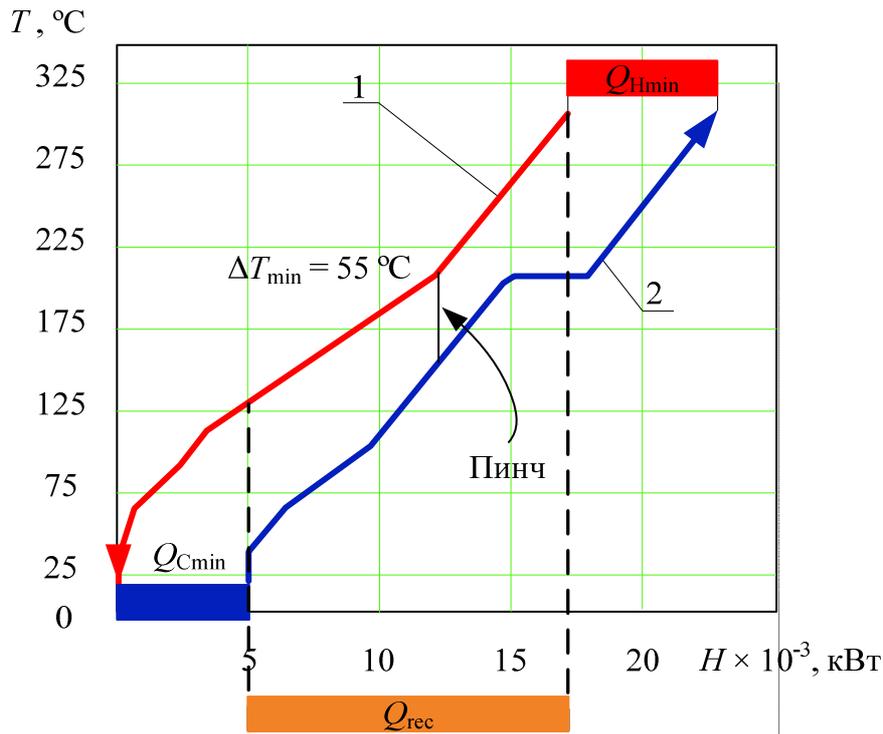


Рисунок 3 – Составные кривые существующего процесса гидроочистки сырья  
 1 – составная кривая горячих потоков; 2 – составная кривая холодных потоков;  
 $Q_{Hmin}$ ,  $Q_{Cmin}$ ,  $Q_{rec}$  – потребляемая мощность горячих утилит, холодных утилит  
 и мощность рекуперации  
 $Q_{Hmin} = 5,68$  МВт,  $Q_{Cmin} = 4,99$  МВт,  $Q_{rec} = 12,21$  МВт

Для снижения энергопотребления в химико-технологической системе (ХТС) необходимо уменьшение минимальной разности температур  $\Delta T_{min}$  между теплоносителями в теплообменных аппаратах. Это достигается путем сближения составных кривых вдоль энтальпийной оси.

Для того, чтобы экономически оптимально интегрировать рассматриваемый процесс, нам необходимо выяснить наиболее важные экономические значения, существенно влияющие на приведенную стоимость выполненного проекта.

Стоимость горячих утилит, использованных в процессе, примем равной 258 долл. США за 1 кВт год, с учетом того, что в году 8000 рабочих часов.

Стоимость холодных утилит принимаем на порядок меньшей, то есть 0,1 стоимости горячих утилит, что дает значения 25,8 долл. США за 1 кВт год.

Используя цены на теплообменное оборудование, полученные от его производителей, можно еще до выполнения проекта реконструкции оценить необходимые капиталовложения и срок их окупаемости [8]. Итак капитальную стоимость одного теплообменного аппарата можно определить выражением:

$$\text{Кап.стоимость} = A_T + B_T (S)^c,$$

где  $A_T = 5000$  долл. США – стоимость установки одного теплообменного аппарата, для пластинчатых теплообменных аппаратов  $A_T = 5000$  долл. США;  $B_T$  – коэффициент,

эквивалентный стоимости  $1 \text{ м}^2$  площади поверхности теплообмена, для кожухотрубчатых теплообменных аппаратов  $B_T = 500$ , для пластинчатых  $B_T = 800$ ;  $S$  – площадь поверхности теплообмена теплообменного аппарата;  $c$  – коэффициент, отражающий нелинейную зависимость стоимости теплообменника от величины его поверхности теплообмена. Для кожухотрубчатых теплообменников, как правило,  $c = 0,87$ .

Будем считать, что для выполнения проекта предприятие берет в банке кредит сроком на 5 лет с 10 % кредитной ставкой.

Расчет дисконтированных величин стоимостей проекта процесса гидроочистки сырья позволяет определить значение минимальной разности температур между теплоносителями в будущей системе рекуперации тепловой энергии с учётом существующего теплообменного оборудования,  $\Delta T_{\min} \approx 8^\circ \text{C}$  (рис. 4).

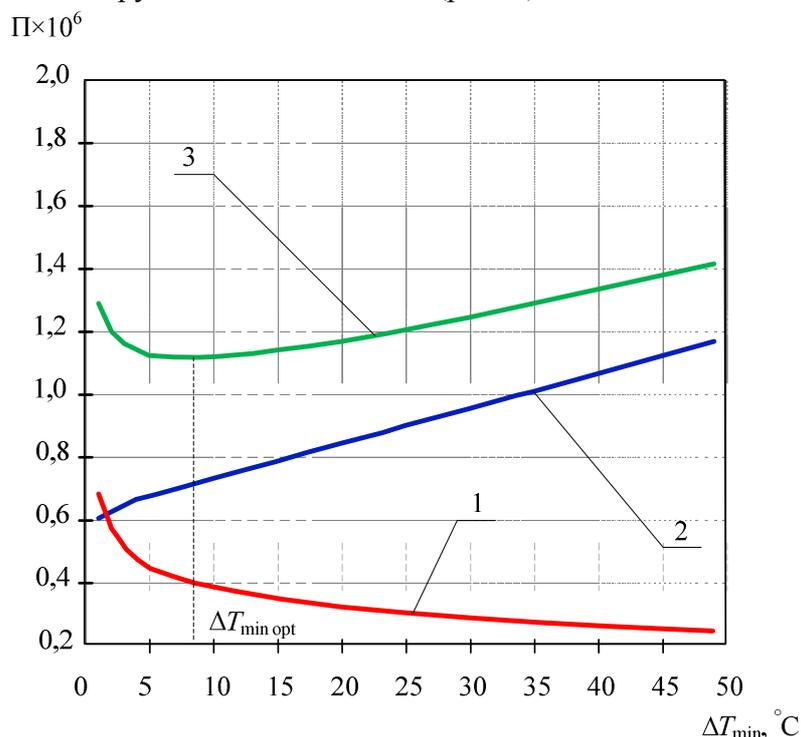


Рисунок 4 – Зависимость приведенной стоимости от  $\Delta T_{\min}$   
 1 – инвестиции в оборудование; 2 – энергия; 3 – общая стоимость  
 $\Delta T_{\min, \text{opt}} \approx 8^\circ \text{C}$

Более детальный анализ области локализации  $\Delta T_{\min}$  показывает нам, что величина общей дисконтированной стоимости проекта в диапазоне изменения  $\Delta T_{\min} \in 5 \dots 10^\circ \text{C}$  меняется незначительно (рис. 4).

Это означает, что процесс гидроочистки сырья, выполненный с системой теплообмена при  $\Delta T_{\min}$  выбранном из интервала  $5 \dots 10^\circ \text{C}$  будет работать в экономически оптимальном режиме.

Поэтому построим составные кривые для  $\Delta T_{\min} = 8^\circ \text{C}$  (рис. 5).

Мы видим, что пинч локализуется на температуре для горячих потоков, равной  $214^\circ \text{C}$ , и соответственно для холодных потоков –  $206^\circ \text{C}$ . Составные кривые показывают, что при достижении  $\Delta T_{\min} = 2^\circ \text{C}$  исчезают холодные утилиты, горячие утилиты при этом приобретают значение равное  $Q_{H\min} = 3,3 \text{ МВт}$ , что на 58 % меньше, чем про-

цесс получает от утилитной системы в настоящее время. Значение холодных утилит составляет  $Q_{Cmin} = 2,6$  МВт что на 52 % меньше, чем процесс получает от утилитной системы в настоящее время.

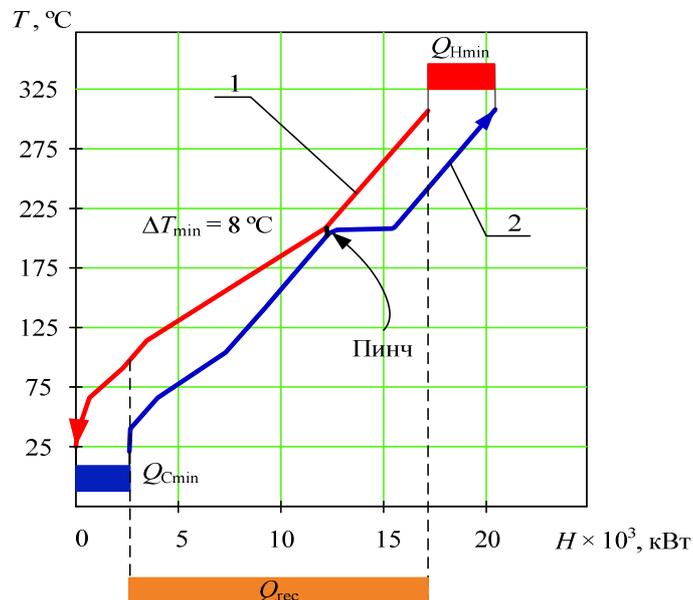


Рисунок 5 – Составные кривые процесса гидроочистки сырья, построенные для  $\Delta T_{min} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$   
 1 – составная кривая горячих потоков; 2 – составная кривая холодных потоков;  
 $Q_{Hmin}$ ,  $Q_{Cmin}$ ,  $Q_{rec}$  – потребляемая мощность горячих утилит, холодных утилит и мощность рекуперации  
 $Q_{Hmin} = 3,3$  МВт,  $Q_{Cmin} = 2,6$  МВт,  $Q_{rec} = 14,2$  МВт

Мощность рекуперации тепловой энергии в интегрированной системе с  $\Delta T_{min} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$  достигнет значения  $Q_{rec} = 14,2$  МВт. Таким образом, с помощью углубления теплоэнергетической интеграции в процессе гидроочистки сырья на установке Л-35-11/600 можно уменьшить энергопотребление на 1,99 МВт.

**Заключение.** В результате обследования процесса гидроочистки сырья на установке переработки нефти Л-35-11/600 были выявлены недостатки существующей теплообменной системы, которые приводят к увеличению энергопотребления. Достигнута минимальная разность температур между холодной и горячей составными кривыми, что позволяет уменьшить энергопотребление на установке на 1,99 МВт, по сравнению с существующей.

#### Литература

1. Состояние энергоэффективности в Донецкой области (Электронный ресурс) / А.С. Киричок // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы» – 2007. – №6. – Режим доступа к публикации <http://www.escoecosys.narod.ru/journal/journal66.htm>.
2. Уильям Д. Леффлер. Переработка нефти / Уильям Д. Леффлер. М.: ЗАО «Олимп-Бизнес». 2004. – 223 с.
3. Товажнянский Л.Л. Интеграция тепловых процессов на установке первичной переработки нефти АВТ А12/2 при работе в зимнее время / Л.Л. Товажнянский, П.А.

Капустенко, Л.М. Ульєв, С.А. Болдырев, М.В. Тарновский // Теорет. основы хим. технологии. 2009. –Т. 43, –№6. –С. 665–676.

4. Смит Р. Основы интеграции тепловых процессов / Р. Смит, Й. Клемеш, Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. Капустенко, Л.М. Ульєв. – Харьков: ХГПУ, 2000. – 457 с.

5. Plesu V. Catalytic, reforming plant simulation for energy saving and rational use of hydrogen / Plesu V., Baetens D., Bumbac G.// 1<sup>th</sup> Conference on process integration, modeling and optimization for energy saving and pollution reduction. PRES'01. Chemical engineering translations, 2001. – Vol. 2. –p. 489–492.

6. Tovazshneanski L.L. Energy Integration of the Early Crude Oil Unit with Take Into Account Different regime / L.L. Tovazshneanski, P.A. Kapustenko, L.M. Ulyev, S.A. Boldyryev, M.V. Tarnovsky // Chemical Engineering Transaction. – 2005 – Vol. 7. – p. 103–108.

7. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л. Построение составных кривых технологических процессов для определения энергетической эффективности предприятий / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. Капустенко, Л.М. Ульєв, Б.Д. Зулин, Н.Д. Андрийчук // Материалы междунаучной конференции «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье», MICROCAD'96. Ч. 1. Харьков. – 1996. – с. 179.

8. Nordman R. New process integration methods for heat – saving retrofit projects in industrial systems / R. Nordman – Chalmers University of Technology. Goteborg, Sweden. – 2005.– 77 p.

9. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л. Алгоритм построения составных кривых технологических процессов для определения энергетической эффективности предприятий / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. Капустенко, Л.М. Ульєв, Б.Д. Зулин // Междунар. конф. «Математические методы в химии и химической технологии», ММХ-10. Тезисы докладов. Тула. – 1996. – с. 74–75.

#### Bibliography (transliterated)

1. Sostojanie jenergojeffektivnosti v Doneckoj oblasti (Jelektronnyj resurs) A.S. Kirichok Jelektronnyj zhurnal jenergoservisnoj kompanii «Jekologicheskie sistemy»– 2007.– #6.– Rezhim dostupa k publikacii <http://www.escoecosys.narod.ru/journal/journal66.htm>.

2. Uil'jam D. Leffler. Pererabotka nefti Uil'jam D. Leffler. M.: ZAO «Olimp-Biznes». 2004. – 223 p.

3. Tovazhnjanskij L.L. Integracija teplovyh processov na ustanovke pervichnoj pererabotki nefti AVT A12 2 pri rabote v zimnee vremja L.L. Tovazhnjanskij, P.A. Kapustenko, L.M. Ul'ev, S.A. Boldyrev, M.V. Tarnovskij Teoret. osnovy him. tehnologii. 2009. –Т. 43, –#6. –С. 665–676.

4. Smit R. Osnovy integracii teplovyh processov R. Smit, J. Klemesh,

L.L. Tovazhnjanskij, P.A. Kapustenko, L.M. Ul'ev. – Har'kov: HGPU, 2000. – 457 p.

5. Plesu V. Catalytic, reforming plant simulation for energy saving and rational use of hydrogen Plesu V., Baetens D., Bumbac G. 1<sup>th</sup> Conference on process integration, modeling and optimization for energy saving and pollution reduction. PRES'01. Chemical engineering translations, 2001. – Vol. 2. –p. 489–492.

6. Tovazshneanski L.L. Energy Integration of the Early Crude Oil Unit with Take Into Account Different regime L.L. Tovazshneanski, P.A. Kapustenko, L.M. Ulyev, S.A. Boldyryev, M.V. Tarnovsky Chemical Engineering Transaction. – 2005 – Vol. 7. – p. 103–108.

7. Tovazhnjanskij L.L. Postroenie sostavnyh krivyh tehnologicheskikh processov dlja opredelenija jenergeticheskoj jeffektivnosti predpriyatij L.L. Tovazhnjanskij,

P.A. Kapustenko, L.M. Ul'ev, B.D. Zulin, N.D. Andrijchuk Materialy mezhd. nauchno-tehn. konf. «Informacionnye tehnologii: nauka, tehnika, tehnologija, obrazovanie, zdorov'e», microCAD'96. Ch. 1. Har'kov. – 1996. – p. 179.

8. Nordman R. New process integration methods for heat – saving retrofit projects in industrial systems R. Nordman – Chalmers University of Technology. Goteborg, Sweden. – 2005.– 77 p.

9. Tovazhnjanskij L.L. Algoritm postroenija sostavnyh krivyh tehnologicheskikh processov dlja opredelenija jenergeticheskoy jeffektivnosti predpriyatij L.L. Tovazhnjanskij, P.A. Kapustenko, L.M. Ul'ev, B.D. Zulin Mezhdunar. konf. «Matematicheskie metody v himii i himicheskoy tehnologii», ММН-10. Tezisy dokladov. Tula. – 1996. – p. 74–75.

УДК 658.26:665.63:338.45

Ульєв Л.М., Нечипоренко Д.Д.

### **ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИЙ ПОТЕНЦІАЛ ПРОЦЕСУ ГІДРООЧИЩЕННЯ НА УСТАНОВЦІ КАТАЛІТИЧНОГО РІФОРМІНГУ**

У результаті обстеження процесу гідроочищення сировини на установці переробки нафти Л-35-11/600 були виявлені недоліки існуючої теплообмінної системи, які призводять до збільшення енергоспоживання. Досягнуто мінімальну різницю температур між холодною та гарячою складовими кривими, що дозволяє зменшити енергоспоживання на установці на 1,99 МВт, в порівнянні з існуючою.

Ulyev L.M., Nechiporenko D.D.

### **ENERGY SAVING POTENTIAL OF HYDRAULIC CLEANING IN THE CATALYTIC REFORMING UNIT**

A survey of the hydro resources in the installation of oil refining L-35-11/600 identified shortcomings of the existing heat exchange system, which lead to an increase in energy consumption. Reached a minimum temperature difference between hot and cold composite curves, which reduces power consumption by setting at 1,99 MW, as compared to the existing one.

УДК 661.257.1.66.083:661.185

Подустов М.А., Дзевочко А.М., Литвиненко Е.И., Бабиченко Ю.А., Черноног Р.С.

## ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

На современном этапе развития общества одним из основных требований гармоничного существования человека является энерго- и ресурсосберегающее отношение к природе. Широкое применение малоотходных и энергосберегающих технологий в повседневной жизни человека может стать решающим фактором улучшения экологической ситуации в Украине. Известно, что невзирая на снижение объемов производства продукции, что происходило в последнее пятнадцатилетие степень технологической нагрузки на основные составляющие экосистемы остается существенной. Основные причины такого состояния – устаревшие технологии производства, высокая энергоемкость и материалоемкость, которые превышают в 2–3 раза соответствующие показатели развитых стран. Все это полностью относится и к производству поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Основными стадиями производства ПАВ, которые определяют его энерго- и ресурсосберегающие характеристики, являются: получение сульфатуемого агента, сульфатирование органического сырья, очистки газовойоздушного потока от диоксида серы.

Использование в качестве сульфатирующего агента серной кислоты и олеума, приводит к тому, что степень переработки органического сырья составляет не более 80 %, а также образуется значительные объемы жидких отходов и вредных выбросов в атмосферу, что усложняет экологическую обстановку в стране.

В промышленных условиях сульфатуемый агент получают каталитическим окислением диоксида серы в триоксид серы со степенью превращения не выше 95 %. В

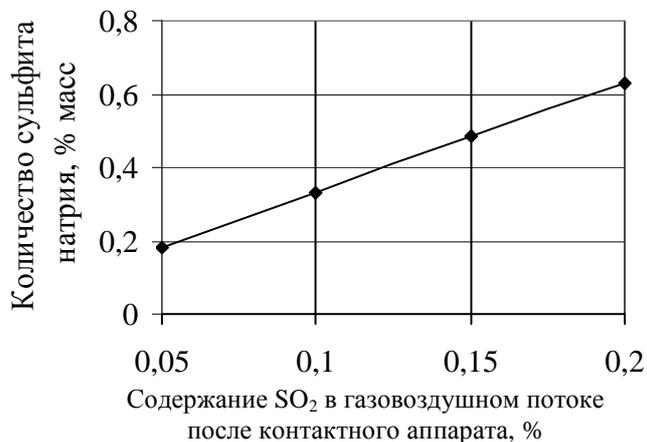


Рисунок 1 – Зависимость количества сульфата натрия в жидких отходах стадии очистки от содержания диоксида серы в газовойоздушном потоке на выходе из контактного аппарата

этом случае газовойоздушный поток, поступающий на стадию очистки, содержит 0,25 % об. SO<sub>2</sub>. Такое высокое содержание SO<sub>2</sub> на стадии очистки с использованием гидроксида натрия приводит к образованию жидких щелочных отходов с содержанием 0,6–1,0 % масс. сульфата натрия.

Использование этих щелочных отходов на стадии нейтрализации продуктов сульфатирования невозможно из-за раздражительного действия моющих средств на основе полученных ПАВ.

Однако жидкие щелочные отходы из стадии очистки можно использовать на стадии нейтрализации при содержании сульфата натрия не более 0,2 %. Этого можно достичь если степень превращения диоксида серы на стадии получения сульфатуемого агента будет не меньше 99 % об.

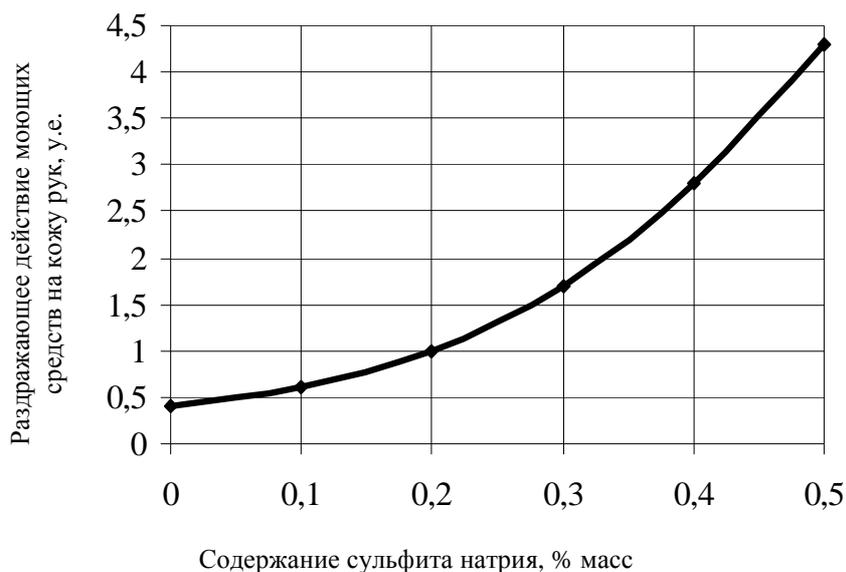


Рисунок 2 – Зависимость раздражающего действия моющих средств от содержания в них сульфита натрия (в пересчете на его количество в растворе гидроксида натрия)

Относительные единицы:

- до 1 – не обладают раздражающим действием;
- от 1 до 2 – частично обладают раздражающим действием;
- свыше 2 – обладают раздражающим действием

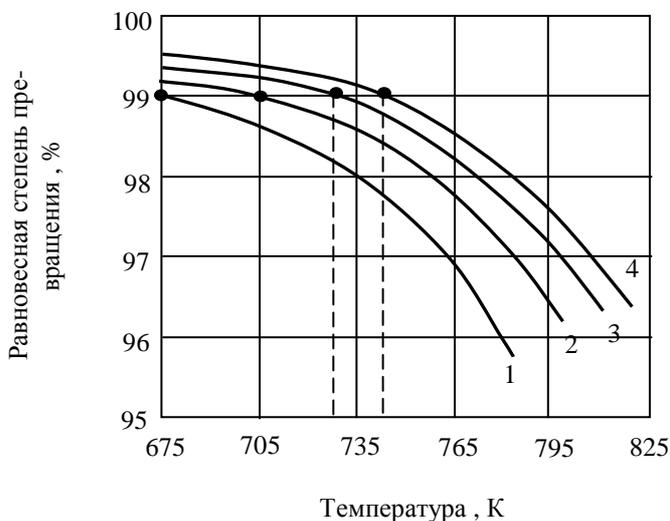


Рисунок 3 – Зависимость равновесной степени превращения  $SO_2$  от температуры и давления  
Давление, МПа: 1 – 0,1; 2 – 0,3; 3 – 0,6; 4 – 1,0

Анализ данного процесса показал, что равновесная степень превращения на уровне 99% достигается при 675 К ( $P = 0,1$  МПа), при 705 К ( $P = 0,3$  МПа). При 730 К ( $P = 0,6$  МПа), при 745 К ( $P = 1,0$  МПа).

Були проведенні експериментальні дослідження процесу окислення 5% діоксида сери під тиском до 1,0 МПа в діапазоні температур 703–863 К. Експериментальні дослідження проводили на проточно-циркуляційній установці з безградієнтним реактором з використанням ванадієвого катализатора СВД.

Результати експериментальних досліджень показали, що каталітичне окислення діоксида сери необхідно проводити при  $P = 0,6$  МПа в діапазоні температур 713–863 К.

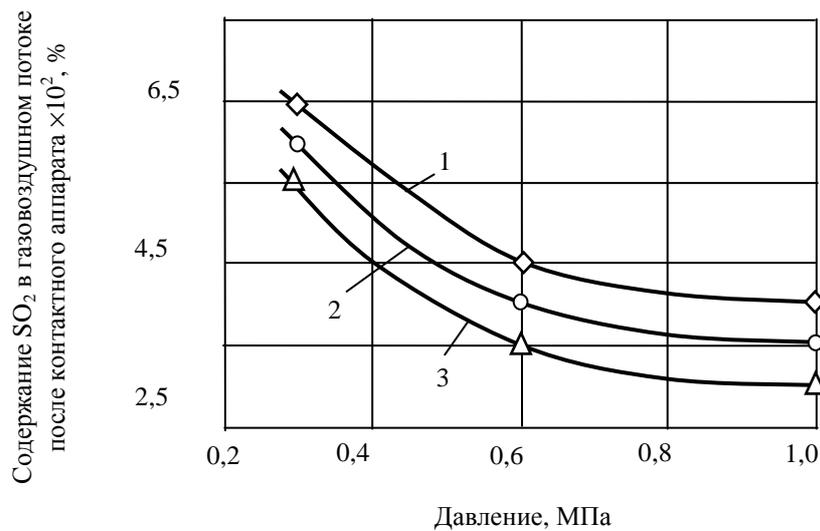


Рисунок 4 – Залежність вмісту SO<sub>2</sub> в газоздушному потоці після контактної апаратури від тиску  
Температура, К: 1–718; 2–723; 3–728.

В промислових умовах сульфатирование органічного сировья проводять в каскаді реакторів. При цьому ступінь сульфатирования не перевищує 90 % при кольористості кінцевого продукту більше 3 одиниць по йодній шкалі і в результаті цього при використанні ПАВ в атмосферу викидається 10 % шкідливих викидів газоподібного органічного сировья, крім того енергетичні витрати становлять 1,4 млн. кВт·год.

Аналіз процесу показав (см. рис. 5), що досягти високої ступені сульфатирования і задовільної кольористості кінцевих продуктів можна в проточному трубчатому реакторі з спадним потоком фаз. В цьому випадку можна досягти і значительного зменшення енергетичних витрат.

Експериментальні дослідження проводились в реакторі діаметром 0,006 м, довжиною 0,6 м. Було показано, що при молярному співвідношенні реагентів рівному 1,08:1,0 для алкілбензолів можна досягти ступені перетворення 98,5 % при кольористості кінцевих продуктів рівною 1. Таким чином, кількість шкідливих викидів органічного сировья зменшується з 10 % до 1,5 %.

В промислових умовах процес очищення газоздушного потоку від діоксида сірки здійснюють в абсорбційних колонках з насадкою. В якості насадки використовують кільця Рашига. При цьому ступінь очищення не перевищує 95 % (см. рис. 6).

Аналіз процесу показав, що підвищити ефективність очищення можна проведенням швидкої абсорбції з використанням блочних масообмінних елементів.

Результати експериментальних досліджень показали, що при використанні блочних масообмінних елементів вдасться знизити гідравлічне опір насадки в 5,5 раз (см. рис. 6), підвищити ступінь очищення до 98 %, що в кінцевому рахунку дозволяє досягти в приземному шарі атмосфери вмісту діоксида сірки на рівні гранично-допустимого концентрації.

Вміст сульфата натрію в рідких щелочних відходах в цьому випадку знаходиться на рівні 0,2 % мас, що дозволяє використовувати їх для нейтралізації продуктів сульфатирования і тим самим виключити рідкі щелочні відходи виробництва.

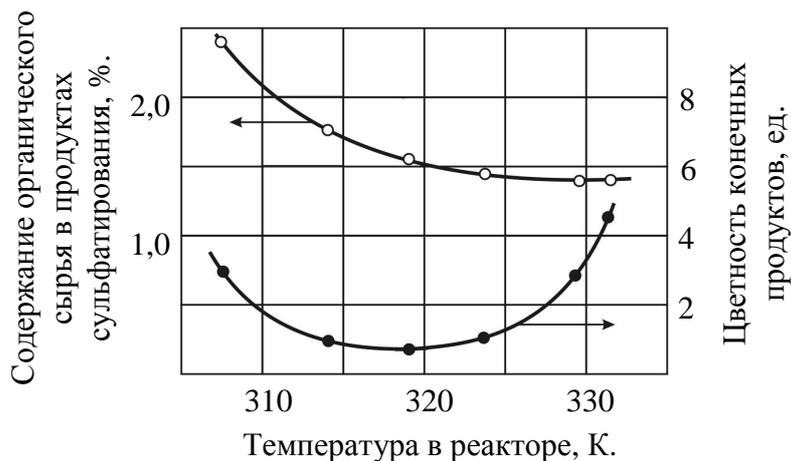


Рисунок 5 – Зависимость содержания органического сырья в продуктах сульфатирования и цветности конечных продуктов при сульфатировании алкилбензолов от температуры в реакторе при мольном соотношении 1,08:1

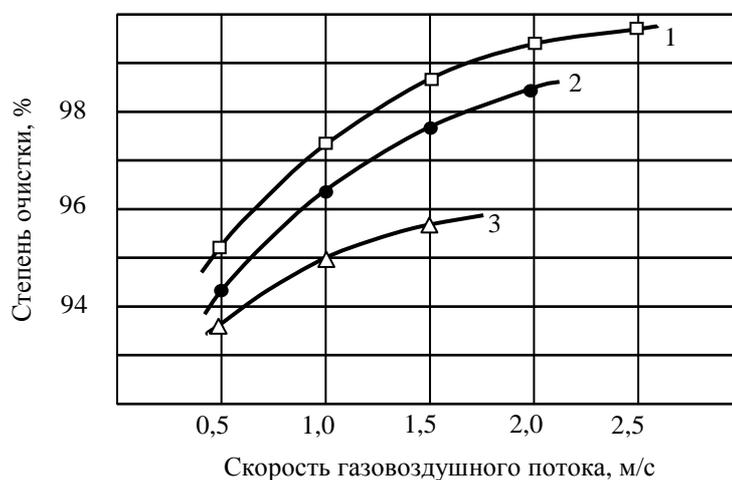


Рисунок 6 – Зависимость степени очистки от скорости газовойоздушного потока  
Примечание: 1. БН. 2. Седла Инталокс. 3. Кольца Рашига

По результатам исследований была предложена ресурсо- и энергосберегающая технологическая схема производства ПАВ.

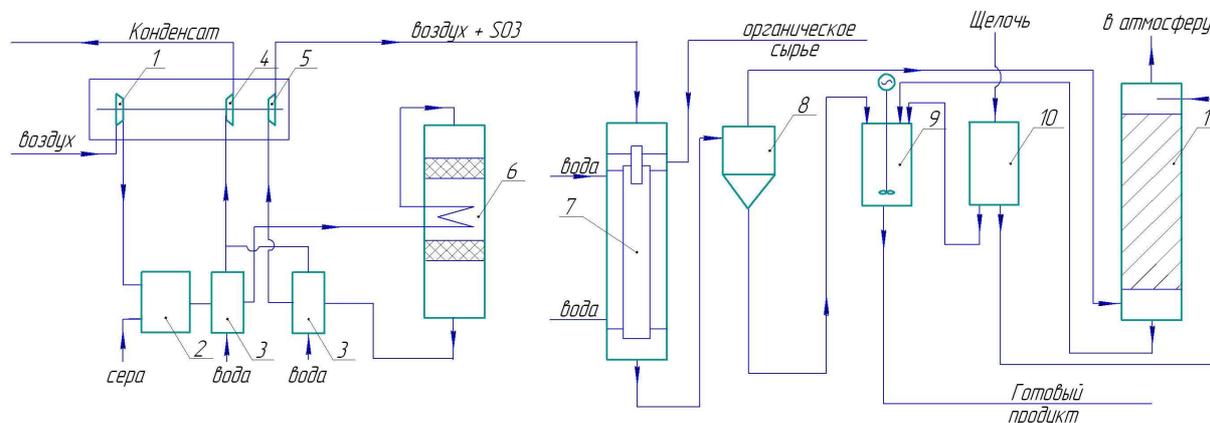


Рисунок 7 – Технологическая схема ресурсо- и энергосберегающего производства ПАВ

В предложенной схеме полностью исключены энергозатраты на стадии сульфатирования, уменьшены на стадии очистки и компенсированы на стадии получения сульфатирующего агента. Техничко-экономические и ресурсосберегающие показатели производства ПАВ приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1 – Техничко-экономические показатели предлагаемого и действующего производства ПАВ (на 1 т 100 % ПАВ)

N п/п	Наименование	Количественные характеристики, кг	
		Действующее производство	Предлагаемое производство
1	Расход серы	123	118
2	Расход органического сырья	779	712
3	Расход щелочи	185	135
4	Количество жидких отходов (раствор сульфита натрия)	160	–
5	Количество вредных газообразных выбросов (диоксид серы) после стадии очистки	0,55	0,21
6	Количество газообразных выбросов органического сырья при использовании ПАВ	77,9	10,7

Таблица 2 – Ресурсосберегающие показатели производства ПАВ

	Расход, кг/т ПАВ			Жидкие отходы, кг/т	Газообразные выбросы	
	Органическое сырье	SO <sub>3</sub>	NaOH		Органическое сырье, кг/т	SO <sub>2</sub> , %
Действующее производство (Украина)	779	263	185	160	77,9	0,05
Действующее производство (Италия)	712	252	148	128	10,7	0,03
Предлагаемое производство	712	252	135	Отсутствуют	10,7	0,005

Предложенная схема была апробирована в опытно-промышленных и промышленных условиях на предприятиях Украины и России. Полученные результаты дают возможность утверждать о возможности широкого внедрения данных технологий.

Литература

1. Мигель В.И. Производство анионных поверхностно-активных веществ в Украине: есть ли шансы / В.И. Мигель, Ковалев В.М. // Химическая промышленность Украины. – 2004. – С. 4–8.

2. Подустов М.А. Совершенствование процесса получения сульфатирующего агента с целью повышения экологической безопасности / М.А. Подустов, В.И. Тошинский, А.М. Дзевочко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2003. – № 6. – С. 59–61.

3. Подустов М.О. Зменшення викидів у атмосферне повітря при сульфатуванні органічної сировини газоподібним триоксидом сірки / М.О. Подустов, В.І. Тошинський, О.М. Дзевочко. В.М. Петров // Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки : зб. наук. пр. УкрНДІЕП. – Харків : ВД “Райдер”. – 2008. – С. 240–247.

УДК 661.257.1.66.083:661.185

Подустов М.О., Дзевочко О.М., Литвиненко Є.І., Бабіченко Ю.А., Черноног Р.С.

**ЕНЕРГО- ТА РЕСУРСОЗАОЩАДНІ ТЕХНОЛОГІЇ У  
ВИРОБНИЦТВІ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН**

Проаналізовано сучасний стан виробництва поверхнево-активних речовин (ПАР) в Україні. Наведені основні енерго- та ресурсовитратні характеристики виробництва ПАР. Розглянуті напрями та способи підвищення енерго- та ресурсозаощадних показників даного виробництва.

Podustov M., Dzevochko A., Litvinenko E., Babichenko J., Chornonog R.

**ENERGY AND RESOURCE SAVING TECHNOLOGY IN  
SURFACE-ACTIVE SUBSTANCES PRODUCTION**

The current state of the surface-active substances (SAS) in Ukraine. The basic energy- and resource-consuming features of SAS. Directions and how to increase energy and performance of the resource saving production

УДК 66.045.1

Капустенко П.А., Илюнин О.О., Перевертайленко А.Ю., Самер Лага

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ТРАВЛЕНИЯ ЛИСТОВОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

Удаление окалины с поверхности листа является важным технологическим процессом (ТП), определяющим качество выходной продукции. Техническое совершенство данного процесса определяет производительность линии проката, а также возможность обработки листа различной толщины. Это весьма актуально для производств холодного проката углеродистой стали в связи с растущим спросом рынка на данную продукцию.

Процесс травления листовой стали заключается в разрушении слоя окалины на поверхности листа в процессе происходящих химических реакций травильного раствора с окислами железа, формирующими слой окалины. Для травления листовой углеродистой стали на непрерывных травильных линиях (НТЛ) применяют растворы соляной или серной кислот. Подробно механизм взаимодействия травильного раствора с окалиной описан в [1,2].

Травление тонколистовой углеродистой стали в растворе соляной кислоты получило широкое распространение за рубежом. В России уже пущены, а в Украине монтируются травильные линии итальянской компании TESHINT S.p.A, использующие раствор соляной кислоты, которые содержат узел регенерации отработанного раствора [3]. На металлургических предприятиях Украины, производящих листовой прокат из углеродистой стали, в качестве травильного раствора в основном используется раствор серной кислоты с концентрацией до 20–24 %.

Основными технологическими параметрами процесса сернокислотного травления листовой углеродистой стали является температура травильного раствора  $t_{p-ра}$  и концентрация серной кислоты  $v_{H_2SO_4}$  в нем. Температура раствора в отечественных НТЛ листовой углеродистой стали составляет, как правило, 88–98 °С в зависимости от порядка расположения травильных ванн по ходу движения листовой полосы. Поддержание  $t_{p-ра}$  в ваннах осуществляется путем его нагрева, причем в отечественной практике используется впрыск перегретого пара (250 °С–260 °С) непосредственно в ванну с раствором. Рулон металла конвейер разматывает и протягивает сквозь комплекс травильных ванн НТЛ. Температура в каждой ванне поддерживается барботированием-пробулькиванием высокопотенциальным острым паром, через специальные сопла, которые располагаются в травильном растворе под полосой на днище ванн. Конденсат пара, образующийся в процессе нагрева раствора, переходит в травильный раствор, что влечет за собой изменение  $v$ , увеличение расхода серной кислоты и сброса раствора (на регенерацию в купоросное отделение) и является одним из факторов неопределенности. Для поддержания концентрации раствора  $v$  в заданных пределах в каждой ванне производится периодическое измерение с частотой 1–2 раз в час химическим титрованием вручную: измеряется – общая кислотность и концентрация раствора  $H_2SO_4$ , содержание гидратов железа структуры  $FeSO_4 \cdot n(H_2O)$ . На основании полученных данных принимается решение о полном сливе, освежении или разбавлении раствора водой. Корректировка  $v$  травильного раствора происходит путем добавления  $H_2SO_4$  и  $H_2O$  в ванну № 4. Перемешивание травильного раствора в ваннах происходит за счет подачи

острого пара и движения полосы в противоток подаваемому раствору, что способствовало повышению скорости травления.

Ввиду простоты исполнения этот метод нагрева в настоящее время является наиболее распространенным в существующих отечественных НТЛ.

Непосредственно процесс травления в ваннах происходит при обеспечиваемых с невысокой точностью температурных режимах, достаточно большими потерями на испарение и вынос раствора. Комплекс, структурно-параметрическая схема которого приведена на рис. 1, состоит из 4-х ванн, наполненных растворами различной концентрации  $H_2SO_4$  и постоянно подогреваемыми до определенных температур.

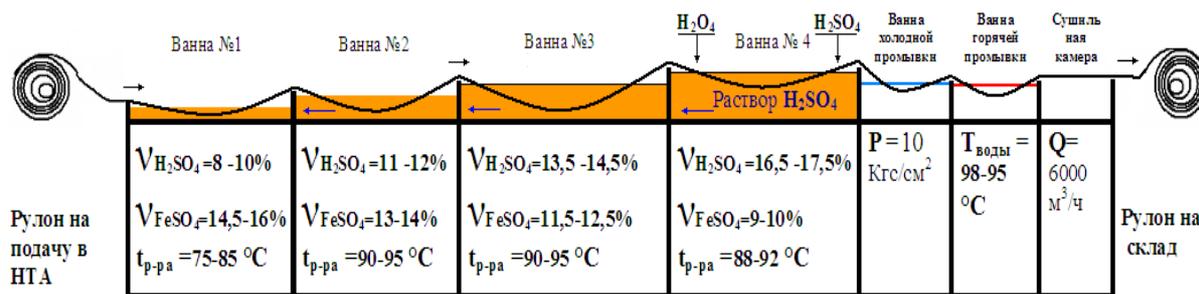


Рисунок 1 – Структурно-параметрическая схема НТА

При анализе работы травильного комплекса было отмечено сильное колебание параметров греющего пара. Неравномерность его потребления как абонентами заводской технологической котельной, так и самим комплексом, который должен обеспечить индивидуальный температурный режим ванн травильной линии, можно принять как фактор неопределенности в данном технологическом процессе [4]. Главными недостатками этого метода являются большие энергозатраты на перегрев пара, повышенные потери тепла, повышенный расход серной кислоты на поддержание концентрации постоянно разбавляемого паром раствора. Также следует отметить большие объемы отходов и повышенную нагрузку на станцию регенерации раствора. По этим причинам применяемая технология не отвечает техническому уровню по энергоэффективности и контролю за выбросами в окружающую среду, установленному директивой ЕС 96/61 [5].

В связи с вышеизложенным, руководством Мариупольского металлургического комбината им. Ильича была поставлена задача: разработать автоматизированный комплекс технических средств для НТА, который обеспечит минимизацию энергопотребления и расхода ресурсов в рамках применяемой технологии травления.

Наилучшим доступным методом в настоящее время признан метод нагрева травильного раствора в выносном теплообменном аппарате с регулированием подающегося на него тепла. Такой метод широко применяется за рубежом при травлении в серно-азотнокислотных растворах. В качестве выносных теплообменников используются аппараты из коррозионностойкого импрегнированного графита. Тип аппарата (кожухотрубчатый, блочный, пластинчатый) выбирается в результате расчетов в зависимости от объемов циркуляции раствора и греющей рабочей среды.

В работе [6] приведены результаты промышленных испытаний модуля нагрева травильного раствора на базе пластинчатого теплообменника ALFA-LAVAL, поверхность теплопередачи которого была изготовлена из импрегнированного графита

DIABON NS1. Испытания были проведены на существующей травильной линии ММК им. Ильича.

В качестве греющей среды для нагрева раствора в пластинчатом теплообменнике применили насыщенный пар 110–150 °С. Такой разбег температур обусловил необходимость регулирования параметров теплоносителя. На рис. 2 представлены нормированные графики  $Q_c^n$  – энергопотребления процесса до применения автоматизации и  $Q_p^n$  – после;  $T_p^c$  график температур травильного раствора до применения автоматизации и  $T_p^n$  – после соответственно.

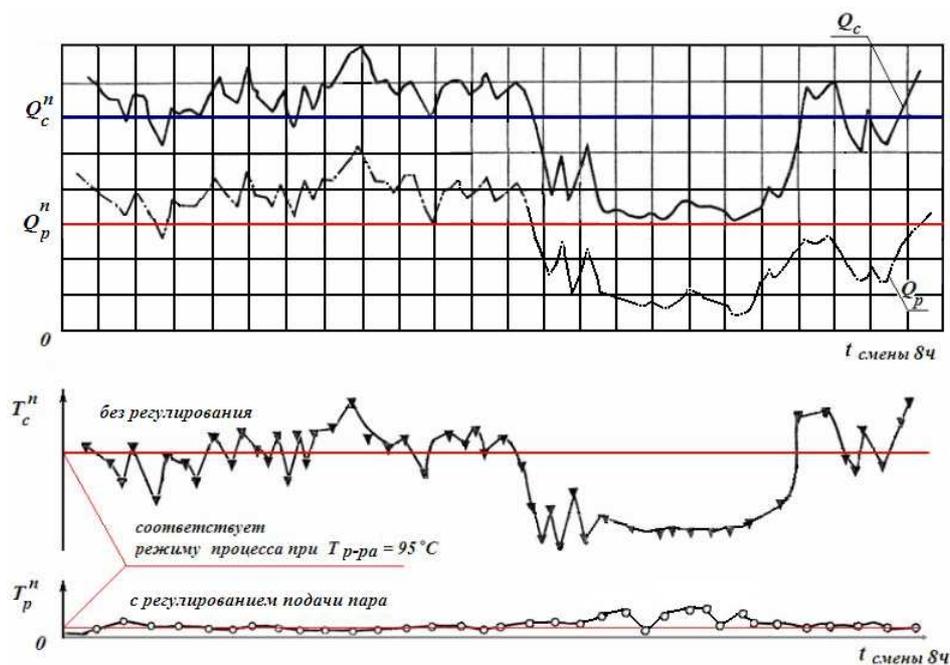


Рисунок 2 – Экспериментальные данные работы теплового ввода

В результате применения модуля нагрева травильного раствора (МН) на базе пластинчатого теплообменника ALFA-LAVAL, отказа от прямого нагрева травильного раствора, внедрения автоматизации расхода подачи насыщенного пара, стабилизировалась температура в травильных ваннах ( $\Delta t_{p-pa} = \pm 1$  °С), существенно снизилась энергоёмкость процесса  $Q_p^n \approx 0,29 \cdot Q_c^n = 75,1$  Гкал/ч.

Таким образом подтверждена возможность успешного применения пластинчатых теплообменников с пластинами из DIABON NS1 для подогрева сернокислотного травильного раствора на отечественных непрерывных травильных линиях листового проката.

Принципиальная схема модуля приведена на рис. 3.

Целью данной работы является оценка необходимого для ТП количества массы веществ в системе химических реагентов с целью оптимизировать их расход при поддержании постоянной скорости травления (реакции).

Скорость травления зависит от двух видов технологических параметров: к первым относят характеристики стали, состав и структуру окалины, зависящих от процессов предшествующих травлению. Ко вторым относятся концентрация кислоты в растворе и его температура. Если для различных марок сталей влияние состава травильных растворов достаточно изучено, то количество и состав окалины, изменяющиеся в зависимости от локализации по поверхности всей длины рулона, условий и времени его ру-

лонирования и остывания [7] является следующим фактором неопределенности технологического процесса.

Наиболее значимой переменной при травлении является температура, затем концентрация травильного раствора, а концентрация ионов железа имеет значение лишь как ограничивающий фактор времени жизни раствора до полного слива. В общем случае функцию скорости травления можно представить как

$$v = f(t_{p-ра}, M(H_2SO_4), M(H_2O), M(FeSO_4)), \quad (1)$$

где  $M$  – массы реагентов в системе.

Причем следует отметить, что влияние слабоуправляемых изменений переменной  $t_{p-ра}$  в пределах  $\Delta t_{p-ра} = \pm 1$  °C несущественно, изменение  $M(H_2O)$  управляемо технически и ими можно пренебречь. Таким образом, мы связываем максимально возможное количество свободных переменных, и в нашем случае без потери информативной корректности системы [8] принимаем:

$$v = f(M(H_2SO_4), M(FeSO_4)). \quad (2)$$

Поверхность рулона проката перед процессом травления многослойна, ее структура и переходные физико-химические процессы во время остывания, которое происходит от внутренних слоев к поверхности, представлены на рис. 4.

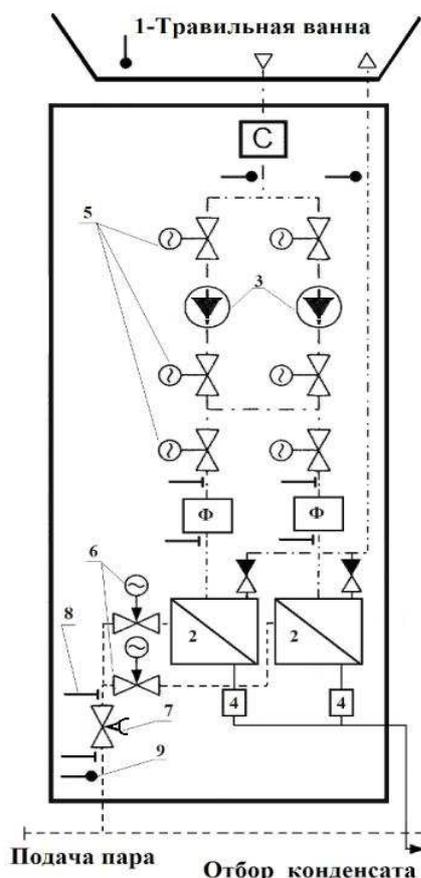


Рисунок 3 – Принципиальная схема модуля нагрева травильного раствора

- 1 – травильная ванна;
- 2 – теплообменники;
- 3 – циркуляционные насосы;
- 4 – конденсатоотводчики;
- 5 – электродвигатели;
- 6 – управляемые задвижки подачи пара;
- 7 – редуктор давления;
- 8 – датчик давления;
- 9 – датчик температуры;
- С – кондуктометр (датчик кислотности раствора);
- Ф – фильтр.

Для объективной оценки процесса травления необходимо учитывать влияние технологических факторов на основные параметры в их совокупности и взаимодействии, что можно сделать только на основе математической модели процесса травления. Приведенные в литературе линейные уравнения для кислотного травления сталей не всегда адекватно описывают систему, к тому же авторы не дают их интерпретации и не проводят поиск оптимума. Сравнительно хорошо исследовано влияние на длительность удаления окалина и скорость коррозии сталей таких факторов, как концентрация кислоты и температура травильного раствора [1,2]. Кинетика электрохимической коррозии железа и сталей в травильных растворах изучена с помощью методов

математического моделирования кинетики гетерогенных процессов [8]. Процесс может быть описан полиномиальными уравнениями 2-й степени [11].

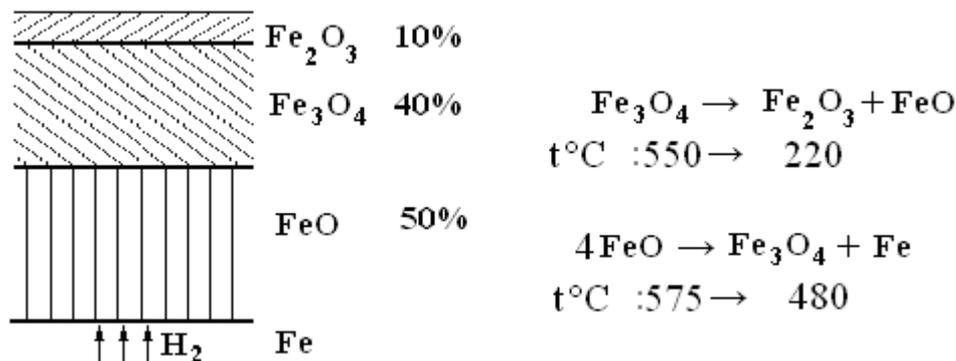
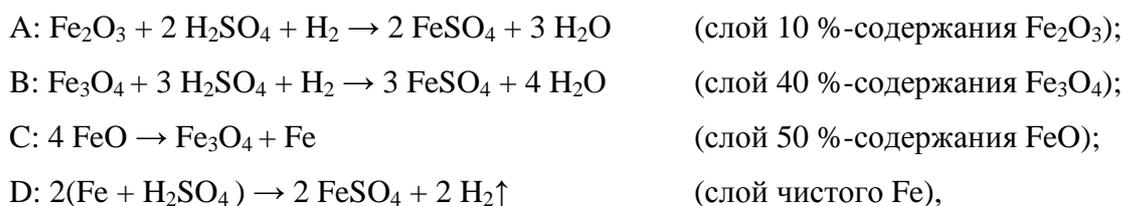


Рисунок 4 – Структура поверхности стального проката во время остывания

Установлены общие закономерности:

- активность раствора растет только до некоторого предела концентрации H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, более или менее общего для всех опытов, а далее начинает падать;
- повышение температуры раствора вплоть до температуры, близкой к кипению, всегда ведет к увеличению его активности.
- в процессе травления раствор насыщается гидратами железа структуры FeSO<sub>4</sub> · n(H<sub>2</sub>O), n = 1–7, которые с охлаждением раствора при превышении определенных концентраций FeSO<sub>4</sub> в растворе выпадают в виде кристаллов вплоть до остановки процесса травления.

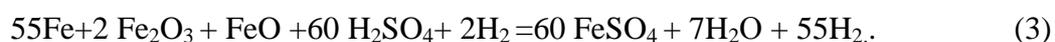
При травлении железа и его окислов в растворах серной или соляной кислот наряду с образованием солей железа одновременно выделяется водород. Реакции растворения серной кислоте трех окислов железа, содержащихся в окалине, более точно можно описать следующим образом [9]:



причем скорости реакций растут от А к С и последняя максимальна.

Согласно опытным данным, оптимальная активность раствора, т.е. время T = 28 с полного удаления окалины с поверхности металла, достигается при v<sub>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></sub> = 20–22 %, t<sub>p-ра</sub> = 95–99 °С, при этом концентрация гидратов солей FeSO<sub>4</sub> в растворе должна составлять в нашем случае не более 15 % согласно технологии.

По усредненным опытным данным об удельном расходе кислоты на травление (55 % на растворение Fe, 25 %-потери выноса раствора полосой, 15 %-выливается с использованным раствором, и только 5 %-на травление окалины [1]) и процентном содержании оксидов разной валентности, подходим к балансовому уравнению с учетным параметром массы M (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>):



Пересчет балансного уравнения при условии толщины оксидной пленки 13,6 мк полностью покрывающей условный лист, что соответствует 570 кг оксидов, показал необходимый расход 997 кг H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> при нормативном расходе 1270 кг и образование 213,64 кг H<sub>2</sub>O, что обоснованно дает возможность снизить верхнюю границу запаса H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и H<sub>2</sub>O.

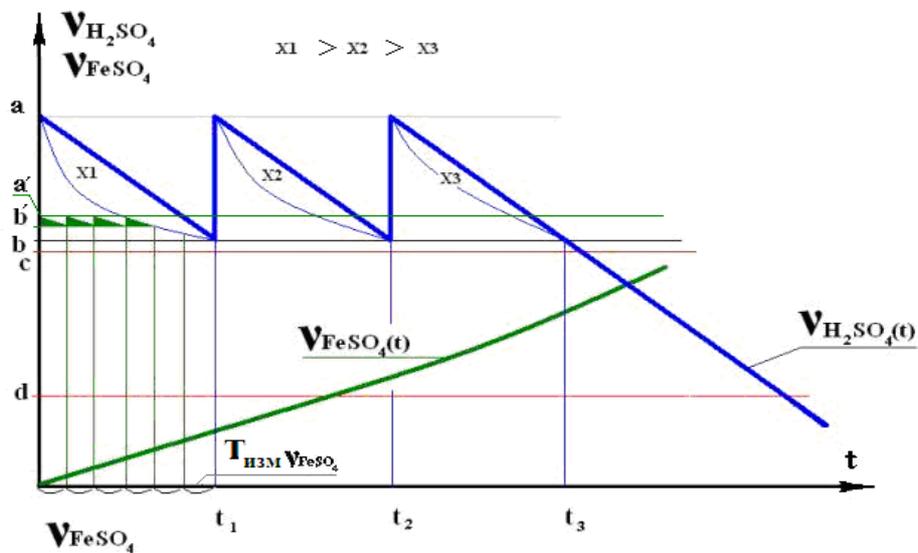
Как видно из графика работы травильного раствора (рис. 5), задача управления концентрацией раствора, потребляемого со скоростью U и пополняемого со скоростью V, является типичной MRP-II (Manufacturing Resource Planning) задачей [10]:

$$\frac{dv(t)_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{dt} = V - U \quad (4)$$

с обязательным для реального процесса условием  $V - U \geq 0$ , где  $v(t)_{\text{H}_2\text{SO}_4}$  представляет собой функцию времени, описываемую предложенным в [7] уравнением, модифицированным к нашей задаче:

$$\ln \frac{v(t)_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{v(0)_{\text{H}_2\text{SO}_4}} = A \cdot e^{-\left(\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \cdot t}, \quad (5)$$

где  $v(t)_{\text{H}_2\text{SO}_4}$  – концентрация кислоты по незавершению травления;  $v(0)_{\text{H}_2\text{SO}_4}$  – начальная концентрация кислоты; A – предэкспоненциальный множитель в уравнении Аррениуса; E<sub>a</sub> – энергии активации; R – универсальная газовая постоянная; T – температура (°K); t – время.



Рабочий диапазон концентрации раствора  $V_{\text{H}_2\text{SO}_4} = [a; b]$

Границы активности раствора  $V_{\text{FeSO}_4} \geq c$  раствор сливают или освежают

$V_{\text{H}_2\text{SO}_4} \leq d$  и  $V_{\text{FeSO}_4} \geq c$  раствор сливают

Рисунок 5 – График работы травильного раствора

Уменьшение площади сегментов X1, X2, X3 на рис. 5 подтверждает падение с течением времени  $E_a$  – энергии активации, необходимой для выхода ион-атомов из металла и перехода их в раствор, что и является процессом электролитической коррозии [1], т.е. активность раствора экспоненциально падает в связи с наличием большого количества ионов железа и невозможностью создать достаточное количество электрохимических пар с водородом [9,11].

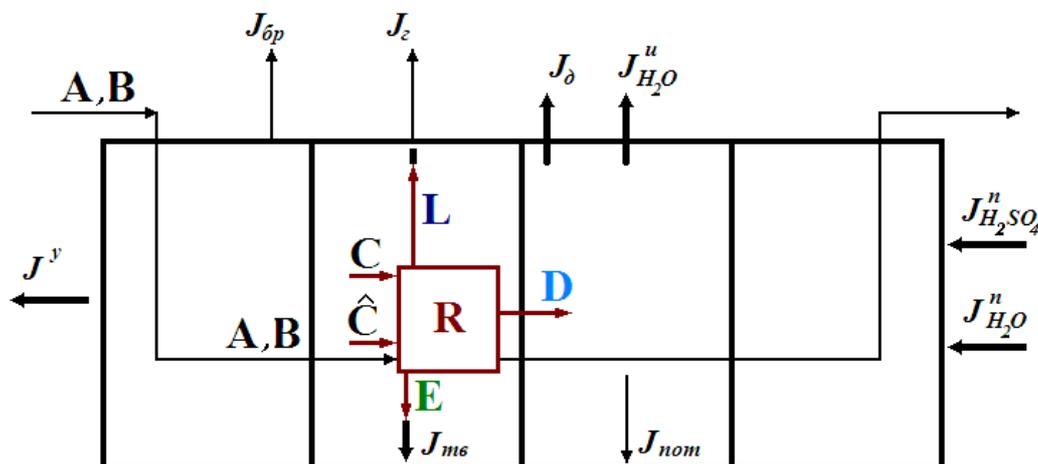


Рисунок 6 – Схема массовых потоков НТА

На рисунке приведена классическая схема массовых потоков  $J_m$  реакции [12] травления оксидов железа R:

$J_{п}$ ,  $J_{у}$  – потоки приходящих и уходящих растворов  $H_2SO_4$  и  $H_2O$ ;

$J_{тв}$  – поток твердого продукта  $FeSO_4 \cdot H_2O$ ;

$J_{г}$  – поток газообразного продукта  $H_2 \cdot SO_4^{-2}$ ;

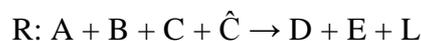
$J_{H_2O}^u$  – поток испаряющейся с поверхности бассейна ванн  $H_2O$ ;

$J_{бр}$  – поток брызг травильного раствора, уносимых воздухоотсосом;

$J_{д}$  – поток слоя раствора, уносимого с полосой в ванну горячей промывки (в случае выработки отжимных валиков может составлять до  $0,25 \cdot m_{H_2SO_4}$  раствора);

$J_{пот}$  – поток потерь раствора в результате проливов, капли и др.

Из схемы видно, что реакция проходит по следующему упрощенному принципу взаимодействия потоков:



причем

$$J_{п} = J_{у} + J_{тв} + J_{г} + J_{H_2O}^u + J_{бр} + J_{д} + J_{пот}. \quad (6)$$

после исключения незначимых для моделирования потоков, общей долей которых по сравнению с  $J_{п}$  можно пренебречь, (6) приходит к виду:

$$J_{п} = J_{тв} + J_{H_2O}^u + J_{д}, \quad (7)$$

где верхнюю границу  $J_{\text{ТВ}}$  можно оценить по балансному уравнению (3), а величины  $J_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{и}}$  и  $J_{\text{д}}$  также являются факторами неопределенности ТП. Как рекомендовано в [13] количество воды испаряющейся из травильного раствора кг/ч (наличием ионов  $\text{SO}_4^{-2}$  в парах воды пренебрегаем), зависящую от скорости движения воздуха над зеркалом бассейна

$$G^{\text{и}} = \frac{J_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{и}}}{\Delta t} \quad (8)$$

можно оценить с помощью уравнения Дальтона:

$$G^{\text{и}}(\omega) = 6,46 \cdot \omega^{0,8} \frac{(p_1 - p_2) \cdot S \cdot \tau}{p}, \quad (9)$$

где  $\omega$  – скорость движения воздуха над зеркалом бассейна, зависит от объема вентиляционного отсоса воздуха и скорости движения воздуха над зеркалом, в нашем случае 0,1–3 м/с;  $S$  – площадь зеркала бассейна ванны;  $\tau$  – время испарения, ч;  $p_1$  – давление насыщенного водяного пара над раствором ванны при определенных концентрации  $v(t)_{\text{H}_2\text{SO}_4}$  и  $t_{\text{р-ра}}$  °С;  $p_2$  – парциальное давление водяного пара при определенной  $t$  °С воздуха в цеху, зависит от относительной влажности в цеху;  $p$  – барометрическое давление ( $\approx 1,013 \cdot 10^5$  Па).

Разброс значений  $G^{\text{и}}$ , рассчитанных при фиксированных (хотя это и далеко от реалий ТП)  $t_{\text{р-ра}} = 100$  °С и  $v_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 18$  %, составляет около 4 тонн/ч:

$$G^{\text{и}}(0,1075) \approx 3938 \text{ кг/ч}, \text{ а } G^{\text{и}}(2,47) \approx 8076 \text{ кг/ч}.$$

Количество раствора, уносимого с полосой в ванну горячей промывки в единицу времени зависит от скорости движения металлической полосы в растворе и его вязкости. Вязкость раствора, в свою очередь, зависит от температуры и концентрации раствора. Т.о.

$$G^{\text{л}} = \frac{J_{\text{л}}}{\Delta t} \quad (10)$$

можно оценить с помощью уравнений [13]:

$$G^{\text{л}}(t_{\text{р-ра}} \text{ °С}, v(t)_{\text{H}_2\text{SO}_4}) = \delta \cdot S \cdot \rho; \quad (11)$$

$$\delta(\omega) = 0,93 \frac{(\mu \cdot \omega)^{2/3}}{\sigma^{1/6} \cdot (\rho g)^{1/2}}, \quad (12)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости раствора  $\approx 62$  дин/см;  $S$  – площадь поверхности травильного бассейна;  $\rho$  – плотность травильного раствора 1,040 г/см<sup>3</sup>;  $\mu = f(t_{\text{р-ра}} \text{ °С}, v(t)_{\text{H}_2\text{SO}_4})$  – динамическая вязкость травильного раствора в паузах;  $\omega$  – скорость движения полосы в растворе 67–200 м/сек, величина непостоянная в связи с остановами НТА на дотрав полосы;  $g$  – постоянная ускорения Ньютона 9,8 см/сек<sup>2</sup>.

В нашем случае унос раствора с движущейся полосой металла  $G^{\text{л}}$  колеблется в пределах 753,3–3934 кг/ч. Таким образом дополнительно необходимый уровень запаса

воды, с учетом образующейся в процессе уравнивания реакции (3), составит 11786,36 кг/ч. Это соответствует установленной технологией концентрации кислоты в 4-й ванне  $v_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 8-9\%$  на 997 кг  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Уравнение (5) всегда имеет одно единственное решение, причем повышение точности решения требует уменьшения шага  $\Delta t$ , или периода измерения концентрации кислоты и ведет к локальной асимптотической устойчивости динамической системы химических реагентов. Как показано на рис. 5, данная методика приводит к предложению о минимизации запаса  $v$  до уровня  $a'$ , что и рекомендовано в [10] для данного класса задач.

Однако, сложная взаимосвязанность переменных в функциях, описывающих поведение реагентов в системе НТА, затрудняет нахождение оптимального решения в момент применения управляющих воздействий вычислительными методами, поэтому авторы считают целесообразным в дальнейшем разработку регулятора, использующего нечеткую логику для поддержания параметров системы в оптимальной области по критерию минимизации расхода реагентов. Результатом проведенных исследований и разработок стало внедрение средств автоматизации подсистемы регулирования  $t, ^\circ\text{C}$ , травильного раствора НТА в условиях неопределенности на ММК им. Ильича (см. рис. 3).

В связи с этим перспективой разработок в данном направлении является создание АСУ ТП реального времени с учетом влияний внешней среды (факторов неопределенности). Для этого необходимо выполнение следующих этапов:

- разработка подсистемы контроля текущего состояния ТП в условиях изменяющейся во времени внешней среды;
- моделирование системы реагентов в заданных пределах параметров с целью определения оптимальных по различным критериям областей устойчивости системы в целом;
- разработка подсистемы контроля качества выходной продукции, реализуемой с помощью алгоритмов нечеткой логики и технических средств цифровой оптической идентификации;
- разработка цифрового регулятора скорости вращения рулоносматывателя в зависимости от вектора общего состояния АСУ ТП в целом.

#### Литература

1. Ледков В.Г. Непрерывные травильные линии.– М:Металлургиздат.– 1961.– 158 с.
2. Hasler F., Stone N. The Whys and Hows of Hydrochloric Acid Pickling: chemical and operating data for effluent free pickling. Esco Engineering, Kingsville, Ontario: October 1997, 63 pp.
3. Martines S., Marelli S. Modernisation of Pickling lines at the Magnitogorsk Irons & Steel Works. “Millenium Steel”.– 2006.– p. 233–236.
4. Иванов С.С., Лукашкин Н.Д., Хламкова С.С. Линия травления окисленных металлических материалов.– М: Сборник трудов Международной конференции «Электрохимия, гальванотехника и обработка поверхностей».– 2001.– 123 с.
5. European Comission. Reference Document on Best Available Techniques for the Ferrous Metals Processing Industry. Decembe.– 2001.– 538 pp.
6. Kapustenko P.A., Perevertaylenko A.Yu., Khavin G.L., Arsenyeva O.P. Graphite Plate Heat Exchangers as Energy Saving Tool for Corrosive Media Duties. “Chemical Engineering Transactions”.– 2007.– v. 12, p. 219–224.

7. Gines M.J.L., Benitez G.I., Perez T., Merli E., Firpo M.A., Egli W. Study of the Picklability of 1,8 mm Hot-Rolled Steel Strep in Hydrochloric Acid. Latin American Applied Research. CINI-FUDETEC. June.– 2002.– p. 281–288.
8. Малышева Т.В., Руденко Н.П., Чудновский Е.М. Использование математических моделей для анализа процесса кислотного травления сталей. Днепропетровск.– 1982.– 13 с. Рукопись представлена ред. журнала "Технология и организация производства". Деп. в Укр.НИИТИ 8.08.1982, 3254–982.
9. Золотов Ю.А. Основы аналитической химии, кн.2. – М.: Высшая школа. – 2001.– 503 с.
10. Питеркин С.В., Оладов Н.А., Исаев С.Н. Практика применения EPR-систем.– Альпина Паблишер. – 2003. – 368 с.
11. Малышева Т.В., Руденко И.П. Коррозионно-электрохимическое поведение железа и сталей в серной кислоте, содержащей ферроионы. В кн.: Тезисы докладов III республиканской научно-технической конференции "Химическая и электрохимическая обработка проката".– Днепропетровск.– 1983.– С. 53.
12. Герасимов Я.И. Физическая химия.– т.2. М.: Химия.– 1986. – 575 с.
13. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Влияние течения поверхностного слоя травильных растворов на очищение поверхности металлов и сплавов. Физика и химия обработки материалов.– 1981.– № 1.– С. 79–89.

Bibliography (transliterated)

1. Ledkov V.G. Nepreryvnye travil'nye linii.– М:Metallurgizdat.– 1961.– 158 p.
2. Hasler F., Stone N. The Whys and Hows of Hydrochloric Acid Pickling: chemical and operating data for effluent free pickling. Esco Engineering, Kingsville, Ontario: October 1997, 63 pp.
3. Martines S., Marelli S. Modernisation of Pickling lines at the Magnitogorsk Irons & Steel Works. "Millenium Steel".– 2006.– p. 233–236.
4. Ivanov S.S., Lukashkin N.D., Hlamkova S.S. Linija travlenija okislennyh metallicheskih materialov.– М: Sbornik trudov Mezhdunarodnoj konferencii «Jelektrohimija, gal'vanotehnika i obrabotka poverhnostej».– 2001.– 123 p.
5. European Comission. Reference Document on Best Available Techniques for the Ferrous Metals Processing Industry. Decembe.– 2001.– 538 pp.
6. Kapustenko P.A., Perevertaylenko A.Yu., Khavin G.L., Arsenyeva O.P. Graphite Plate Heat Exchangers as Energy Saving Tool for Corrosive Media Duties. "Chemical Engineering Transactions".– 2007.– v. 12, p. 219–224.
7. Gines M.J.L., Benitez G.I., Perez T., Merli E., Firpo M.A., Egli W. Study of the Picklability of 1,8 mm Hot-Rolled Steel Strep in Hydrochloric Acid. Latin American Applied Research. CINI-FUDETEC. June.– 2002.– p. 281–288.
8. Malysheva T.V., Rudenko N.P., Chudnovskij E.M. Ispol'zovanie matematicheskikh modelej dlja analiza processa kislotnogo travlenija stalej. Dnepropetrovsk.– 1982.– 13 p. Ru-kopis' predstavlena red. zhurnala "Tehnologija i organizacija proizvodstva". Dep. v Ukr.NIINTI 8.08.1982, 3254–982.
9. Zolotov Ju.A. Osnovy analiticheskoi himii, kn.2. – М.: Vysshaja shkola. – 2001.– 503 p.
10. Piterkin S.V., Oladov N.A., Isaev S.N. Praktika primenenija EPR-sistem.– Al'pina Pablisher. – 2003. – 368 p.

11. Malysheva T.V., Rudenko I.P. Korrozionno-jelektrohimicheskoe povedenie zheleza i stalej v sernoj kislote, sodержashhej ferroionny. V kn.: Tezisy dokladov III respublikanskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii "Himicheskaja i jelektrohimicheskaja obrabotka prokata".– Dnepropetrovsk.– 1983.– p. 53.

12. Gerasimov Ja.I. Fizicheskaja himija.– t.2. M.: Himija.– 1986. – 575 p.

13. Ivanova B.C., Terent'ev V.F. Vlijanie techenija poverhnostnogo sloja tra-vil'nyh rastvorov na ochishhenie poverhnosti metallov i splavov. Fizika i himija obrabotki materialov.– 1981.– # 1.– p. 79–89.

УДК 66.045.1

Капустенко П.О., Ілюнін О.О., Перевертайленко О.Ю., Самер Лага

### **ДО ПИТАННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ БЕЗПЕРЕРВНОГО ТРАВЛІННЯ ЛИСТОВОЇ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ ЗА УМОВ НЕВИЗНАЧЕННОСТІ**

У статті запропонована структура комплексу технічних засобів автоматизації параметрів процесу безперервного травління. Запропоновано спосіб підігріву травільного розчину сірчаної кислоти у виносних графітових теплообмінниках насиченою парою, дозволяє регулювати температуру розчину та концентрацію сірчаної кислоти в ньому. Відмічено що, в певному сенсі, регулювання концентрації розчину є типовою задачею поповнення запасу. Наведено модифіковане рівняння зміни концентрації сірчаної кислоти в розчині.

Капустенко P.O., Ilunin O.O., Perevertaylenko O.Yu., Samer Laga

### **ON THE PROBLEM OF AUTOMATION FOR CONTINUOUS PROCESS OF CARBON STEEL STRIP PICKLING FOR UNCERTAIN CONDITIONS**

In the article appropriate structure of automated technical complex development is proposed. The proposed pickling liquor heating in graphite-heat exchangers with saturated steam lets to control the temperature of pickling vat and appropriate sulfuric acid concentration. It is underlined that on appropriate level the task of acid concentration control is the just-in-time Manufacturing Resource Planning Task. The modified equation of acid concentration change in pickling vat is presented.

УДК 628.4

Шапорев В.П., Себко В.В., Михайлюк В.М.

**ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПИРОЛИЗА ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В ПОДВИЖНОМ СЛОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО УСТАНОВЛЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА**

**Введение.** О технологических процессах переработки твёрдых бытовых отходов (ТБО) методом газификации и пиролиза при различных температурных режимах, преимуществах этих процессов перед другими методами переработки, например, сжигания за последние годы в периодической литературе встречается много публикаций и патентов [1–7]. Согласно публикаций основным оборудованием в технологических установках по переработки ТБО методом пиролиза являются реактора, в которых осуществляется пиролиз. Конструкция реактора в преобладающем большинстве случаев предопределяет не только температурные режимы, но и методы подготовки (обработки) ТБО перед подачей их в реактор [8–9]. Как следует из [1–9] в качестве реакторов пиролиза рекомендуются в основном конструкции реакторов шахтного типа, в которых материал, подвергаемый термической деструкции, движется сверху вниз от узла загрузки до узла выгрузки под действием сил гравитации, а образующиеся газы (продукты деструкции) движутся противотоком потоку твёрдого материала. Таким образом, твёрдый материал (ТБО) движется стержневым потоком сверху вниз, а модель движения газообразных продуктов реакции близка к диффузионной модели. Такая конструкция реактора относительно проста и, главное, позволяет без особых усилий осуществлять герметизацию реактора от окружающей атмосферы. Однако, при эксплуатации реактора шахтного типа возникает ряд проблем, который заключается в следующем. Очевидно, что материал (ТБО), который движется в шахте, состоит из дискретных частиц (кусков) макроскопического характера, между которыми действуют неконсервативные контактные силы. При этом параметры упаковки твёрдой фазы определяют условия газопроницаемости. Вследствие деструкции частиц твёрдой фазы или какого-либо механического воздействия структура упаковки может меняться, что влечёт за собой изменение пористости и, соответственно, газопроницаемости слоя. Неоднородные структуры упаковки и газопроницаемости приводит к образованию пробок, зависания материала, перегревов в слое и, следовательно, нарушению плоского фронта реакции. Вышеуказанные особенности также предопределяют характерное время межфазного тепло- и массопереноса и, соответственно, производительность [10].

Таким образом при использовании реакторов шахтного типа необходимо в него подавать твёрдый материал (ТБО) с определённым дисперсным составом, консистенцией и углом естественного откоса. В связи с этим известные технологические установки по переработке ТБО методом пиролиза, как правило, предусматривают предварительную классификацию и сепарацию отходов с выделением в качестве вторсырья чёрных и цветных металлов, макулатуры, текстиля, полимерных материалов, стеклобоя и др. [1–10].

После процессов классификации и сепарации остаются хвосты сортировки (примерно 40–50 % от массы исходных ТБО), которые подвергаются переработке методом пиролиза. При этом перед подачей в реактор хвосты сортировки предварительно подвергаются сушке с одновременным гранулированием или гомогенизации, совмещённой с механической активацией и брикетированием [11,12]. Только в этом случае

обеспечивается надёжная работа шахтного реактора. При разработке проекта экспериментальной установки по переработки ТБО, депонированных на полигоне г. Черновцы, был выполнен поиск технологий и оборудования для утилизации ТБО, которые могли быть применены на данном объекте. Критериями оценки возможных технологических процессов и оборудования были:

- приспособленность работы для условий депонированных отходов на полигоне;
- наличие промышленного внедрения;
- наличие реальных технических решений по сепарации и классификации отходов;
- стоимость.

Для информационного поиска использована, кроме обзорной информации [13, 14], данные из Информационного Каталога ООО НИЦ "Глобус" (2004), информация фирм – разработчиков и поставщиков оборудования, в том числе, представленная по запросам ОАО "Галургия".

Выполненный информационный поиск позволяет сделать следующие выводы:

1. на рынке в СНГ и Украине в настоящее время отсутствуют апробированные в промышленных масштабах технологии и оборудование для сепарации и классификации отходов на полигонах ТБО и пиролиза отсепарированных отходов ТБО. Для комплексной оценки технологии и оборудования, предлагаемых западноевропейскими компаниями и некоторыми компаниями России, имеющаяся информация недостаточна;

2. каких-либо нормативов по определению оптимальных показателей стоимости для переработки ТБО, депонированных на полигоне, не существует, поэтому для предварительных оценок можно принять, что приемлемая стоимость технологической установки (включая поставку, доставку, монтаж оборудования и сопутствующие строительно-монтажные работы) не должна превышать 10 % от общей стоимости полигона, учитывая его полное развитие;

3. данные по общей стоимости технологической установки при отсутствии соответствующих сведений в источнике информации могут быть вычислены умножением стоимость оборудования на повышающий коэффициент 1,4–1,7, учитывающий затраты на строительную часть, обвязку установки, затраты на доставку и монтаж оборудования;

4. в условиях полигона (г. Черновцы) для проекта экспериментальной установки нами выбраны как базовый вариант, реакторы предложенные в работах [15,16], а технология предусматривает аллотермический нагрев ТБО в реакторе до температуры 1200–1400 °С с помощью горячего дутья состоящего из восстановительного газа, образующегося в реакторе, и перегретого водяного пара, полученного вне реактора [17,18].

Преимуществами этих базовых вариантов по сравнению с известными технологиями являются следующие положения:

- возможность переработки смеси ТБО с любым морфологическим и химическим составом, без какой-либо предварительной подготовки;
- достижение практически полной утилизации материальных и энергетических ресурсов содержащихся в ТБО;
- производство товарной продукции в виде: синтез – газа, электроэнергии и золы – компонента для производства строительных материалов.

Таким образом, разработка конструкции технологической установки по переработке ТБО, в которой реализуются вышеотмеченные преимущества, является актуаль-

ной задачей и при установлении работоспособности установки может открыться реальная возможность промышленной реализации процесса пиролиза ТБО.

## 2. Описание принципиальной конструкции экспериментальной установки и методы исследования процесса пиролиза на лабораторной установке.

На рис. 1 представлена принципиальная схема экспериментальной установки для проведения пиролиза ТБО. Установка состоит из корпуса (реакционной камеры) (1), который внутри футерован огнеупорным кирпичом или бетоном. Толщина футеровки рассчитывается из условия, чтобы температура наружной поверхности не превышала 60–70 °С. Имеется бункер (2) с ворошителем, в который загружаются ТБО предварительно подвергнутые магнитной сепарации и грубоизмельчённые на ножевых измельчителях. Бункер (2) герметично соединён со шнековым питателем (3), который имеет переменный шаг винта и разрывы винта для создания на выходе из шнека пробки, которая герметизирует и изолирует последующую камеру (4) от окружающей среды. В цилиндрической камере (4) дозируемый материал движется сплошным стержневым слоем и поступает на бесконечную ленту пластинчатого транспортера (5), на котором закреплены упругие скребки (6), лента движется вдоль реакционной камеры (1) с заданной скоростью. Толщина слоя на ленте может регулироваться в нерабочем состоянии устройством (22). Средняя толщина слоя поддерживается 0,3–0,4 м. Привод ведущего барабана пластинчатого транспортёра (5) находится вне реакционной камеры, подшипники – трения из углерод – углеродного композита, уплотнённые снаружи углерод – асбестовым жгутом. В реакционную камеру (1) после вывода реактора на стационарный режим через штуцера (20, 21) вводится горячее дутьё газов пиролиза, образующихся в процессе деструкции в камере (1). Образующиеся в камере (1) газы пиролиза отводятся на теплообменник (8), куда в межтрубное пространство подаётся вода, образующийся водяной пар частично через штуцер (21) подаётся в камеру (1), а основная масса идёт на технологические нужды. Газы пиролиза после теплообменника (8) посредством газодувки, через конденсатор – сепаратор подаётся на распределительный вентиль (12), перед этим отбирается проба на ИК – анализатор (19) и хроматограф (14) для определения состава газа. После вентиля (12) часть газа подаётся на трубчатый газонагреватель (15), где нагревается до 1200–1400 °С, а затем через штуцера (20, 21) подаётся в камеру (1). Вводимые газы движутся противотоком материалу. Основная часть газа после вентиля (12) подаётся потребителю. После деструкции материала в камере (1), образующаяся зола через горловину (7) поступает в приёмный бункер (на схеме не показан).

Пуск установки и вывод на стационарный температурный режим осуществляется за счёт лучистой энергии и тепла топочных газов, образующихся при сжигании природного газа (17, 18). Контроль за процессом осуществлялся путём измерения температур (точки замеров показаны по схеме) и путём отбора проб твёрдого остатка и его химического анализа (точки отбора показаны по схеме).

Для расчёта скорости движения ленты пластинчатого транспортёра, то есть для определения времени пребывания, поступивших в камеру (1) ТБО, необходимо определение кинетических характеристик процесса деструкции ТБО при принятых температурных режимах. Для этого были проведены экспериментальные исследования процесса деструкции ТБО на лабораторной установке при температурах в слое материала 700, 900, 1100, 1200 °С и в атмосфере состоящей из газов % объём: Н<sub>2</sub> – 43; СН<sub>4</sub> – 4; СО<sub>2</sub> – 5 %; Н<sub>2</sub>О – 48 %. Состав газовой фазы принят на основании данных приведенных в ра-

боте [19], в которой приведён состав пиролизного газа после деструкции ТБО в шахтном реакторе.

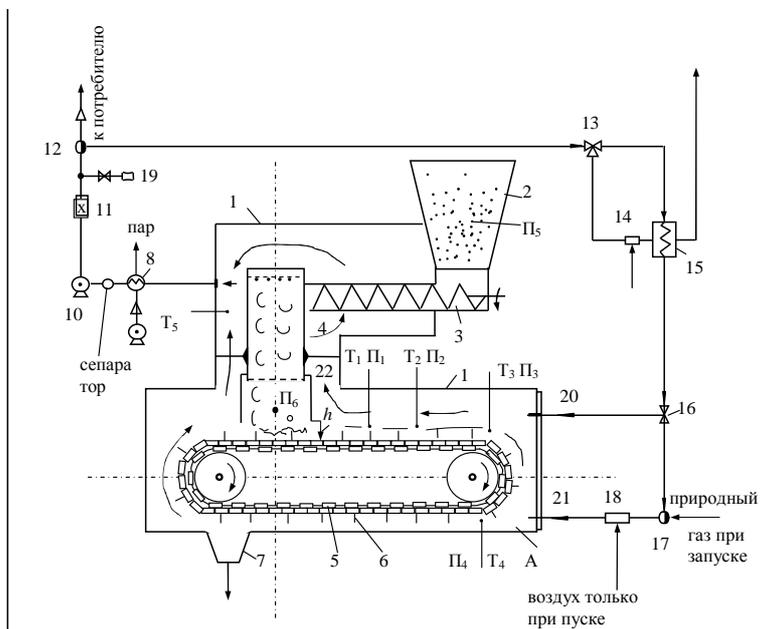


Рисунок 1 – Установка для пиролиза ТБО

1 – корпус реактора, теплоизолированный; 2 – бункер измельчённых отходов; 3 – дозировочный шнек с переменным шагом винта; 4 – камера для подачи отходов на пластинчатый конвейер; 5 – бесконечная лента с пластинами; 6 – упругие скребки; 7 – горловина для выгрузки золы; 8 – теплообменник; 9 – водяной насос; 10 – газодувка; 11 – хроматограф; 12 – распределительный вентиль; 13, 16 – трёхходовой вентиль; 14, 18 – смеситель газов пиролиза и воздуха; 15 – трубчатый подогреватель газов пиролиза до  $T = 1200 - 1300^{\circ}\text{C}$  (нагрев горелками беспламенного сжигания газа); 19 – ИК газоанализатор; 20, 21 – трубопроводы подачи пиролизного газа; 22 – устройство для регулировки  $h$ ;  $T_{1-5}$  – точки замера температур;  $\text{Pi}_{1-6}$  – точки отбора проб материала; А – плоскость нижней чистки камеры (1)

Исследования проводились в реакторе периодического действия трубчатого типа. В реактор помещалась плоская проволочная корзина из платиновой сетки. Корзина посредством хромель-алюмелевой проволоки соединялась с пружинными весами, установленными вне зоны реактора, чувствительность при фиксации изменения массы соизмерима с чувствительностью дериватографа Q-1500 фирмы МОМ. В корзину помещалась навеска измельчённых ТБО  $\sim 80$  г и располагалась одним слоем, толщиной  $h = 10$  мм (0,01 м). Корзина с навеской помещалась в предварительно нагретый реактор до температуры опыта. Затем реактор продувался в течение минуты азотом, а потом азот сразу заменялся на смесь газов, указанных выше. Скорость пропускаемых газов через реактор была на порядок выше скорости деструкции, которая предварительно определена по кривым ДТА, ДГГ снятым на дериватографе, поэтому взаимодействие газового питания с продуктами деструкции не учитывалось. Кривые изменения температуры в реакторе фиксировались хромель-алюмелевыми термопарами. Допускали, что вследствие относительно высокой скоростью движения потоков газа, процесс протекает при постоянных условиях, поэтому приняли, что изменение массы образца во времени даст информацию о кинетике пиролиза образца. Реактор имел герметичный ввод газов и вывод из него. На выходе из реактора газообразные продукты отбирали в ловуш-

ку, охладжаемую жидким азотом. Газообразные продукты исследовались на газовом хроматографе с ионизационным детектором, позволяющим определить CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, а также суммарные количества углеводородов C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>. Принятая нами методика исследований не отличается от общепринятых методик для исследования подобных процессов [20].

В качестве исходных образцов брались ТБО с полигона размер 0–150 мм, которая измельчалась в ножевом измельчителе с получением среднего размера частиц в интервале 1–10 мм. Морфологический состав полученных образцов был следующий % масс: бумага – 9–11; пищевые отходы 10–17; дерево 0,5–1; текстиль 0,8–1,6; стекло 0,5–1; кости 0,3–0,5; пластмасса 0,4; камни мелкие 0,2; отсев менее 15 мм – 15; влажность ~ 50; прочее ~ 3. Эти образцы ТБО содержат органическую составляющую ~ 81 % от сухой массы. Зольность смеси А° составляла ~ 32 %, выход летучих веществ V на сухую беззольную массу исходной смеси ~ 85 %, высшая теплота сгорания Q на горючую массу ~ 18, на сухую массу ~ 13 МДж/кг.

Как известно [19] органическая часть ТБО содержит два типа углерода: "летучий" и "основной". Первый образуется за счёт термического пиролиза и кинетика его выделения не зависит от состава газовой атмосферы. К первому типу углерода, образующегося при разложении органической составляющей, относятся летучие предельные и непредельные углеводороды. Ко второму типу относятся оставшийся углерод (коксый остаток), который разлагается под влиянием пиролизного газа содержащего пары воды.

Поэтому для осуществления кинетического анализа при лабораторных исследованиях для определения степени превращения при образовании "летучего" углерода использовали выражение:

$$X = \frac{(\Delta G/G_0) - V}{1 - V - A^\circ}, \quad (1)$$

где  $\Delta G$  – общая потеря массы образца, г;  $G_0$  – первоначальная масса образца, г;  $V$  – содержание летучих компонентов, %;  $A^\circ$  – содержание золы, %.

Это уравнение учитывает то, что при конверсии образцов в атмосфере не содержащей кислорода, потеря массы связана не только вследствие газификации, но и вследствие выделения неуглеродных компонентов, таких как азот, водород.

Таким образом, следует ожидать, что начальная декомпозиция образцов даёт газообразные продукты, золу и кокс. Начальная декомпозиция с образованием газообразных продуктов и кокса может моделироваться одномолекулярной реакцией декомпозиции первого порядка [4]:

$$\frac{dG_r}{d\tau} = k_i(G_0 - G_k), \quad (2)$$

где  $k_i$  – константа скорости реакции;  $G_r$  – количество газообразного продукта, г;  $G_0$  – первоначальная масса образца, г;  $G_k$  – количество твёрдого остатка, г.

Скорость декомпозиции твёрдого остатка  $G_k$  может быть выражена формулой:

$$\frac{dX}{d\tau} = k(1 - X)^{2/3} \exp(-aX^2), \quad (3)$$

где член  $(1 - X)^{2/3}$  пропорционален поверхности твёрдого остатка;  $\tau$  – время;  $\exp(-aX^2)$  – отображает реакционную способность поверхности, которая уменьшается с увеличением превращения при положительном значении параметра ( $a$ ), зависящего от температуры и состава газовой фазы. Уравнение (3) можно преобразовать после интегрирования к виду:

$$k\tau = \int_0^x \frac{\exp(-aX^2)}{(1-X)^{2/3}} dx. \quad (4)$$

Реакции, которые протекают при декомпозиции "основного" углерода с участием состава газовой фазы, являются важными и значимыми для второй стадии. Материал после потери "летучего" углерода контактирует с различными газами, которые диффундируют внутрь твёрдого остатка, адсорбируясь и реагируя на его внешней и внутренней поверхности. При этом можно принять, что все реакции являются необратимыми. Наиболее характерные из них: эндотермическая реакция взаимодействия углерода (C) с диоксидом углерода (CO<sub>2</sub>), экзотермическая реакция между углеродом (C) и водородом (H<sub>2</sub>), кроме того имеют место и гомогенные экзотермические реакции (пограничном слое и внутри слоя) между оксидом углерода (CO) и парами воды (H<sub>2</sub>O), оксидом углерода (CO) и кислородом (O<sub>2</sub>), который в том или ином виде входит в структурную формулы органической составляющей ТБО. Исходя из вышеизложенного, скорость расходования твёрдого остатка "основного" углерода представляется в виде:

$$\frac{\partial x}{\partial h} = -\frac{M_c}{\rho_0 W_H} \sum_{i=1}^{N_G} \nu_{ci} R_i, \quad (5)$$

где  $N_G$  – общее количество реакций между углеродом и газами;  $\rho_0$  – плотность твёрдого остатка после потери летучего углерода;  $M_c$  – массовая доля твёрдого компонента при  $\rho_0$ ;  $\nu_{ci}$  – стехиометрический коэффициент  $i$ -го компонента,  $i$ -ой реакции;  $W_H$  – начальное содержание углерода при  $\rho_0$ ;  $R_i$  – скорость протекания  $i$ -ой реакции.

Граничные условия (5) учитывают изменение толщины слоя ( $h$ ), полагая, что  $h$  уменьшается в размере за счёт исчезновения его структуры при определённых степенях превращения "основного" углерода в газообразные продукты реакции.

Следовательно,  $h = \text{const}$  до тех пор, пока степень превращения в слое не достигнет определённого значения  $X^*$ . Это условие задаётся выражением:

$$\frac{\partial x}{\partial h} = 0 \text{ при } h = a, \text{ если } X = X^*. \quad (6)$$

Параметр ( $a$ ) имеет смысл (или идентичен) параметру ( $a$ ) в уравнении (3).

Таким образом, уравнения (1-6) позволяют по потере массы обрабатываемых ТБО оценить кинетику процесса деструкции отходов при принятых условиях.

### **3. Результаты исследований процесса пиролиза ТБО на лабораторной установке.**

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости конверсии "летучего" углерода в зависимости от температуры опыта и времени.

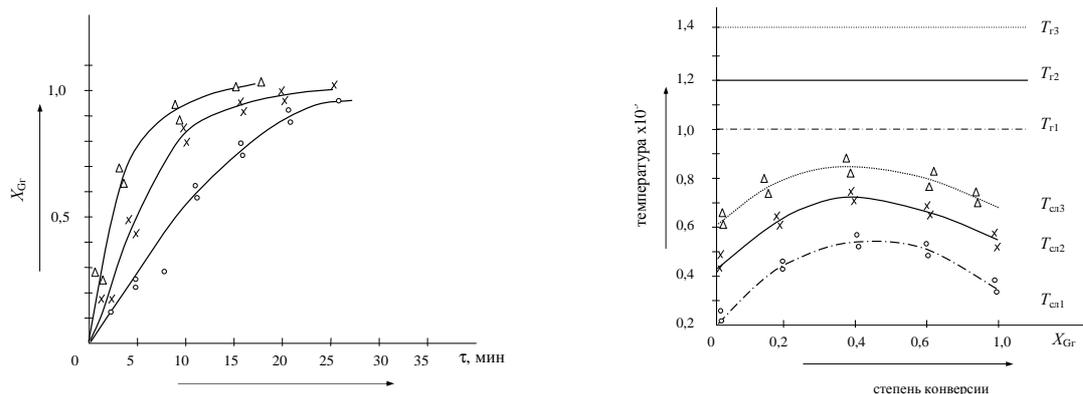


Рисунок 2 – Зависимость конверсии "летучего" углерода от времени при температурах вводимого пиролизного газа  $T_{Г1} - T_{Г3} - 1000, 1200, 1400$  °С, давление в реакторе  $P = 0,12$  МПа

Приведенные на рис. 2 экспериментальные результаты свидетельствуют, что скорость выделения "летучего" углерода зависит от температуры. При этом визуальные наблюдения за толщиной слоя  $h$  при конверсии, равной  $x = 1$ , показало, что толщина практически не изменяется, отклонение от первоначального размера  $h$  не превышает 10 %. Как показали химические анализы и наблюдения с помощью электронного микроскопа твёрдый осадок после удаления "летучего" углерода представляет собой смесь углерода, возможно битума и золы. Эта смесь по классификации [21] называется метапластом. Обработка кривых конверсии (рис. 2) позволила получить значение общей константы скорости  $k_i$  (уравнение 2). При температурах  $T_{сл1}$ ;  $T_{сл2}$ ;  $T_{сл3}$   $k_i$  соответственно равнялась  $2,4 \cdot 10^{-3}$ ;  $3,6 \cdot 10^{-3}$ ;  $4,2 \cdot 10^{-3}$  мин<sup>-1</sup>. Эти значения подтверждают зависимость конверсии летучего углерода от температуры. Анализ газовой фазы, отбираемой на ИК спектрометр и хроматограф показывает, что основные компоненты газа это  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $CO_2$ . Последнее подтверждает то, что действительно в результате деструкции ТБО на первом этапе образуются легколетучие компоненты. Среднее время пребывания для деструкции "легколетучего" углерода составляет 20–25 мин.

Экспериментальные данные по деструкции "основного" углерода приведены на рис. 3, 4.

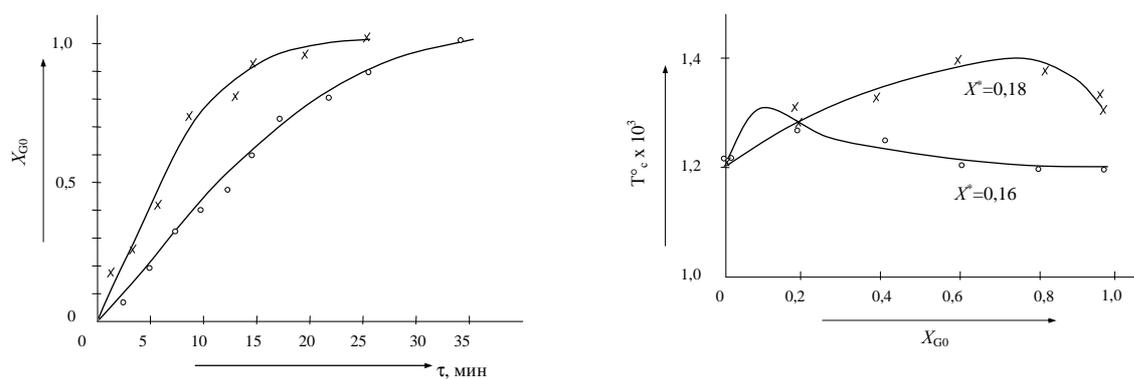


Рисунок 3 – Зависимость конверсии основного углерода от времени при  $T_G = 1200$  °С и  $T_G = 1400$ °С, соответственно точки -0- и -x-  $P = 0,128$  МПа

Приведенные на рис. 3 экспериментальные кривые свидетельствуют о влиянии температуры газовой фазы на процесс, а также на критическое значение  $X^*$ , при котором слой разрушается и теряет форму.

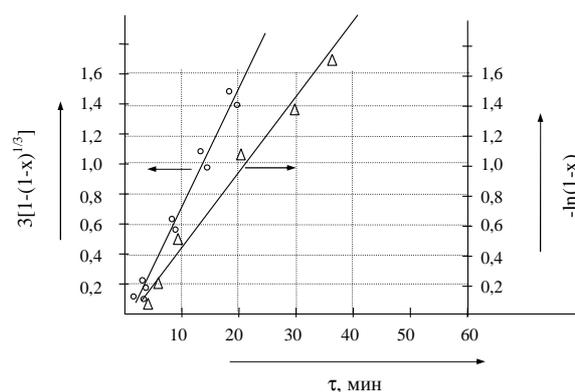


Рисунок 4 – Оценка константы скорости при  $T_r = 1200^\circ\text{C}$  ( $\Delta$ ) и температуре  $T_r = 1400^\circ\text{C}$  ( $\circ$ ),  $P = 0,128$  МПа

Изменение структуры слоя, то есть его распад, переводит процесс из кинетической области в диффузионную. При этом градиент температуры между разрушившемся слоем и  $T_r$  снижается, что приводит к уменьшению скорости процесса. Экспериментальные данные на рис. 3, преобразованы в соответствии с уравнением (4) и представлены на рис. 4.

При аппроксимации экспериментальных точек, полученных при различных  $T_r$ , линейная зависимость получалась при расчётах с  $[a] = 0$  (левая ось ординат) для  $T_r = 1400^\circ\text{C}$ , а при представлении данных, соответствующих опытам при  $1200^\circ\text{C}$  линейная аппроксимация имела место в случае при  $[a] = 1,0$  (правая ось ординат). Значение общей средней константы скорости процесса, оценённые по углу наклона линейной аппроксимации, соответствовали значениям  $1,2 \cdot 10^{-3}$ ;  $1,9 \cdot 10^{-3}$  мин $^{-1}$ . Отклонения от значения средней константы скорости в параллельных экспериментах не превышало 5–6%. Таким образом, скорость деструкции "основного" углерода в исследуемых условиях при постоянном по компонентом составе газовой фазы зависит от значения температуры подаваемого газа ( $T_r$ ).

Следует отметить влияние на значение  $X^*$  при различных  $T_r$ . Данные свидетельствуют, что при  $T_r = 1200^\circ\text{C}$  структура слоя сохраняется до  $X^* = 0,8$ , а при  $T_r = 1400^\circ\text{C}$  соответственно структура слоя сохраняется до  $X^* = 0,6$ . Исходя из этого следует считать, что время пребывания слоя ТБО на ленте пластинчатого транспортера в верхней зоне камеры (1) до момента поворота ленты и сброса материала в нижнюю зону камеры (1) должна учитывать время деструкции "летучего" углерода и время достижения  $X^*$ , при котором разрушается структура слоя.

**Выводы.** Выполнено исследование в лабораторных условиях процессов газификации и пиролиза образцов ТБО путём нагревания газами пиролиза при различных температурах. Интенсивность процесса полностью определяется температурным режимом. Установлена корреляция между общей константой скорости деструкции и переменными параметрами процессов. Предложено конструктивное оформление реакторной схемы процесса.

На основании полученных кинетических данных при исследовании процесса в лабораторных условиях приняты рекомендации, относительно скорости перемещения слоя материала (ТБО) в реакторе пиролиза и толщины слоя. Эти рекомендации определяют производительность реакторной установки при прочих равных условиях.

Литература

1. Благутина В.В. "Биоресурсы" / Сб. докладов по выставке и конференции "Биоэнергетика – 2006". – Изд. М. РАН. – 2007. – С. 36–39.
2. Гарин В.М., Кленова И.А., Колесников В.И. Экология для технических вузов. Серия Высшее образование. Ростов Н/Д, 2003. – 384 с.
3. Хван Т.А. Промышленная экология. – Ростов Н/Д: Феникс, 2003. – 320 с.
4. Коробкин В.И., Передельский Л.В. Экология – Ростов Н/Д, 2005 – 576 с.
5. Заявки 1018373 ЕПВ, МПК<sup>7</sup> B03B9/06 Verfahren zur Aufbereitung von Abfällen mit Gewinnung von organischem Einsatzmaterial für Zweistufige Entgasungs-Vergasungssysteme: Rs. T Luxembourg, S.A. Schmit Haus. №99630003.4 заяв. 40.01.99 опубл. 12.07.2000.
6. Пат. 2163326 Россия, МПК<sup>7</sup> F23G5/00 "Печь для термической переработки промышленных и бытовых отходов" Орлов Г.К., Буянов Н.И., Петров Ю.В. и др. №97112825/03 заявл. 28.07.1997 опубл. 20.02.2001.
7. Wang Zhigi, Chen Ping, Li Haibin and all Study on the hydrodynamics of a spouting – moving bed // Ind. and Eng. Chem. Res – 2001, 40. – №22. – С. 4983–4989.
8. Ванштейн Э.Ф. Высокоскоростной пиролиз – стадия процессов переработки отходов // Экология промышленного производства. ФГУН "ВИМИ", 2007.– в. 4.– С. 28–32.
9. Михайлюк В.М., Себко В.В., Шапоров В.П. О возможности переработки органических твёрдых отходов методом высокоскоростного пиролиза // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков: Технологический центр. – 2010. –№ 6/6 (48). – С. 27–32.
10. Ванштейн Э.Ф. Переработка органических полезных ископаемых и биомассы путем высокоскоростного подвода энергии // Экология промышленного производства. – 2007. – № 1. – С. 33–39.
11. Дорофеенко С.О. Численное моделирование движения сыпучего материала в реакторе шахтного типа // Теорет. основы химической технологии.– 2007.– т. 41.– №2.– С. 205.
12. Материалы Международной конференции "Рециклинг, переработка отходов и чистые технологии". В рамках выставки WASMA – 2005 / Управление отходами – М: 7 декабря 2005 "Перспективные технологии для переработки различных видов промышленных отходов". Докл. предст. фирмы "Austsmeet" (Австрия) – М. 2006.
13. Адамчук Б.И., Сметанюк Е.К., Боглаенко Д.В., Шапоров В.П. Обоснование эффективной технологии управления твёрдыми бытовыми отходами // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ "ХПИ".– 2007.– №8.– С. 63–71.
14. Шапоров В.П., Жабер М.А., Кансо В.А., Шапоров П.В. Методы, технологии и концепции утилизации твёрдых бытовых отходов (ТБО) и осадков сточных вод (ОСВ), образуемых при биологической очистке // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ "ХПИ".– 2005.– №14.– С. 3–30.
15. Шапоров В.П., Лопухина О.А., Жабер М.А., Кансо В.А., Шапоров П.В. Проблемы, возникающие при обращении с твёрдыми отходами и возможные пути их решения // Интегрированные технологии и ресурсосбережение.– Харьков.– 2005.– №1.– С. 3–9.

16. Новичков Ю.А. Разработка установки для утилизации резиновых шин методом пиролиза // Сб. докладов международной конференции "Сотрудничество для решения проблемы отходов". – Харьков. – 2007. – С. 132–133.

17. Поліщук О.В. Контроль та прогнозування техногенно-екологічної безпеки в районі Калцького гірничопромислового комплексу // Автореферат дисерт. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. Івано-Франківський національний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ. – 2011. – 20 с.

18. Авт. свид. СССР 913720 С10S3102; С10S3/14 Способ получения горючих газов из твёрдых углеродсодержащих и/или углеродводородсодержащих материалов. П.Г. Полетивкин, И.Ю. Рубанчук, В.Н. Сарцев 32859299/23-26 06.12.79, публ. запрещена.

19. Сариев В.Н., Рокхваргер А.Е., Бойко В.Н. Новая энерготехнологическая система полной переработки твёрдых бытовых и промышленных отходов // Сб. тезисов и докладов Международной конференции "Сотрудничество для решения проблемы отходов". Харьков. – 2010, с. 126–127.

20. Сметанюк Е.К., Лопухина О.А., Шаповров В.П. Исследование процесса высокотемпературного пиролиза отходов, содержащих органику // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2006. – №27. – С. 138–150.

21. Oh. M.S. Softening coal pyrolysis, SeD. Thests. Dept. Chem. Eng. M.J.T., Cambridge MA, 1985/

22. Сметанюк Е.К., Боглаенко Д.Б., Шаповров В.П. Реакторная схема переработки твёрдых бытовых отходов на основе метода сухого высокотемпературного пиролиза и особенности протекания процесса в газификаторе // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2006. – №43. – С. 3–21

#### Bibliography (transliterated)

1. Blagutina V.V. "Bioresursy" Sb. dokladov po vystavke i konferencii "Biojenergetika – 2006". – Izd. M. RAN. – 2007. – p. 36–39.

2. Garin V.M., Klenova I.A., Kolesnikov V.I. Jekologija dlja tehniceskikh vuzov. Serija Vysshee obrazovanie. Rostov N D, 2003. – 384 p.

3. Hvan T.A. Promyshlennaja jekologija. – Rostov N D: Feniks, 2003. – 320 p.

4. Korobkin. V.I., Peredel'skij L.V. Jekologija – Rostov N D, 2005 – 576 p.

5. Zajavki 1018373 EPV, MPK7 V03V9 06 Verfaehreu Zur Aufbereitung von Abfaellen mit Gewinnung von organischem Einsatzmaterial fuer Zweistufige Entyasung-Vergasungssysteme: Rs. T Luxembourg, S.A. Schmit Haus. #99630003.4 zajav. 40.01.99 opubl. 12.07.2000.

6. Pat. 2163326 Rossija, MPK7 F23G5 00 "Pech' dlja termicheskoj pererabotki promyshlennyh i bytovyh othodov" Orlov G.K., Bujanov N.I., Petrov Ju.V. i dr. #97112825 03 zajavl. 28.07.1997 opubl. 20.02.2001.

7. Wang Zhigi, Chen Ping, Li Haibin and all Study on the hydrodynamics of a spouting – moving bed Ind. and Eng. Chem. Res – 2001, 40. – #22. – p. 4983–4989.

8. Vanshtejn Je.F. Vysokoskorostnoj piroliz – stadija processov pererabotki othodov Jekologija promyshlennogo proizvodstva. FGUN "VIMI", 2007. – v. 4. – p. 28–32.

9. Mihajljuk V.M., Sebko V.V., Shaporev V.P. O vozmozhnosti pererabotki organicheskikh tvjordyh othodov metodom vysokoskorostnogo piroliza Vostochno-Evropejskij

zhurnal peredovyh tehnologij. – Har'kov: Tehnologicheskij centr. – 2010. –# 6 6 (48). – p. 27–32.

10. Vanshtejn Je.F. Pererabotka organicheskikh poleznyh iskopaemyh i biomassy putem vysokoskorostnogo podvoda jenerгии Jekologija promyshlennogo proizvodstva. – 2007. – # 1. – p. 33–39.

11. Dorofeenko S.O. Chislennoe modelirovanie dvizhenija sypuchego materiala v reaktore shahtnogo tipa Teoret. osnovy himicheskoy tehnologii.– 2007.– t. 41.– #2.– p. 205.

12. Materialy Mezhdunarodnoj konferencii "Recikling, pererabotka othodov i chistye tehnologii". V ramkah vystavki WASMA – 2005 Upravlenie othodami – M: 7 dekabrya 2005 "Perspektivnye tehnologii dlja pererabotki razlichnyh vidov pro-myshlennyh othodov". Dokl. predst. firmy "Austsmeet" (Avstrija) – M. 2006.

13. Adamchuk B.I., Smetanjuk E.K., Boglaenko D.V., Shaporev V.P. Obosnovanie jeffektivnoj tehnologii upravlenija tvjordymi bytovymi othodami Vestnik Nacio-nal'nogo tehničeskogo universiteta "Har'kovskij politehničeskij institut". – Har'kov: NTU "HPI".– 2007.– #8.– p. 63–71.

14. Shaporev V.P., Zhaber M.A., Kanso V.A., Shaporev P.V. Metody, tehnologii i koncepcii utilizacii tvjordyh bytovyh othodov (TBO) i osadkov stochnyh vod (OSV), obrazuemyh pri biologicheskoy ochistke Vestnik Nacional'nogo tehničeskogo universiteta "Har'kovskij politehničeskij institut". – Har'kov: NTU "HPI".– 2005.– #14.– p. 3–30.

15. Shaporev V.P., Lopuhina O.A., Zhaber M.A., Kanso V.A., Shaporev P.V. Problemy, vznikajushhie pri obrashhenii s tvjordymi othodami i vozmozhnye puti ih reshenija Integrirovannye tehnologii i resursosberezenie.– Har'kov.– 2005.– #1.– p. 3–9.

16. Novichkov Ju.A. Razrabotka ustanovki dlja utilizacii rezinovyh shin metodom piroliza Sb. dokladov mezhdunarodnoj konferencii "Sotrudnichestvo dlja re-shenija problemy othodov".– Har'kov.– 2007.– p. 132–133.

17. Polijchuk O.V. Kontrol' ta prognozuvannja tehnogenno-ekologichnoï bezpeki v rajoni Kalc'kogo girnichopromislovogo kompleksu Avtoreferat disert. na zdobuttja nauk. stupenja kand. tehn. nauk. Ivano-Frankivs'kij nacional'nij universitet nafti i gazu. – Ivano-Frankivs'k.– 2011.– 20 p.

18. Avt. svid. SSSR 913720 S10S3102; S10S3 14 Sposob poluchenija gorjuchih gazov iz tvjordyh uglerodsoderzhashhij i ili ulerodvodorodsoderzhashhij materialov. P.G. Pole-tivkin, I.Ju. Rubanchuk, V.N. Sarcev 32859299 23-26 06.12.79, publ. zapreshhena.

19. Sariev V.N., Rokhvarger A.E., Bojko V.N. Novaja jenergotehnologičeskaja sistema polnoj pererabotki tvjordyh bytovyh i promyshlennyh othodov Sb. tezisov i dokladov Mezhdunarodnoj konferencii "Sotrudnichestvo dlja reshenija problemy otho-dov". Har'kov. – 2010, p. 126–127.

20. Smetanjuk E.K., Lopuhina O.A., Shaporev V.P. Issledovanie processa vysokotemperaturnogo piroliza othodov, sodержashhij organiku Vestnik Nacional'nogo tehničeskogo universiteta "Har'kovskij politehničeskij institut". – Har'kov: NTU "HPI".– 2006.– #27.– p. 138–150.

21. Oh. M.S. Softening coal pyrolysis, SeD. Thests. Dept. Chem. Eng. M.I.T., Cambridge MA, 1985

22. Smetanjuk E.K., Boglaenko D.B., Shaporev V.P. Reaktornaja shema pererabotki tvjordyh bytovyh othodov na osnove metody suhogo vysokotemperaturnogo piroliza i osobennosti protekanija processa v gazifikatore Vestnik Nacional'nogo tehničeskogo universiteta "Har'kovskij politehničeskij institut". – Har'kov: NTU "HPI".– 2006.– #43.– p. 3–21

УДК 628.4

Шаповрев В.П., Себко В.В., Михайлюк В.М.

**ПРИНЦИПОВА СХЕМА РЕАКТОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПІРОЛІЗУ  
ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ У РУХОМОМУ ШАРІ ТА  
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО УСТАНОВЛЕНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ**

Проведені теоретичні і експериментальні дослідження процесу високотемпературного піролізу твердих побутових відходів за рахунок аллотермічного нагріву ТПВ за допомогою гарячих газів, що утворюються в реакторі. Встановлені основні закономірності деструкції органічної складової ТПВ. Розроблена принципова реакторна схема піролізу ТПВ.

Shaporev V.P., Sebko V.V., Mikhailiuk V.M.

**FUNDAMENTAL SCHEME OF A FLUIDISED-BED REACTOR EQUIPMENT FOR  
MUNICIPAL SOLID WASTE AND EXPERIMENTALLY DETERMINED  
CHARACTERISTICS OF THE PROCESS**

Theoretical and experimental research of high-temperature pyrolysis process has been carried out as a result of allometric heating of municipal solid waste using hot gases generated in the reactor. Basic destruction mechanism of municipal solid waste's organic composition has been derived. Fundamental reaction scheme for municipal solid waste pyrolysis has been developed.

УДК 621.3.014.33:389

Болюх В.Ф., Винниченко А.И.

## КОНЦЕПЦИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ЛАЗЕРНОГО ГРАВИМЕТРА ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

**Введение.** Одной из задач, возникающих при модернизации баллистического лазерного гравиметра (БЛГ) с симметричной схемой измерения ускорения свободного падения  $g$  (вертикальное подбрасывание и свободное падение пробного тела (ПТ) с оптическим отражателем) является повышение его эффективности [1–3]. Особенно актуальна указанная задача для БЛГ ДЕГУ 02-02-96, являющегося государственным первичным эталоном ускорения свободного падения  $g$  [4, 5].

Трудность задачи заключается в том, что БЛГ с одной стороны является оптико-электромеханическим, а с другой стороны – вакуумным прибором. При этом оптические и механические детали БЛГ работают в вакууме в течение продолжительного времени при изменяемых условиях окружающей среды. Погрешности современных баллистических лазерных гравиметров можно разделить на две основные составляющие: случайную, которая обусловлена влиянием некомпенсированной части вибросейсмических помех и уменьшается путем усреднения результатов многократных измерений, и систематическую, вызванную нестабильностью и неопределенностью параметров измерительной установки. Величина случайной погрешности после статистической обработки составляет 1 мкГал, в то время как суммарная среднеквадратичная систематическая погрешность достигает 3,5 мкГал. Основными источниками систематической погрешности являются (в мкГал): остаточный газ в вакуумной камере – 2,0; вертикальные и наклонные колебания постаментов, на которых поднимают гравиметр для увеличения высоты полета ПТ – 1,5; погрешность измерения времени свободного полета ПТ – 1,5; градиент температур внутри вакуумной камеры – 1,0; отклонение от вертикали лазерного луча и траектории полета ПТ – 1,0; погрешность измерения пути полета ПТ – 1,0 [6].

Таким образом, основные погрешности вызваны электромеханической катапультой, осуществляющей подбрасывание ПТ с оптическим отражателем, который взаимодействует с интерферометром БЛГ, и неравномерностью распределения температуры внутри вакуумной камеры, поскольку из-за температурных градиентов возникают дополнительные силы, изменяющие характер движения ПТ [6, 7].

БЛГ государственного первичного эталона  $g$  ДЕГУ 02-02-96 состоит из вакуумной камеры 1, в которой расположены пантограф 2, соединенный с кареткой 3 сверху и с якорем 4 тягового электромагнита 5 внизу (рис. 1а). Сверху вакуумной камеры установлено кварцевое стекло 6, через которое лазерный интерферометр 7 взаимодействует с оптическим отражателем, закрепленном на ПТ 8. На наружной поверхности вакуумной камеры расположены электрические нагреватели 9, обеспечивающие необходимый уровень температуры, и пенопластовая теплоизоляция 10. На силовом фланце 11 сверху установлен защитный кожух 12 вакуумной камеры, а снизу – кожух 13 электромагнита.

Электрические нагреватели 9 пропитаны лаком со специальной пастой, покрыты стеклотканью и подключены к электронному блоку термостатирования, который обеспечивает поддержание температуры  $+40 \pm 2$  °С стенок вакуумной камеры. Однако, как показывают расчеты распределения температуры, проведенные с использованием полевой модели методом конечных элементов по программе FEMM, при данном распо-

ложении нагревателей внутри вакуумной камеры возникает существенный аксиальный градиент температур (рис. 1б). Кроме того, температура на оси гравиметра несколько отличается от температуры стенок, особенно вверху и внизу вакуумной камеры.

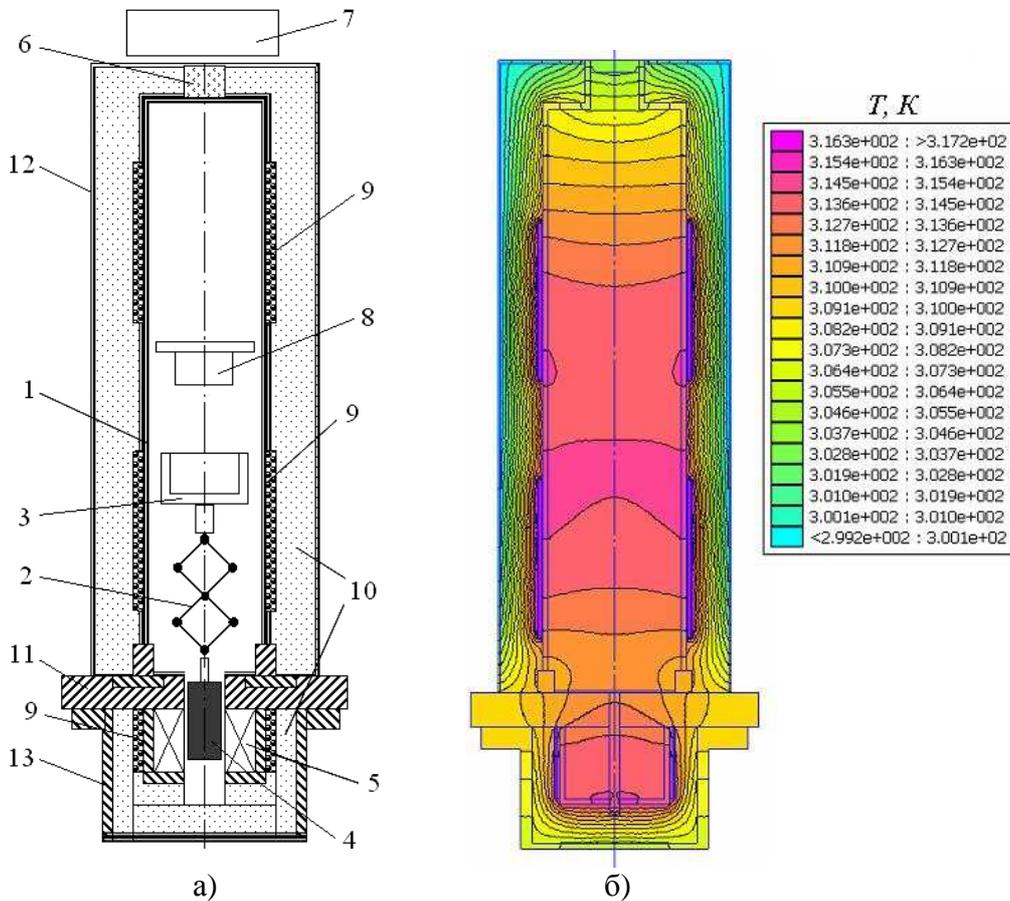


Рисунок 1 – Конструктивная схема (а) и распределение температур (б) БЛГ ДЕГУ 02-02-96

Иным существенным недостатком известного БЛГ является многоступенчатое преобразование электрической энергии в кинетическую для ПТ, поскольку включает перемещение якоря 4 вниз под действием магнитного поля электромагнита 5, осевое разжимание и радиальное сжимание пантографа 2, механическое взаимодействие подшипников каретки и якоря с направляющими элементами (на рис. 1б не показаны). За счет пантографа возрастают габариты нерабочей зоны вакуумной камеры 1. Из-за механического взаимодействия подвижных с неподвижными элементами в вакууме необратимо изменяются контактные поверхности: возникают микроскопические трещины, разрушаются поверхностные, например, окисные пленки, повышается коэффициент трения, а износ элементов может достичь недопустимых величин, исключающих нормальное функционирование гравиметра [8].

Взаимодействие ферромагнитного якоря с обмоткой катушки электромагнитного привода не позволяет из-за насыщения ферромагнитного материала регулировать скорость каретки 3 в необходимых пределах с обеспечением заданной величины и точности. Поэтому для изменения высоты подбрасывания ПТ гравиметр поднимают на специальную постамент, что обуславливает дополнительную погрешность в измерения ускорения свободного падения  $g$  [5].

**Целью статьи** является обоснование концепции БЛГ повышенной эффективности с прямым преобразованием электрической в кинетическую энергию при обеспечении минимального температурного градиента вдоль оси вакуумной камеры.

В качестве технических решений, обеспечивающих решение поставленной цели, предлагается использование системы электронагревательных элементов, обеспечивающих минимальный температурный градиент на оси гравиметра, и импульсного индукционно-динамического привода, при котором обеспечиваются уменьшенные габариты нерабочей зоны вакуумной камеры, улучшенные регулировочные характеристики при отсутствии механических контактных взаимодействий.

### Выбор параметров системы электронагревательных элементов

Обеспечение минимального градиента вдоль оси при заданном уровне температуры внутри вакуумной камеры БЛГ путем выбора параметров нагревателей осуществим при минимизации показателей:

$$\Theta = |T_a - T|/T_a; \vartheta = (T_{\max} - T_{\min})/\delta; N; V_a, \quad (1)$$

где  $T_a, T_{\max}, T_{\min}$  – заданная, максимальная и минимальная температуры в объеме вакуумной камеры;  $\delta = r, z$  – пространственная координата;  $N, V_a$  – количество и объем нагревателей.

Для решения задачи выбираются параметрические и функциональные ограничения

$$N \rightarrow \min; z_1^h \leq z_0^h; z_k^h > z_k^l; z_{k+1}^h < z_k^l; z_N^l \geq z_0^l; w_k \leq w_{\max}; k \in [1, N], \quad (2)$$

где  $z_0^h, z_0^l$  – соответственно, верхняя и нижняя граничные координаты расположения нагревателей вдоль оси вакуумной камеры;  $z_k^h, z_k^l$  – соответственно, верхняя и нижняя координаты расположения  $k$ -ого нагревателя вдоль оси вакуумной камеры;  $w_{\max}$  – максимальная удельная мощность тепловыделений нагревателя.

Для решения задачи используем иерархический подход, при котором высший приоритет присвоен критерию, характеризующему степень нарушения поискового пространства, т.е. выход за пределы  $\{a_i, b_i\}$  разрешенных границ векторов независимых переменных  $x_i$

$$U_1(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^5 (\max\{0; a_i - x_i\} + \max\{0; x_i - b_i\}). \quad (3)$$

Следующим по важности выступает критерий, характеризующий отклонение температуры от заданной

$$U_2(x) = \min\{\Theta(x)\}. \quad (4)$$

далее – критерий, характеризующий пространственный градиент температур

$$U_3(x) = \min\{\vartheta(x)\}. \quad (5)$$

По степени убывания важности следуют критерии, определяющие количество и размеры нагревателей

$$U_4(x) = \min\{N(x)\}; \tag{6}$$

$$U_5(x) = \min\{V_a(x)\}. \tag{7}$$

Решение  $x = x^*$  считается найденным, если выполняются условия:

$$U_1(x^*) = U_2(x^*) = U_3(x^*) = 0; U_4(x^*) = \min f_1; U_5(x^*) = \min f_2. \tag{8}$$

Стратегия нахождения решения  $m$  переменных в поисковом пространстве заключается в совместном использовании глобального метода оптимизации, осуществляющего случайный поиск параметров нагревателей в заданном пространстве, предотвращая попадание в локальный экстремум, и локального метода, обеспечивающего стягивание области параметров с глобальным экстремумом до минимальных размеров [9].

Для глобальной оптимизации используем генетические алгоритмы, основанные на механизмах популяционной генетики. Работа генетических алгоритмов представляет итерационный процесс, который продолжается до выполнения условия (8) с заданной точностью. В качестве метода локальной оптимизации для поиска минимума критерия оптимальности  $\Phi(X)$  в  $n$ -мерном евклидовом пространстве  $R^n$

используется метод Нелдера-Мида, осуществляющий изменение текущего симплекса.

$$\min \Phi(X) = \Phi(X^*) = \Phi^*, X \in R^n \tag{9}$$

используется метод Нелдера-Мида, осуществляющий изменение текущего симплекса.

На основании соотношений (6)–(21) разработана компьютерная программа, блок-схема которой представлена на рис. 2, обеспечивающая выбор параметров и аксиальное расположение электрических нагревателей, при которых

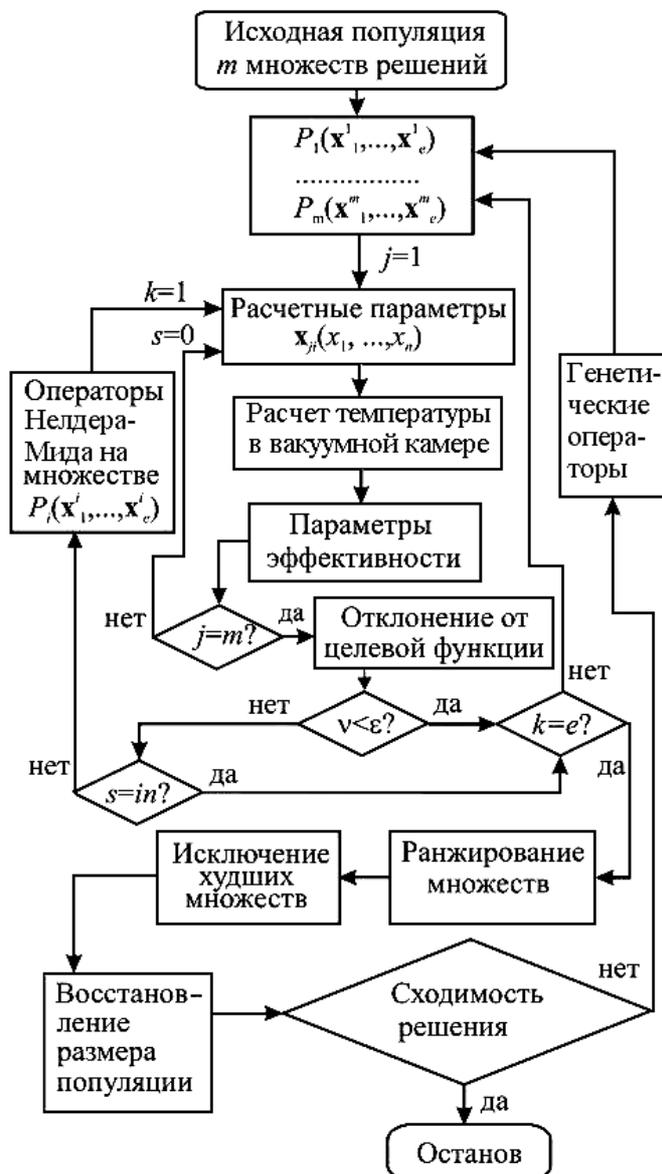


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма выбора электрических нагревателей

формірується виможене розподілення температур всередині вакуумної камери БГ.

На рис. 3 показана конструктивна схема і температурне поле усовершенствованного БЛГ, у якого аналогічні елементи позначені так же, як і у відомого (рис. 1а). В запропонованому гравиметрі змінено параметри нагрівачів і застосовано імпульсний індукційно-динамічний привод, що складається з виконаних в формі дисків неподвижного індуктора 14, електропровідного якоря 15 і силового диска 16, взаємодіючого з кареткою 3 (рис. 3а).

Мінімальний градієнт при заданому рівні температури  $T_{cp} = 313$  К забезпечують нагрівачі  $\text{ЭН}_1$ – $\text{ЭН}_4$ , охоплюючі вакуумну камеру. Все нагрівачі мають різні теплові (потужність  $P$ ) і геометричні (аксіальна висота  $h$ ) параметри, які представлені в табл. 1 (номери нагрівачів відраховуються зверху вниз).

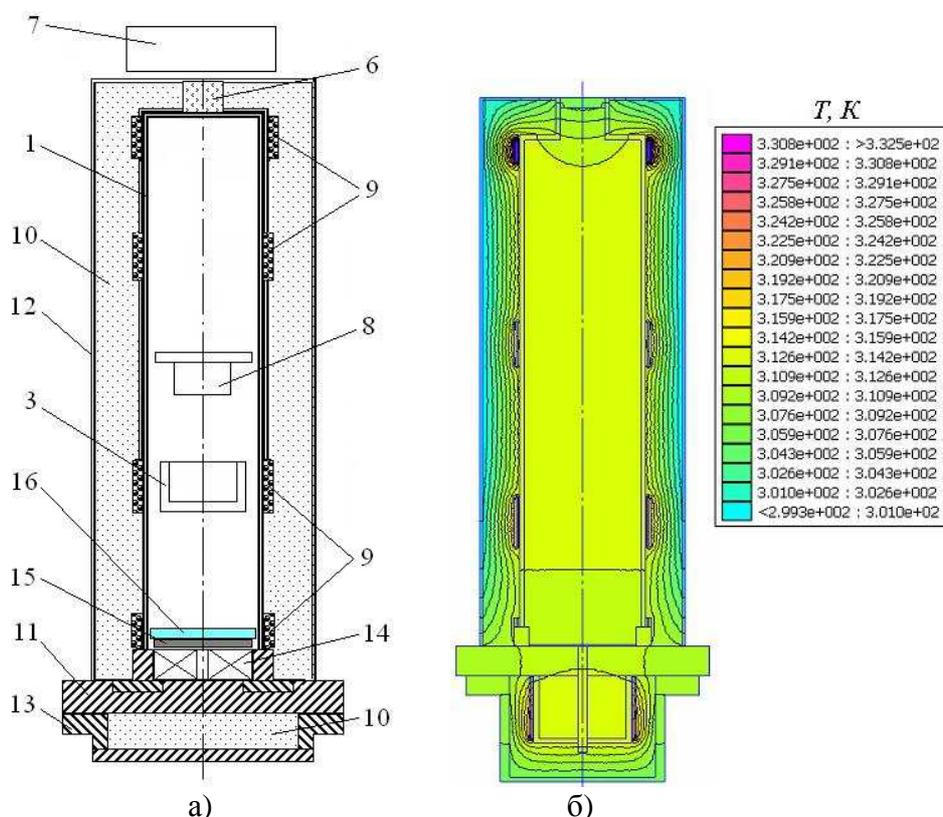


Рисунок 3 – Конструктивна схема (а) і розподілення температур (б) модернізованого БЛГ підвищеної ефективності

Таблиця 1 – Параметри нагрівачів модернізованого БЛГ

Нагрівачі	$T_{cp}$ , К	$h$ , мм	$P$ , Вт	$F_r$ , Вт/м <sup>2</sup>	$F_z$ , Вт/м <sup>2</sup>
$\text{ЭН}_1$	332,42	20	7,63	-234,3	23,5
$\text{ЭН}_2$	315,65	47	2,39	-10,4	-0,5
$\text{ЭН}_3$	317,89	51	4,41	-45,5	-27,6
$\text{ЭН}_4$	312,16	10	6,53	-13,4	-3692,7

Найменша середня температура спостерігається в несучому фланці  $T_{cp} = 310,2$  К, теплові потоки якого в радіальному і аксіальному напрямках, відповідно,

составляют  $F_r = 1452,2 \text{ Вт/м}^2$  и  $F_z = 177,3 \text{ Вт/м}^2$ . В результате полученного теплового поля внутри вакуумной камеры возникают температурные градиенты в радиальном  $G_r = -2,77 \text{ К/м}$  и аксиальном  $G_z = 0,081 \text{ К/м}$  направлениях. При этом общий объем нагревателей  $V_a$  модернизированного БЛГ уменьшился на 44 % по сравнению с ДЕТУ 02-02-96.

Как показывают расчеты, температура на оси практически совпадает с температурой стенки, но лишь в средней части вакуумной камеры. В верхней части камеры температура на оси становится заметно ниже, а в нижней части – несколько выше, чем на стенках. При этом в БЛГ ДЕТУ 02-02-96 в средней части вакуумной камеры наблюдается область повышенной температуры, а снизу и особенно сверху – область пониженной температуры, что и обуславливает значительный аксиальный градиент температуры. В модернизированном БЛГ указанный эффект снижен, что способствует повышению точности измерения ускорения свободного падения.

### **Импульсный индукционно-динамический привод**

Для осуществления непосредственного преобразования электрической энергии источника в кинетическую применен импульсный индукционно-динамический привод [10]. При возбуждении неподвижного индуктора 14 от емкостного накопителя однополупериодным импульсом в якоре 15 индуцируются вихревые токи, взаимодействие которых с магнитным полем индуктора приводит к возникновению электродинамической силы, отталкивающей якорь от индуктора. Для расчета распределенного тока массивный медный якорь представляется совокупностью  $N$  короткозамкнутых контуров, равномерно распределенных по его объему, что позволяет описать электрические процессы в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 R_0(T_0) \cdot i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_0 dt + M_{01}(z) \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{0k}(z) \times \\
 \times \frac{di_k}{dt} + V(t) \left( i_1 \frac{dM_{01}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{0k}}{dz} \right) = U_0 \quad (10) \\
 R_k(T_k) \cdot i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + M_{0k}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{1k} \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{k-1k} \times \\
 \times \frac{di_{k-1}}{dt} + V(t) \left( i_0 \frac{dM_{0k}}{dz} + i_1 \frac{dM_{1k}}{dz} + \dots + i_{k-1} \frac{dM_{k-1k}}{dz} \right) = 0,
 \end{aligned}$$

где  $i_0, L_0, R_0$  – ток, индуктивность и сопротивление индуктора соответственно;  $i_{1..k}, L_{1..k}, R_{1..k}$  – соответственно ток, индуктивность и сопротивление короткозамкнутого 1... $k$ -го контура якоря, перемещающегося со скоростью  $V(t)$  вдоль оси  $z$ ;  $M_{kp}$  – взаимная индуктивность между соответственными токовыми элементами ( $k \neq p$ );  $T_0 \dots T_k$  – температура 0... $k$ -го активного элемента;  $C, U_0$  – емкость и зарядное напряжение емкостного накопителя.

Вертикальное перемещение якоря  $\Delta Z$  возникает под действием электродинамической силы

$$f_z(t) = i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz}(z). \quad (11)$$

Скорость якоря представляется в виде рекуррентного соотношения:

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) + \frac{t_{n+1} - t_n}{m_1 + m_2} i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz} - g(m_1 + m_2), \quad (12)$$

где  $m_1, m_2$  – масса якоря с силовым диском и ПТ соответственно.

Регулирования высоты и времени свободного полета ПТ в вакуумной камере предлагаемого БЛГ осуществляется изменением параметров емкостного накопителя.

На рис. 4 представлены электродинамические и механические характеристики импульсного индукционно-динамического привода, полученные путем изменения емкости  $C$  и напряжения  $U_0$  емкостного накопителя. Для возбуждения индуктора используется схема с однополупериодным импульсом, что позволяет сохранить часть энергии емкостного накопителя для повторного импульса возбуждения индуктора, необходимого для электродинамического торможения падающего якоря при приближении к индуктору.

При увеличении емкости  $C$  накопителя импульс электродинамической силы  $f_z(t)$  возрастает как по величине, так и по длительности, что обуславливает практически линейное возрастание высоты подбрасывания и времени свободного движения ПТ (рис. 5а). При увеличении напряжения  $U_0$  емкостного накопителя величина импульса электродинамической силы  $f_z(t)$  изменяется практически в квадратичной зависимости при сохранении его длительности (рис. 5б). При этом высота подбрасывания и время свободного движения ПТ увеличиваются еще в большей пропорции.

Таким образом, предлагаемый БЛГ обладает повышенной эффективностью за счет непосредственного преобразования электрической энергии в кинетическую для ПТ. При этом практически отсутствует нерабочая зона в вакуумной камере из-за отсутствия вспомогательных элементов преобразователя. Из-за отсутствия механического взаимодействия между подвижными и неподвижными элементами в вакууме не ухудшается состояние контактных поверхностей, что повышает надежность и увеличивает срок эксплуатации гравиметра.

Высоту подбрасывания и время свободного полета ПТ можно легко регулировать при помощи изменения параметров емкостного накопителя энергии, возбуждающего неподвижный индуктор импульсного индукционно-динамического привода без изменения положения гравиметра относительно исследуемой поверхности, что способствует уменьшению систематической погрешности БЛГ.

В предлагаемом гравиметре уменьшена систематическая погрешность за счет устранения колебаний постаменты, на который поднимают гравиметр для увеличения высоты полета ПТ, более точного измерения времени и пути свободного полета, уменьшения градиента температур внутри вакуумной камеры и уменьшения отклонения от вертикали траектории полета ПТ.

### Заключение

Показано, что основные погрешности БЛГ ДЕУ 02-02-96, являющегося государственным первичным эталоном ускорения свободного падения, вызваны электромеханической катапульты, использующей электромагнитный привод с пантографом, и неравномерностью распределения температуры внутри вакуумной камеры, формируемой электрическими нагревателями.

В БЛГ повышенной эффективности предлагается использование модернизированной системы электронагревательных элементов, обеспечивающих минимальный

температурний градієнт на осі гравиметра, і імпульсного індукційно-динамічного привода, при якому забезпечується пряме преобразование електричної енергії в кінетическу енергію вертикального переміщення, зменшені габарити неробочої зони вакуумної камери, уділені регулювочні характеристики при відсутності механічних контактних взаємодій.

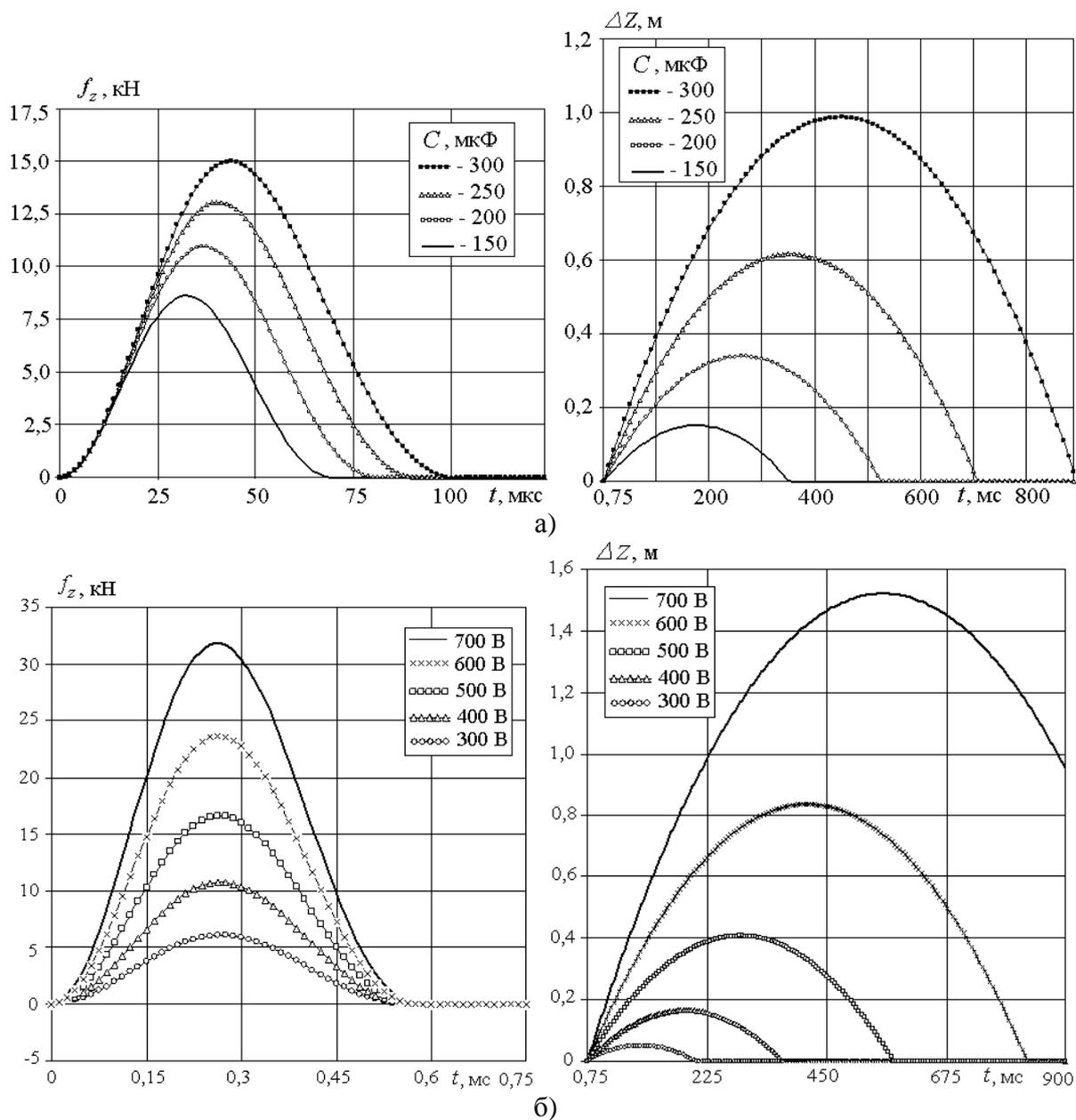


Рисунок 4 – Електродинамічні  $f_z(t)$  і механічні  $\Delta Z(t)$  характеристики імпульсного індукційно-динамічного привода

### Література

1. Грушинський Н.П. Основи гравиметрії. – М.: Наука, 1983. – 356 с.
2. Визначення сили тяжесті на морі / Під ред. Н.П. Грушинського – М.: Недра, 1970. – 248 с.

3. Измерение силы тяжести / Под ред. Ю.Д. Буланже.– М.: Наука, 1981. – 96 с.
4. Коронкевич, В.П., Арнаутов, Г.П., Стусь, Ю.Ф. Абсолютный лазерный баллистический гравиметр // Препринт ИАиЭ СО АН СССР.– Новосибирск.– 1982. – № 196.– 37 с.
5. ДСТУ 3382-96. Державна повірочна схема для засобів вимірювань прискорення сили ваги.
6. Арнаутов Г.П. Оптические схемы абсолютных лазерных баллистических гравиметров // Автотриметрия.– 1998.– № 6 – С. 53–64.
7. Леонтьев В.И. Лабораторные исследования термостата гравиметра ГАГ-3 // Сб. науч. тр. Повторные гравиметрические наблюдения. – М.: изд. МГК, 1988.– С. 60–74.
8. Крагельский И.В. и др. Трение и износ в вакууме. – М.: Машиностроение, 1973.– 216 с.
9. Bolyukh V.F., Lysenko L.I., Bolyukh E.G. Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters // Russian Electrical Engineering.– 2004.– Vol. 75.– № 12. – P. 1–11.
10. Болюх В.Ф., Данько В.Г. Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. – Харків: НТУ «ХПІ».– 2006.– 260 с.

**Bibliography (transliterated)**

1. Grushinskij N.P. Osnovy gravimetrii. – М.: Nauka, 1983. – 356 p.
2. Opredelenie sily tjazhesti na more Pod red. N.P. Grushinskogo – М.: Nedra, 1970. – 248 p.
3. Izmerenie sily tjazhesti Pod red. Ju.D. Bulanzhe.– М.: Nauka, 1981. – 96 p.
4. Koronkevich, V.P., Arnautov, G.P., Stus', Ju.F. Absoljutnyj lazernyj balli-sticheskiy gravimetr Preprint IAIJe SO AN SSSR.– Novosibirsk.– 1982. – # 196.– 37 p.
5. DSTU 3382-96. Derzhavna povirochna shema dlja zasobiv vimirjuvan' priskoren-nja sili vagi.
6. Arnautov G.P. Opticheskie shemy absoljutnyh lazernyh ballisticheskikh gra-vimetrov Avtometrija.– 1998.– # 6 – p. 53–64.
7. Leont'ev V.I. Laboratornye issledovanija termostata gravimetra GAG-3 Sb. nauch. tr. Povtornye gravimetricheskie nabljudenija. – М.: изд. МГК, 1988.– p. 60–74.
8. Kragel'skij I.V. i dr. Trenie i iznos v vakuume. – М.: Mashinostroenie, 1973.– 216 p.
9. Bolyukh V.F., Lysenko L.I., Bolyukh E.G. Parameters of high-efficiency pulsed inductive electromechanical converters Russian Electrical Engineering.– 2004.– Vol. 75.– # 12. – P. 1–11.
10. Bol'juh V.F., Dan'ko V.G. Linijni elektromehanichni peretvorjuvachi impul'snoї дії. – Harkiv: NTU «HPI».– 2006.– 260 p.

УДК 621.3.014.33:389

Болюх В.Ф., Вінніченко О.І.

**КОНЦЕПЦІЯ БАЛІСТИЧНОГО ЛАЗЕРНОГО ГРАВИМЕТРА  
ПІДВИЩЕНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ**

Запропонована концепція балістичного лазерного гравіметра підвищеної ефективності з модернізованою системою електронагрівальних елементів, які забезпечують мінімальний температурний градієнт на осі гравіметра, та з імпульсним індукційно-динамічним приводом, який забезпечує пряме перетворення електричної енергії в кінетичну енергію вертикального переміщення пробного тіла з оптичним відбивачем, зменшені габарити неробочої зони вакуумної камери, поліпшені регульовальні характеристики при відсутності механічних контактних взаємодій.

Bolyukh V.F., Vinnichenko A.I.

**CONCEPTION OF BALLISTIC LASER OF GRAVIMETERS  
PROMOTED EFFICIENCY**

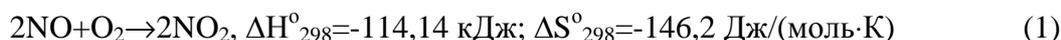
Conception of ballistic laser to the gravimeters promoted efficiency with the modernized system of electro heater system elements, providing a minimum temperature gradient on the axis of gravimeters, is offered, and with an impulsive induction-dynamic drive providing direct transformation of electric energy to kinetic energy of the vertical moving of trial body with an optical reflector, diminished sizes of non-working area of vacuuming chamber, improved regulation descriptions, in default of mechanical contact cooperations.

УДК 153.192

Кравченко И.В.

### К ВОПРОСУ О СОСУЩЕСТВОВАНИИ NO<sub>2</sub>, NO И O<sub>2</sub>

**Введение.** В условиях непрерывно протекающих процессов окисления



и кислотообразования



в производстве азотной кислоты равновесие реакции (1) не достигается, в результате чего в смеси газов присутствуют O<sub>2</sub>, NO и NO<sub>2</sub>. Полагают [1,2], что процесс является двухстадийным



В работах [3,4] сообщается о невозможности получения NO<sub>3</sub> в газовой фазе, т.к. образование промежуточного оксида NO<sub>3</sub> с симметричной структурой D<sub>3h</sub> является запрещенной по орбитальной симметрии и требует существенной энергии активации.

Исходные реагенты в реакции (1) считаются несовместимыми [5], и не должны сосуществовать в одном объеме из-за самопроизвольного взаимодействия.

С другой стороны, в атмосфере Земли кроме O<sub>2</sub> и NO<sub>2</sub> постоянно присутствует и NO [6].

**Целью** данной работы является установление возможных причин практического сосуществования данных газов в одном объеме, т.к. с этим связано и протекание реакции (2), осуществляемое в колонне абсорбции производства азотной кислоты, которая в настоящий момент требует интенсификации.

**Термодинамические расчеты.** Одним из путей увеличения скорости реакции (2) является активация реагентов, то есть воды и оксида азота (IV). Реакционная способность воды увеличивается гидродинамической кавитацией [7]. Реакционную способность NO<sub>2</sub> также можно повысить, т.к. в возбужденном состоянии молекулы NO<sub>2</sub> более активны, чем в основном состоянии. Молекула-радикал NO<sub>2</sub> в результате облучения электромагнитными волнами различных энергий может иметь три возбужденных метастабильных состояния, структура и термодинамические данные которых определены ранее [8] и представлены в таблице 1.

Сравним термодинамические характеристики реакций NO<sub>2</sub> различных состояний с водой.



В таблице 2 представлены термодинамические параметры компонентов этой реакционной системы.

Таблица 1 – Данные квантово-химического V3LYP/6-311++G(3df) расчета электронной структуры и термодинамических параметров для NO<sub>2</sub> в различных электронных состояниях и молекул N<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> в основных состояниях

Молекулярная система (электронное состояние)	$\Delta_f H^0_{298}$ кДж/моль	$S^0_{298}$ Дж/(моль·К)	$C^0_{p298}$ Дж/(моль·К)
NO <sub>2</sub> ( <sup>2</sup> A <sub>1</sub> ) основное состояние	26,6 <sup>a</sup> (34,19) <sup>б</sup>	239,7 (240,17)	36,8 (36,7)
NO <sub>2</sub> ( <sup>2</sup> B <sub>2</sub> ) 1-е возбужденное состояние	165,0 (130,7)	244,0 (-)	40,16 (-)
NO <sub>2</sub> ( <sup>2</sup> B <sub>1</sub> ) 2-е возбужденное состояние	189,2 (188,6)	192,12 (-)	39,4 (-)
ON-O( <sup>2</sup> A'') 3-е возбужденное состояние	239,0 (229,9)	254,1 (-)	42,7 (-)
N <sub>2</sub> ( <sup>1</sup> Σ <sub>g</sub> )	0,0 (0,0)	191,35 (191,50)	29,10 (29,12)
O <sub>2</sub> ( <sup>3</sup> Σ <sub>g</sub> )	0,0 (0,0)	204,90 (205,04)	29,28 (29,37)

а) Теплоты образования для основного состояния молекулярных систем рассчитаны относительно простых веществ O<sub>2</sub>(<sup>3</sup>Σ<sub>g</sub>) и N<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Σ<sub>g</sub>).

б) В скобках приведены значения из справочных данных. Используя экспериментальные значения энергетического положения возбужденных состояний: <sup>2</sup>B<sub>2</sub>(1 эВ), <sup>2</sup>B<sub>1</sub>(1,6 эВ), <sup>2</sup>A''(2,03 эВ) относительно основного состояния NO<sub>2</sub>(<sup>2</sup>A<sub>1</sub>), можно оценить их «экспериментальную» энтальпию образования  $\Delta_f H^0_{298}$ , например:  $\Delta H^0_{298}(\text{NO}_2(\text{B}_2)) = 34,2 + 96,5 = 130,7 \text{ кДж/моль}$ .

Таблица 2 – Термодинамические данные компонентов и параметры реакции (2\*)

Показатели	Вещество				Параметры реакции (2*)
	H <sub>2</sub> O <sub>(ж)</sub>	NO <sub>2</sub> ( <sup>2</sup> A <sub>1</sub> ) <sub>(г)</sub>	HNO <sub>3</sub> <sub>(ж)</sub>	HNO <sub>2</sub> <sub>(ж)</sub>	
$\Delta H^0_{298}$	- 285,83	2·34,19	-173,0	-77,0	$\Delta H^0_{298} = -32,55 \text{ кДж/моль}$
$S^0_{298}$	69,95	2·240,06	156,16	249,13	$\Delta S^0_{298} = -144,78 \text{ Дж/(моль·К)}$
$C^0_{p298}$	75,3	2·36,66	109,87	63,47	$\Delta C^0_{p298} = 10,62 \text{ Дж/(моль·К)}$

Стандартная свободная энергия  $\Delta G^0_{298}$  реакции (2\*) определялась уравнением  $\Delta G^0_{298} = \Delta H^0_{298} - T\Delta S^0_{298} = -32550 + 298 \cdot 144,78 = +10,62 \text{ кДж}$ . Положительное значение свободной энергии реакции в пределах от 0 до +42 кДж свидетельствует о термодинамической сомнительности ее протекания. С использованием данных таблицы 1 аналогичными расчетами определены свободные энергии реакций взаимодействия NO<sub>2</sub> возбужденных состояний с водой, которые представлены в таблице 3.

Из данных таблиц 3 и 2 видно, что сравнение термодинамической вероятности реакции (2\*) свидетельствует в пользу NO<sub>2</sub> возбужденных состояний. Подобная реакция осуществляется в атмосфере, поскольку осадки в виде дождя или снега всегда имеют слабокислую среду.

Переход молекул в возбужденное состояние обычно осуществляется фотохимически, причем для каждого состояния частота электромагнитного облучения (или длина

волны) различна и определяется спектром поглощения. При этом, переходы молекулы  $\text{NO}_2(^2\text{A}_1)$  из основного состояния в возбужденные состояния протекают с повышением её энтальпии образования, как показано в таблице 4.

Таблица 3 – Стандартные свободные энергии реакций взаимодействия  $\text{NO}_2$  возбужденных состояний с водой

Электронное состояние $\text{NO}_2$	$\Delta G^0_{298}$ , кДж	Термодинамическая вероятность
$\text{NO}_2(^2\text{A}_1)$	+10,62	сомнительна
$\text{NO}_2(^2\text{B}_2)$	-180,8	возможна
$\text{NO}_2(^2\text{B}_1)$	-326,8	возможна
$\text{NO}_2(^2\text{A}'')$	-372,4	возможна

Таблица 4 – Расчет величины изменения энтальпии образования в переходах  $\text{NO}_2$  из основного в возбужденные состояния

Переход	Величина повышения энтальпии образования, кДж
$\text{NO}_2(^2\text{A}_1) \rightarrow \text{NO}_2(^2\text{B}_2)$	130,7-34,19=96,51
$\text{NO}_2(^2\text{A}_1) \rightarrow \text{NO}_2(^2\text{B}_1)$	188,6-34,19=154,41
$\text{NO}_2(^2\text{A}_1) \rightarrow \text{NO}_2(^2\text{A}'')$	229,9-34,19=195,71

Практическая энергия возбуждения ( $E_{\text{практ}}$ ) должна быть несколько большей. Известно [9], что третье возбужденное состояние молекулы  $\text{NO}_2(^2\text{A}'')$  образуется из  $\text{NO}_2(^2\text{A}_1)$  основного состояния при облучении с длиной волны  $\lambda = 430$  нм (волновое число  $\omega = 23255,8 \text{ см}^{-1}$ ). Так как  $1 \text{ см}^{-1} = 11,963 \text{ Дж/моль}$ , то  $E_{\text{практ}}\text{NO}_2(^2\text{A}'') = 23255,8 \cdot 11,963 = 278,21 \text{ кДж/моль}$ .

Практические значения энергий возбуждения  $\text{NO}_2$  основного состояния для переходов в первое и второе возбужденные состояния в доступной нам литературе не обнаружены.

Для приближенной оценки значений энергий возбуждения  $E_{\text{практ}}$  первого и второго возбужденного состояния можно применить соотношение между  $E_{\text{практ}}$  и величиной повышения энтальпии для получения  $\text{NO}_2(^2\text{A}'')$  третьего возбужденного состояния, которое равно  $278,21/195,7=1,42$ .

Тогда  $E_{\text{практ}} \text{NO}_2(^2\text{B}_2) = 96,5 \cdot 1,42 = 137,2 \text{ кДж/моль}$  – это отвечает длине волны  $\lambda = 872$  нм, а  $E_{\text{практ}} \text{NO}_2(^2\text{B}_1) = 154,4 \cdot 1,42 = 219,48 \text{ кДж/моль}$  -  $\lambda = 545,6$  нм.

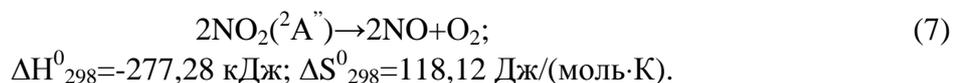
По данным [6] солнечное излучение с длиной волны менее 330 нм поглощается атмосферой до высоты 50 км, ниже этой высоты до поверхности Земли достигает излучение с длиной волны больше 330 нм. Вероятно, излучение с длинами волн 430 нм, 545,6 нм и 872 нм может быть на высотах от поверхности Земли до уровня тропосферы.

Закись азота, как менее инертное вещество, чем  $\text{N}_2$ , должно выводиться из тропосферы по реакциям [10]:

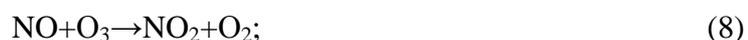


Если отнести исследуемые реакции (1,2) к условиям атмосферы, то можно полагать, что в природе свободный NO<sub>2</sub> в дневное время может находиться в возбужденных состояниях, а в ночное время – в основном состоянии.

Велика вероятность образования NO из возбужденных молекул NO<sub>2</sub>. Столкновение двух молекул диоксида азота любых возбужденных состояний приведет к экзотермической реакции образования двух молекул NO:



Реакция термодинамически разрешена при любой температуре. Вероятно, благодаря данной прямой экзотермической реакции (7), идущей в дневное время и обратной экзотермической реакции (1), но с образованием NO<sub>2</sub> основного состояния, проходящей в любое время суток, в атмосфере постоянно могут находиться молекулы NO и молекулы NO<sub>2</sub>, которые при попадании в озоновый слой (высота 20–25 км) повлекут его разрушение:



Реакция (1) с уменьшением объема и обратная ей реакция (7), но с участием возбужденного оксида азота (IV), идущая с увеличением объема, в перспективе могут послужить основой «вечного» двигателя с питанием от световых затворов.

Применительно к промышленным условиям из рассмотрения термодинамики реакции (2\*), в том числе и с участием NO<sub>2</sub> возбужденных состояний, следует, что в абсорбционной колонне для облегчения образования HNO<sub>3</sub> следовало бы использовать возбужденные изомеры NO<sub>2</sub>. Для этого достаточно было бы установить прозрачные окна в обечайке колонны и освещать реакционную массу некогерентным излучением с вычисленной длиной волны. Однако это будет возможно только в том случае, если скорости реакций взаимодействия NO<sub>2</sub> с водой будут значительно превышать скорость реакции (7).

**Кинетические расчеты.** Выполним теоретические расчеты по определению константы скорости реакции (7) и реакции (11)



при температуре 60°C, достигаемой в абсорбционной колонне.

Согласно уравнению Аррениуса для расчета константы скорости любой реакции необходимы значения предэкспоненциального множителя k<sub>0</sub> и экспериментальной энергии активации E. Согласно теории переходного состояния уравнение Эйринга-Поляны для константы скорости реакции, следующее:

$$k = e \cdot k_B / h \cdot T \cdot P \cdot e^{-E/RT}, \quad (12)$$

где k<sub>B</sub> – постоянная Больцмана; h – постоянная Планка; P – стерический множитель.

Из уравнения (12) видно, что k<sub>0</sub> определяется в том случае, если известен стерический множитель P. Известно [11], что значение стерического множителя бимолеку-

лярной реакции зависит от количества усредненных одинарных связей ( $m$ ) в продуктах реакции:

$$\lg P_{\text{бим}} = 0,113 - 3,117 \cdot \lg m. \quad (13)$$

Энергия активации простой бимолекулярной экзотермической реакции обмена определяется уравнением [12]:

$$E_{\text{экзо}} = \Delta G_{\text{экз}}/T + 0,847 \cdot R \cdot T. \quad (14)$$

С учетом уравнения (12) константа скорости бимолекулярной реакции обмена определится по формуле:

$$k_{\text{бим}} = 4,86 \cdot 10^{10} \cdot T \cdot P \cdot e^{-E/RT}, \text{ л}/(\text{моль} \cdot \text{с}). \quad (15)$$

Для тримолекулярной реакции  $A+B+C \rightarrow 2D$  стерический множитель в связи со стерическим множителем (13) обратной бимолекулярной реакции определится через константу равновесия. Для стандартных условий, с учетом уравнения переходного состояния для константы скорости, значение стерического множителя определяется выражением [13]:

$$P_{\text{трим}} = R \cdot T \cdot P_{\text{бим}} \cdot e^{\Delta S_{298\text{трим}}^0/R}, \quad (16)$$

где  $\Delta S_{298\text{трим}}^0$  – изменение энергии энтропии тримолекулярной реакции для  $T = 298 \text{ K}$ .

Энергия активации простой тримолекулярной экзотермической реакции определяется выражением [14]:

$$E_{\text{экзо}} = \Delta G_{\text{экз}}/T + 0,983 \cdot R \cdot T. \quad (17)$$

Константа скорости простой тримолекулярной реакции определяется выражением [15]:

$$k_{\text{трим}} = 5,569 \cdot 10^7 \cdot R \cdot T^2 \cdot P_{\text{трим}} \cdot e^{-E_{\text{трим}}/RT}, \text{ л}^2(\text{моль}^2/\text{с}). \quad (18)$$

В таблице 5 представлены результаты расчета кинетических параметров реакций (7) и (11) и их обсуждение.

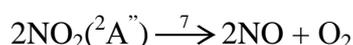


Таблица 5 – Расчет параметров реакции (7)

	$\text{NO}_2(^2A'')$	$\text{NO}$	$\text{O}_2$	Для реакции (7)
$\Delta H_{298}^0$	2·229,9	2·91,26	0	$\Delta H_{298}^0 = -277,28 \text{ кДж/моль}$
$S_{298}^0$	2·254,1	2·210,64	205,04	$\Delta S_{298}^0 = 118,12 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{K})$
$C_p^0_{298}$	2·48,7	2·29,86	29,37	$\Delta C_p^0_{298} = -8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{K})$

Реакция бимолекулярная обмена  $m = 6$ ,  $P_{\text{бим}} = 0,0049$ ,  $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$  (333 K).

$$k_0 = 4,861 \cdot 10^{10} \cdot 333 \cdot 0,0049 = 7,9317 \cdot 10^{10}$$

$$\Delta H_{333}^0 = -277280 - 8,31 \cdot (333 - 298) = -277569,5 \text{ Дж/моль}$$

$$\Delta S_{333}^0 = 118,12 - 8,31 \cdot (\ln 333 - \ln 298) = 117,2 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$$

$$E_{\text{экзо}} = \Delta G_{\text{экз}}/333 + 0,847 \cdot 8,314 \cdot 333 = (-277569,5 - 117,2 \cdot 333)/333 + 2344,97 = 1394,2 \text{ Дж}$$

$$k = 7,9317 \cdot 10^{10} \cdot e^{-1394,2/8,314 \cdot 333} = 4,7936 \cdot 10^{10} \text{ л/(моль} \cdot \text{с)}$$

Принимаем, что реакция (11) является простой тримолекулярной:

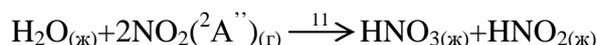


Таблица 6 – Расчет параметров реакции (11)

	H <sub>2</sub> O <sub>(ж)</sub>	NO <sub>2</sub> ( <sup>2</sup> A'')	HNO <sub>3</sub>	HNO <sub>2</sub>	Для реакции (11)
ΔH <sub>298</sub> <sup>0</sup>	-285,83	2.229,9	-173,0	-77,0	ΔH <sub>298</sub> <sup>0</sup> = -423,97 кДж/моль
S <sub>298</sub> <sup>0</sup>	69,95	2.254,1	156,16	249,13	ΔS <sub>298</sub> <sup>0</sup> = -172,86 Дж/(моль·К)
C <sub>p</sub> <sub>298</sub> <sup>0</sup>	75,3	2.48,7	109,87	63,47	ΔC <sub>p</sub> <sub>298</sub> <sup>0</sup> = 12,64 Дж/(моль·К)

Реакция тримолекулярная экзотермическая m = 12, P<sub>бим</sub> = 0,00056.

$$P_{\text{трим}} = 8,314 \cdot 333 \cdot 0,00056 \cdot e^{-172,86/8,314} = 14,225 \cdot 10^{-10} = 1,4225 \cdot 10^{-9}$$

$$\Delta H_{333}^0 = -423970 + 12,64 \cdot (333 - 298) = -423527,6 \text{ Дж/моль}$$

$$\Delta S_{333}^0 = -172,86 + 12,64 \cdot (\ln 333 - \ln 298) = -171,5 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$$

$$E_{\text{экзо}} = \Delta G_{\text{экз}}/333 + 0,983 \cdot 8,314 \cdot 333 = (-423527,6 + 171,5 \cdot 333)/333 + 2721,5 = 1621,1 \text{ Дж}$$

$$k_{\text{трим}} = 5,569 \cdot 10^7 \cdot 8,314 \cdot 333^2 \cdot 1,4245 \cdot 10^{-9} \cdot e^{-1621,1/8,314 \cdot 333} = 40,680 \cdot 10^3 = 4,0680 \cdot 10^4 \text{ л}^2 \text{ (моль}^2 \text{/с)}$$

При пересчете размерностей, в зависимости от молекулярностей реакций используют соотношение:

$$k_{\text{моно}}[\text{с}^{-1}] = k_{\text{бим}}[\text{л/(моль} \cdot \text{с)}] \cdot 10^3 = k_{\text{трим}}[\text{л}^2 \text{/(моль}^2 \cdot \text{с)}] \cdot 10^6.$$

Тогда k<sub>бим</sub> = 4,0680 · 10<sup>4</sup> · 10<sup>3</sup> = 4,0680 · 10<sup>7</sup> л/(моль·с).

Сравним во сколько раз константа скорости реакции (7) больше константы скорости реакции (11):

$$4,7936 \cdot 10^{10} / 4,0680 \cdot 10^7 = 1,2 \cdot 10^3 \text{ раз.}$$

Для реакции (7) перерасчет на мономолекулярную дает значение k<sub>моно</sub> = 4,7936 · 10<sup>13</sup> с<sup>-1</sup>; время превращения реакции (7) составит:

$$\tau_{\text{р(5)}} = 7 \cdot \tau_{0,5\text{р(5)}} = 7 \cdot \ln 2 / k_{\text{моно}} = 7 \cdot \ln 2 / (4,7963 \cdot 10^{13}) = 1,01 \cdot 10^{-13} \text{ с.}$$

Время перехода NO<sub>2</sub>(<sup>2</sup>A'') → NO<sub>2</sub>(<sup>2</sup>A<sub>1</sub>) составляет 1 · 10<sup>-7</sup> с [16], что на 6 порядков больше, чем время реакции (7), значит реакция (7) действительно имеет место в процессе.

**Заключение.** Поскольку реакция (7) бимолекулярная газофазная идет в тысячу раз быстрее, чем реакция (11) тримолекулярная газожидкостная, то облучение реакционной массы в колонне абсорбции для возбуждения молекул NO<sub>2</sub> недопустимо, так как это приведет к реакции диссоциации NO<sub>2</sub> с образованием NO. Если в колонне абсорбции имеются смотровые окна, то их необходимо закрыть светонепроницаемыми дверцами, т.к. процесс возбуждения – взаимодействия молекулы NO<sub>2</sub> с фотоном соответ-

вующей энергии длится мгновенно  $10^{-15}$ – $10^{-17}$  с [17]. Это приведет к исключению подобного нарушения режима работы колонны.

Таким образом, выполненными термодинамическими и кинетическими исследованиями взаимодействия оксида азота (IV) с водой в условиях земной атмосферы и в условиях абсорбционной колонны производства азотной кислоты показано, что реакция молекулы  $\text{NO}_2$  основного состояния с водой является термодинамически сомнительной, однако легко проходит самопроизвольно, если  $\text{NO}_2$  находится в возбужденных состояниях. В возбужденных состояниях  $\text{NO}_2$ , вероятно, находятся в атмосфере Земли, особенно в дневное время, так как для этого необходимо ИК-излучение в видимом диапазоне длин волн 872–430 нм. Из-за диссоциации возбужденных молекул  $\text{NO}_2$  в атмосфере должны постоянно присутствовать и молекулы оксида азота (II). По этой причине осуществление переходов  $\text{NO}_2$  в возбужденные состояния в промышленной абсорбционной колонне по кинетическим соображениям нежелательно.

#### Литература

1. Атрощенко В.И., Алексеев А.М., Засорин А.П. и др. Технология связанного азота. – Киев: Вища школа, 1985. – 327 с.
2. Химическая технология неорганических веществ (Книга 1). / Под ред. Т.Г. Ахметова. – М.: Высшая школа, 2002. – 688 с.
3. P. E. M. Siegbahn. An investigation of  $\text{NO}_3$  as a possible intermediate in the oxidation of nitric oxide // J.Comput.Chem. – 1985. – V.6. – P. 182–188.
4. R. Boehm, L. Lohr. Nitrogen Trioxide Electronic States // J. Phys.Chem.– 1989.– V.93.– P. 3430–3433.
5. Гороновский И.Т. Краткий справочник по химии / И.Т. Гороновский, Ю.П. Назаренко, Е.Ф. Некряч // Киев: Изд.АН УССР, 1962. – 660 с.
6. Тарасова Н.П. Задачи и вопросы по химии окружающей среды / Н.П. Тарасова, В.А. Кузнецов, Ю.В. Сметанников, А.В. Малков, А.А. Додонова.– М.: Мир, 2002.– 368 с.
7. Мороз Н.А. Основные направления улучшения показателей работы агрегатов производства азотной кислоты под давлением 7,3 атм / Н.А. Мороз, М.И. Ворожбян, А.В. Кобзев, Н.Б. Маркова, В.В. Кравченко // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету, 2008. – С. 20–22.
8. Кравченко И.В. Исследование реакционной способности диоксида азота в окислительных процессах. / И.В. Кравченко, В.И. Дышловой, О.И. Захарова, И.И. Захаров // Вісник НТУ «ХП», – Харків: НТУ «ХП», – 2006.– № 11.– С. 75–82.
9. John N. Crowley. OH Formation in the Photoexcitation of  $\text{NO}_2$  beyond the Dissociation Threshold in the Presence of Water Vapor / John N. Crowley and Shaun A.Carl //J.Phys. Chem. A 1997, 101, 4178–4184.
10. Кравченко И.В. Некаталитическое окисление молекулярного азота и закиси азота промежуточными продуктами распада азотной кислоты // Матеріали І Української конференції «Реакції окиснення. Наука і технології». – Рубіжне: ІХТ СНУ ім.В.Даля, 2010. – С. 31–34.
11. Кравченко И.В. Эмпирический расчет предэкспоненциальных множителей в уравнении константы скорости для бимолекулярных реакций. / И.В. Кравченко, А.В. Филончук, В.И. Дышловой // Интегрированные технологии и энергосбережение.– Харьков: «ХПИ»,– 2008.– №1.– С. 103–110.
12. Кравченко И.В. О пропорциональности энергий Гиббса и активации реакций в конкретной температурной области./ И.В. Кравченко, А.В. Филончук, В.И. Дышловой

// м. Северодонецьк: Вісник Східноукраїнського Національного Університету імені Володимира Даля.– 2008.– №12(130).– ч.1.– С. 121–129.

13. Кравченко И.В. Низкотемпературное окисление азота. Обоснование возможности расчетными методами (в 4-х сообщениях). Сообщение 2. Расчет стерического множителя./ И.В. Кравченко, В.И. Дышловой, И.Н. Шаповалова // К.: Хімічна промисловість України, 2005.– №2.– С. 24–29.

14. Кравченко И.В. Низкотемпературное окисление азота. Обоснование возможности расчетными методами (у 4-х повідомленнях). Повідомлення 1. Розрахунок енергії активації./ И.В. Кравченко, В.И. Дышловой, И.Н. Шаповалова // К.: Хімічна промисловість України, 2005.– №1.– С. 23–27.

15. Кравченко И.В. Низкотемпературное окисление азота. Обоснование возможности расчетными методами (в 4-х сообщениях). Сообщение 3. Расчет констант скоростей реакций. / И.В. Кравченко, В.И. Дышловой, И.Н. Шаповалова // К.: Хімічна промисловість України, 2005.– №3.– С. 25–31.

16. Кравченко И.В. Оценка времени жизни возбужденных частиц / И.В. Кравченко, Н.А. Бережная, В.И. Дышловой, М.Ф. Тюпало // Северодонецьк: Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2010.– №6(148),ч.2.– С. 51–56.

17. Байрамов В.М. Основы химической кинетики и катализа. / В.М. Байрамов.– М.: Изд.центр «Академия», 2003. – 256 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Atroshhenko V.I., Alekseev A.M., Zasorin A.P. i dr. Tehnologija svjazannogo azota. – Kiev: Vishha shkola, 1985.– 327 p.

2. Himicheskaja tehnologija neorganicheskikh veshhestv (Kniga 1). Pod red. T.G. Ahmetova. – M.: Vysshaja shkola, 2002. – 688 p.

3. P. E. M. Siegbahn. An investigation of NO<sub>3</sub> as a possible intermediate in the oxidation of nitric oxide J.Comput.Chem. – 1985. – V.6. – P. 182–188.

4. R. Boehm, L. Lohr. Nitrogen Trioxide Electronic States J. Phys.Chem.– 1989.– V.93.– P. 3430–3433.

5. Goronovskij I.T. Kratkij spravocnik po himii I.T. Goronovskij, Ju.P. Nazarenko, E.F. Nekrjach Kiev: Izd.AN USSR, 1962. – 660 p.

6. Tarasova N.P. Zadachi i voprosy po himii okruzhajushhej sredy N.P. Tarasova, V.A. Kuznecov, Ju.V. Smetannikov, A.V. Malkov, A.A. Dodonova.– M.: Mir, 2002.– 368 p.

7. Moroz N.A. Osnovnye napravlenija uluchshenija pokazatelej raboty agregatov proizvodstva azotnoj kisloty pod davleniem 7,3 atm N.A. Moroz, M.I. Vorozhbijan, A.V. Kobzev, N.B. Markova, V.V. Kravchenko Zbirnik naukovih prac' Dniprodzerzhinskogo derzhavnogo tehničnogo universitetu, 2008. – p. 20–22.

8. Kravchenko I.V. Issledovanie reakcionnoj sposobnosti dioksida azota v okislitel'nyh processah. I.V. Kravchenko, V.I. Dyshlovoj, O.I. Zaharova, I.I. Zaharov Visnik NTU «HPI»,– Harkiv: NTU «HPI»,– 2006.– # 11.– p. 75–82.

9. John N. Crowley. OH Formation in the Photoexcitation of NO<sub>2</sub> beyond the Dissociation Threshold in the Presence of Water Vapor John N. Crowley and Shaun A. Carl J.Phys. Chem. A 1997, 101, 4178–4184.

10. Kravchenko I.V. Nekataliticheskoe okislenie molekularnogo azota i zakisi azota promezhutochnymi produktami raspada azotnoj kisloty Materiali I Ukraïns'koï konferencii

«Реакції окиснення. Наука і технології». – Rubizhne: IHT SNU im.V.Dalja, 2010. – p. 31–34.

11. Kravchenko I.V. Jempiricheskiy raschet predjeksponencial'nyh mnozhitelej v uravnenii konstanty skorosti dlja bimolekuljarnyh reakcij. I.V. Kravchenko, A.V. Filonchuk, V.I. Dyshlovoj Integrirovannye tehnologii i jenergosberezhenie.– Har'kov: «HPI».– 2008.– #1.– p. 103–110.

12. Kravchenko I.V. O proporcional'nosti jenergij Gibbsa i aktivacii reakcij v konkretnoj temperaturnoj oblasti. I.V. Kravchenko, A.V. Filonchuk, V.I. Dyshlovoj m. Severodonec'k: Visnik Shidnoukraïns'kogo Nacional'nogo Universitetu imeni Volodimira Dalja.– 2008.– #12(130).– ch.1.– p. 121–129.

13. Kravchenko I.V. Nizkotemperaturnoe okislenie azota. Obosnovanie vozmozhnosti raschetnymi metodami (v 4-h soobshhenijah). Soobshhenie 2. Raschet stericheskogo mnozhitelja. I.V. Kravchenko, V.I. Dyshlovoj, I.N. Shapovalova K.: Himichna promislovist' Ukraïni, 2005.– #2.– p. 24–29.

14. Kravchenko I.V. Niz'kotemperaturne okisnennja azotu. Obgruntuvannja mozhlivosti rozrahunkovimi metodami (u 4-h povidomlennjah). Povidomlennja 1. Rozrahunok energii aktivacii. I.V. Kravchenko, V.I. Dishlovij, I.N. Shapovalova K.: Himichna promislovist' Ukraïni, 2005.– #1.– p. 23–27.

15. Kravchenko I.V. Nizkotemperaturnoe okislenie azota. Obosnovanie vozmozhnosti raschetnymi metodami (v 4-h soobshhenijah). Soobshhenie 3. Raschet konstant skorostej reakcij. I.V. Kravchenko, V.I. Dyshlovoj, I.N. Shapovalova K.: Himichna promislovist' Ukraïni, 2005.– #3.– p. 25–31.

16. Kravchenko I.V. Ocenka vremeni zhizni vobuzhdennyh chastic I.V. Kravchenko, N.A. Berezhnaja, V.I. Dyshlovoj, M.F. Tjupalo Severodonec'k: Visnik Shidnoukraïns'kogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalja, 2010.– #6(148),ch.2.– p. 51–56.

17. Bajramov V.M. Osnovy himicheskoy kinetiki i kataliza. V.M. Bajramov.– M.: Izd.centr «Akademija», 2003. – 256 p.

УДК 153.192

Кравченко І.В.

### **ДО ПИТАННЯ ПРО СПІВІСНУВАННЯ NO<sub>2</sub>, NO ТА O<sub>2</sub>**

Виконані термодинамічні та кінетичні розрахунки реакцій оксиду азоту (IV) з водою. Показано, що реакція легко спливає самовільно, якщо NO<sub>2</sub> знаходиться у збуджених станах. У збуджених станах NO<sub>2</sub>, ймовірно, знаходиться в атмосфері Землі, особливо у денний час, оскільки для цього необхідно ПЧ-опромінювання видимої частини спектра в діапазоні довжин хвиль 872–430 нм. Із-за дисоціації збуджених молекул NO<sub>2</sub> в атмосфері повинні постійно бути присутніми й молекули оксиду азоту (II). З цієї причини здійснення переходів NO<sub>2</sub> у збуджені стани в промисловій абсорбційній колоні за кінетичними міркуваннями небажано.

Kravchenko I.V.

### **ON THE ISSUE OF COEXISTENCE OF NO<sub>2</sub>, NO AND O<sub>2</sub>**

The thermodynamic and kinetic calculations of the reactions of nitric oxide (IV) with water are performed. It is shown that the reaction easily proceeds arbitrarily when  $\text{NO}_2$  is in the excited states. The  $\text{NO}_2$  in the excited states must be in the atmosphere of Earth, especially in the daytime, since this requires the infrared radiation of the visible spectrum in the wavelength range 872–430 nm. Because of excited molecules of  $\text{NO}_2$  dissociation at the atmosphere the molecules of nitric oxide (II) should be also present constantly. For this reason, the implementation of conversion of  $\text{NO}_2$  to the excited states in the industrial absorption column is undesirable from the kinetic considerations.

**МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕТИКИ ДЕГІДРУВАННЯ БІОПОЛІМЕРІВ ДНК  
СТИМУЛЬОВАНОГО ДИСОЦІАТИВНИМ ПРИЄДНАННЯМ ЕЛЕКТРОНІВ  
В ТЕХНОЛОГІЇ МОДИФІКАЦІЇ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРОННИМИ  
ЗБУДЖЕННЯМИ**

**Постановка і актуальність задачі.** Радіаційні технології керованої модифікації властивостей матеріалів є одним з перспективних напрямків розвитку сучасних технологій [1]. Радіаційні технології у матеріалознавстві вже мають багаторічну історію, але розробка нових високоефективних технологій радіаційної модифікації біологічних полімерів та матеріалів електронними збудженнями належить до актуальних напрямків сучасного пошуку в області "високих технологій", і використання опромінення пучками фотонів та низькоенергетичних частинок для керованої модифікації властивостей біоматеріалів розпочато відносно недавно [2].

Потенційними перевагами подібних безреагентних технологій модифікації є екологічна чистота продуктів, а в деяких випадках і можливість отримання матеріалів з поліпшеним або навіть унікальним комплексом властивостей. Ключова наукова проблема полягає в розвитку принципів управління радіаційно-хімічними процесами. У загальному плані мова може йти про управління радіаційною чутливістю молекулярних матеріалів з метою не тільки радіаційної модифікації, але й радіаційної стабілізації матеріалів. Традиційні підходи до регулювання радіаційної чутливості органічних і полімерних матеріалів базуються на інтуїтивних уявленнях про невибірковість ранніх стадій радіаційно-хімічних процесів – так звана концепція "молекулярної палиці" [3]. При цьому як регулятори використовуються акцептори радикалів, лінкери і інші добавки подібного роду, які доводиться вводити в значних концентраціях. Такі способи часто виявляються малоефективними.

Тим часом, існує принципова альтернатива, пов'язана з можливістю управління радіаційно-хімічними процесами як на ранніх, дорадикальних, стадіях на основі уявлень про високу специфічну вибірковість цих стадій (концепція "молекулярного скальпеля" [4]), так і на етапі збудження цільового полімеру. Не дивлячись на те, що поглинання енергії опромінення речовиною не є селективним, первинні хімічні ефекти у багатьох випадках набагато більш виборчі, ніж цього можна було б чекати з формальних енергетичних міркувань. Селективність радіаційно-хімічних процесів виражається у селективному розриві певних хімічних зв'язків в молекулах, локалізації радіаційних змін на структурних і хімічних дефектах макромолекул і неадитивних ефектах при опромінюванні складних систем. Визначення способів керування функціональними властивостями біополімерів та їх асоціатів за допомогою впливу на систему чисельних внутрішньо- та міжмолекулярних взаємодій, що стабілізують функціональну глобулярну нативну конформацію, становить одну з фундаментальних проблем молекулярної біотехнології та біоматеріалознавства. Саме опромінення біоматеріалів фотонами та частками з енергіями, недостатніми для балістичного розриву ковалентних зв'язків в біомакромолекулах, але достатніми для дисоціації цих зв'язків за рахунок збудження антизв'язуючих молекулярних станів, й використовується у клітинних системах світло-, тепло- та магнеточутливості. З іншого боку, саме процеси такого підпорогового збудження та дефектоутворення досить добре досліджені у небіологічних матеріалах [5].

**Аналіз релаксаційних шляхів.** Послідовність процесів в речовині, що розвиваються після поглинання енергії опромінення, умовно прийнято ділити на фізичну, фізико-хімічну і хімічну стадії. Фізична стадія відбувається за час  $10^{-16}$ – $10^{-15}$  с і включає процеси поглинання, перерозподілу і деградації поглиненої енергії. В результаті іонізації і збудження молекул утворюються іони ( $M^+$ ), збуджені іони ( $M^{+*}$ ), електрони ( $e^-$ ), збуджені стани молекул ( $M^*$ ), надзбуджені стани молекул ( $M^{**}$ ) з енергією, що перевищує перший потенціал іонізації молекул, а також плазмони, що є колективним надзбудженим станом ансамблю молекул. Молекулярна система знаходиться в енергетично нерівноважному стані з негомogenous розподілом активних частинок. Вихід первинних заряджених і збуджених частинок складає приблизно 1 частинку на 10 еВ.

На фізико-хімічній стадії за час  $10^{-13}$ – $10^{-10}$  с перебігають реакції заряджених і збуджених частинок, процеси передачі енергії і молекулярна система переходить в стан теплової рівноваги. На хімічній стадії в шпорах, блобах і коротких треках перебігають реакції іонів, що утворилися, електронів, вільних радикалів один з одним і з молекулами середовища. У рідкій фазі за час порядку  $10^{-7}$  с відбувається вирівнювання концентрацій продуктів радіолізу за об'ємом. У твердих матрицях складно розділяти негомogenous процеси, що перебігають в треках, і гомogenous в об'ємі. Тому радіаційно-хімічні виходи дозволяють робити лише загальну оцінку ефективності процесу радіолізу.

Утворення збуджених станів молекул (синглетних і триплетних) може відбуватися при безпосередньому збудженні молекул випромінюванням (первинне збудження) ( $M \rightarrow M^*$ ), при нейтралізації іонів ( $M^+ + e^- \rightarrow M^*$ ), при передачі енергії від збуджених молекул матриці молекулам домішки ( $M^* + A \rightarrow M + A^*$ ). В окремих молекулярних системах можуть виникати складніші збуджені стани: ексимери, ексиплекси, екситони, плазмони. Можлива поява високозбуджених і надвисокозбуджених станів (з енергією 10-50 еВ). На процеси іонізації витрачається більше половини поглиненої енергії випромінювань. В процесі іонізації ( $M \rightarrow M^+ + e^-$ ) утворюються позитивні іони і електрони. Іон ( $M^+$ ) зазвичай називають материнським позитивним іоном. Первинні іони часто розпадаються на фрагменти. Електрони, що утворюються при іонізації, витрачають свою енергію в процесах іонізації, збудження і термалізуються. У конденсованому середовищі внаслідок великої частоти зіткнень з молекулами електрон не завжди встигає вийти зі сфери дії кулонівського поля іону ( $M^+$ ) і може утворити зв'язану пару. Пари іонів, що стали незалежними один від одного, називаються вільними. У рідинах, мало-реакційноздатних щодо електронів, наприклад у воді, вуглеводнях, електрони після уповільнення захоплюються речовиною середовища, і утворюються сольватовані електрони ( $e_s^-$ ), які у водних розчинах зветься гідратованими електронами ( $e_{aq}^-$ ). У твердих органічних тілах ці електрони є локалізованими електронами. Сольватовані електрони швидко взаємодіють з багатьма молекулами, причому їх реакційна здатність залежить від природи розчинників.

При радіолізі майже будь-якої молекулярної системи як проміжні продукти виникають вільні радикали, які мають неспарений електрон (R). Вільні радикали, що мають негативний заряд, називаються аніон-радикалами ( $R^-$ ), а що мають позитивний заряд – катіон-радикалами ( $R^+$ ). Попередниками вільних радикалів є збуджені молекули, іони, електрони, реакції між якими призводять до їх утворення. Головні з цих реакцій – це розпад збудженої молекули на вільні радикали ( $M \rightarrow M^* \rightarrow R_1 + R_2$ ), дисоціативне приєднання електрона до нейтральної молекули ( $RX + e^- \rightarrow R + X^-$ ), іон-молекулярні реакції за участю позитивного іона і нейтральної молекули ( $RH^+ + R_1H \rightarrow RH_2^+ + R_1$ ), дисоціація позитивного іона з утворенням вільного радикала і іона.

Біополімери ДНК – носії генетичної інформації – функціонують у водному середовищі клітини, тому найбільш впливовими іонами і радикалами, щодо модифікації структури ДНК, вважаються продукти радіолізу води. Первинними продуктами радіолізу води в субпікосекундному інтервалі часу є радикали ( $\text{OH}^\bullet$ ), іони ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) та гідратовані електрони ( $e_{\text{aq}}^-$ ). В пікосекундному і наносекундному діапазонах часу перебігають бімолекулярні реакції радикалів і іонів в шпорах і блобах: ( $\text{H}_3\text{O}^+ + e_{\text{aq}}^- \rightarrow \text{H}^\bullet + \text{H}_2\text{O}$ ), ( $\text{OH}^\bullet + \text{OH}^\bullet \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$ ), ( $\text{OH}^\bullet + e_{\text{aq}}^- \rightarrow \text{OH}^-$ ), ( $\text{OH}^\bullet + \text{H}^\bullet \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ ), ( $e_{\text{aq}}^- + e_{\text{aq}}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ ), ( $\text{H}^\bullet + \text{H}^\bullet \rightarrow \text{H}_2$ ), ( $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ ) та ін. [6]

Внаслідок високої концентрації молекул у воді з процесами дисоціації іонів успішно конкурують іон-молекулярні реакції, тобто взаємодія позитивних іонів з нейтральними молекулами, наприклад, ( $\text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}$ ). У конденсованому середовищі утворенню радикалів можуть перешкоджати навколишні молекули середовища, які заважають відходу радикалів з місця їх народження. Це так званий ефект клітки (cage-effect), особливо істотний в твердій фазі. Для виходу радикала (особливо значних розмірів) з клітки необхідно, щоб поблизу пари радикалів знаходився мікроскопічний вільний об'єм. Докази істотного впливу вільного об'єму, обумовленого тепловими флуктуаціями і дефектами структури матриці, були отримані, зокрема, при вивченні радіаційно-хімічних процесів в полімерах в умовах дії високого тиску [7].

Біологічна дія опромінення зумовлена головним чином вторинними частинками, що генеруються вздовж треків. Оскільки ці частинки далі реагують в межах опромінених клітин, вони можуть викликати мутагенні, генотоксичні і інший потенційно небезпечні пошкодження ДНК, такі як, наприклад, модифікація азотистих основ та пентоз, дисоціацію азотистих основ, розрив одностандового полінуклеотидного ланцюга (single strand break, SSB), комплексні, або кластерні, пошкодження, які включають комбінацію двох поодиноких модифікацій, наприклад, розрив дволанцюгової ДНК (double strand break, DSB) одночасно з утворенням крос-лінків [8]. Найбільш чисельними серед вторинних частинок є вторинні електрони [9]. Наприклад, 1 МеВ первинний  $\gamma$ -квант або електрон при попаданні до біологічної речовини породжує близько  $3 \cdot 10^4$  вторинних електронів низької енергії ( $E < 30$  еВ). Після створення такі низькоенергетичні електрони генерують велику кількість надзвичайно реактивних радикалів, катіонів і аніонів. Ці продукти у свою чергу утворюють нові реакційні сполуки, що й ушкоджують біомолекули в опромінених клітинах. Якщо треки первинних часток пролягають поблизу клітинної ДНК, такі сполуки можуть утворюватися безпосередньо з молекул ДНК, молекул води і інших суміжних біомолекул, таких як, наприклад, протеїни гістонів. Таким чином, вторинні низькоенергетичні електрони або пошкоджують ДНК безпосередньо, або роблять це за допомогою утворених ними реакційних сполук [10]. І тому актуальною проблемою є визначення механізмів дії низькоенергетичних електронів на ДНК, де вони здатні індукувати генотоксичні пошкодження.

**Дисоціативне приєднання електронів.** Як було експериментально встановлено нещодавно основним каналом ініціювання процесу пошкодження ДНК електронами з енергіями у діапазоні 3–20 еВ є дисоціативне приєднання електрону до азотистих основ нуклеотидів (аденін (А), гуанін (G), тимін (Т) та цитозин (С)), внаслідок якого утворюється метастабільний молекулярний аніон, розпад якого призводить до розриву міжатомного зв'язку [11]. Найбільш вірогідними місцями пошкодження при цьому є  $\text{C}3'-\text{O}3'$  і  $\text{C}5'-\text{O}5'$   $\sigma$ -зв'язки та  $\text{C}1'-\text{N}$  глікозидний зв'язок [12] (рис. 1(а)). Взаємодія електрона з атомом або молекулою може бути описане в термінах сил, що породжені потенціалом взаємодії. При низьких енергіях (0–20 еВ) існує три види сил, які діють між електроном і молекулою: (1) електростатична сила; (2) обмінна сила внаслідок антисиметричності

хвильової функції взаємодії електрона з молекулою; і (3) поляризаційне індуковане притяжіння, внаслідок деформації молекулярних орбіталей електричним полем електрону. При певних енергіях інтерференція цих сил може продукувати ефективний потенціал, який в змозі захопити електрон. Таке резонансне явище і викликає утворення метастабільного аніону [13].

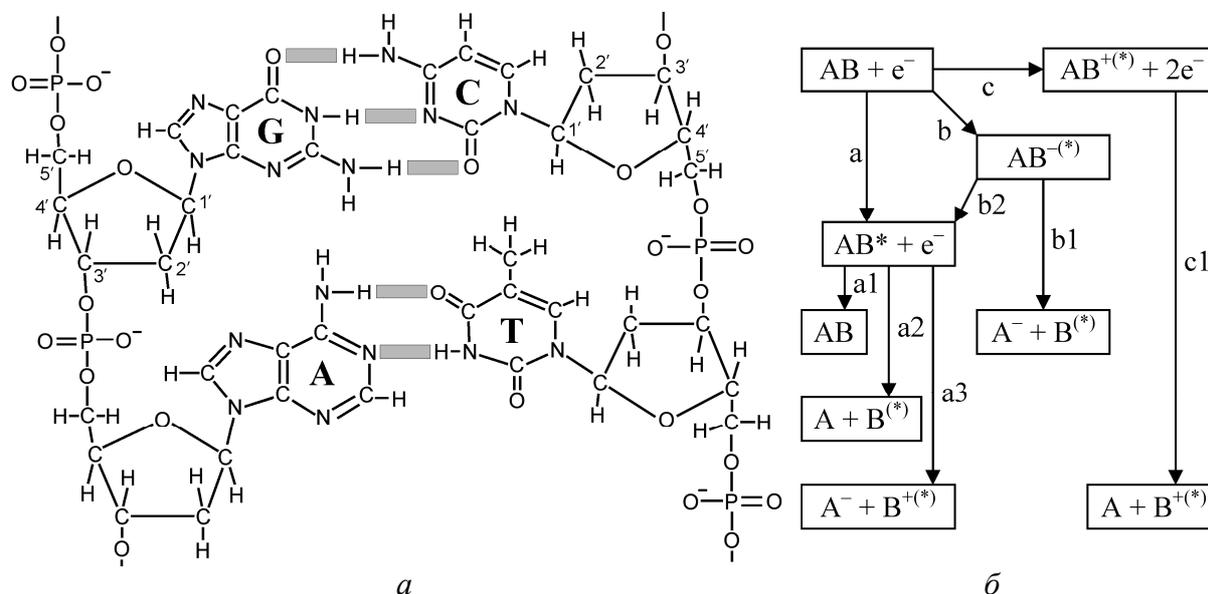


Рисунок 1 – Збудження молекули ДНК: *a* – структура хімічних зв'язків; *б* – шляхи фрагментації

Таким чином, електронно-молекулярна взаємодія в діапазоні енергій 1–20 еВ може бути описана в термінах резонансного та нерезонансного розсіювання. Останнє відбувається при всіх енергіях вище певного порогу, оскільки потенційна взаємодія завжди присутня, і обумовлює безструктурний фон. Резонансне розсіювання, навпаки, здійснюється тільки коли вторинний електрон займає порожню вже існуючу орбіталь, яка має фіксовану енергію, що й відповідає утворенню метастабільного аніону. В умовах резонансу ефективність формування метастабільних аніонів значно збільшується. Тому загальний вихід фрагментів ДНК і нейтральних та іонізованих частинок складається з системи смуг резонансного розсіювання та монотонно зростаючого з енергією електронів фону від нерезонансного розсіювання електронів на молекулах ДНК.

Розділяють два головні види електронних резонансів або метастабільних аніонів [13]. Якщо додатковий електрон займає попередньо незаповнену орбіталь молекули в основному стані, то такий стан метастабільного аніону зветься шейп-резонансом (shape-resonance) або одностинковим резонансом. Термін "шейп" вказує на те, що захват електрону відбувається внаслідок специфічної форми електронно-молекулярного потенціалу. А от у випадку, коли в метастабільному аніоні внаслідок захоплення електрону утворюється стан у якому два електрони займають попередньо вільні орбіталі, то такий перехідний стан зветься "коровим" резонансом (core-excited resonance), або двочастинковим-однорічковим резонансом. Взагалі кажучи, такі резонанси можуть лежати як нижче, так і вище за енергією відповідно до початкового нейтрального стану. Якщо енергія знижується, тобто електрон захоплюється головним чином за рахунок електронної спорідненості електронно-збудженого стану молекули, то такий резонанс є резонансом фешбахівського типу. У випадку перебільшення енергії резонансного стану над енергією основного стану захопленню допомагає бар'єр кутового моменту від не-

нульового компоненту моменту електрону, і в цьому випадку резонанс називають "коровий-шейп-резонанс" (core-excited shape resonance).

На рис. 1(б) зображена схема шляхів фрагментації при збудженні електронами низьких енергій простого молекулярного конденсованого середовища, що складається з двоатомних молекул АВ [14]. Пряма електронна взаємодія, може продукувати збуджений нейтральний стан молекули (АВ\*) по шляху (а). Далі (АВ\*) може поволі втрачати свою додаткову енергію через емісію фотонів і/або в процесах переміщення енергії до навколишнього середовища (наприклад, по шляху (а1)). Якщо конфігурація електронного збудженого стану є дисоціативною, то (АВ\*), може швидко фрагментувати на два атоми (або нейтральні радикали у разі більш складнішої молекули), що зображено на рис. 1(б) шляхом (а2). Вище за певний енергетичний поріг (~14–16 eВ), фрагментація може відбуватися через діпольярну дисоціацію, шлях (а3), породжуючи аніон і катіон. У випадку резонансного розсіювання, шлях (b), створений метастабільний аніон (АВ<sup>-\*</sup>) може аутоіонізуватися шляхом (b2) або, для достатньо довговічного аніону в дисоціативному стані, може по шляху (b1) фрагментувати на стабільний аніон (А<sup>-</sup>) та нейтральний атом або радикал (В<sup>(\*)</sup>). Саме цей останній механізм відомий під назвою дисоціативне приєднання електрону (dissociative electron attachment, DEA). Якщо енергія (АВ<sup>-\*</sup>) стану є вищою за енергію первинного стану (АВ), то молекула після приєднання електрону може перейти до електронно збудженого стану (АВ\*) по шляху (b2). Після цього вона може релаксувати по одному з шляхів (а1), (а2), або (а3). Нарешті, електрон може безпосередньо іонізувати молекулу по шляху (с), і якщо катіон утворюється в дисоціативному стані, то він може фрагментувати по шляху (с1). Цей останній канал дисоціації зазвичай не є резонансним.

**Результати та обговорення.** Найбільш інтенсивним продуктом фрагментації зразків ДНК, стимульованого дисоціативним приєднанням електрону, є гідрид-іони (H<sup>-</sup>). Саме індукований перенос протонів між азотистими основами є фізичною основою їх таутомеризації у комплементарних парах за механізмом Льовдіна [15], або за рахунок перенесення протона в парі за участі мутагенних таутомерів [16]. В усіх випадках характерна енергія активації переносу протона по порядку величини дорівнює 1 eВ, що стимулює проведення досліджень з низькоенергетичними електронами. Характерний вигляд спектрів виходу (H<sup>-</sup>) для зразків ДНК, плівки тиміну, аморфного льоду, та аналогу дезоксирибози  $\alpha$ -тетрагідрофурилового спирту (ТНФ) представлені на рис. 2(а) [17–20]. Експериментальна кінетична крива дегідрування зразка ДНК від часу опромінення струмом електронів  $I = 1,5$  нА представлена на рис. 2(б) точками. Спектри виходу всіх азотистих основ подібні до спектру тиміну (рис. 2(а)-2). Спектри ТНФ та інших аналогів пентоз з остовів полінуклеотидних ланцюгів ДНК практично співпадають з кривою 4 на рис. 2(б). З порівняння кривих 1–4 виходить, що головний резонансний пік виходу H<sup>-</sup> при 9 eВ формується переважно дегідруванням азотистих основ, оскільки вихід гідрид-іонів зі зразків води з максимумом при 7 eВ на співпадає з резонансом для ДНК і має низьку інтенсивність, а вихід з пентоз також є занадто малим і може вносити лише неістотний вклад в загальну інтенсивність резонансної смуги дегідрування ДНК, стимульованого дисоціативним приєднанням електрону.

Порівняння кривих 1 і 2 демонструє те, що саме азотисті основи є основним джерелом гідрид-іонів щонайменш втричі більш потужним, ніж пентодні кільця (крива 4). Таким чином, порівняння форми та інтенсивності резонансних смуг свідчить про те, що десорбція гідрид-іонів з молекули ДНК в діапазоні енергій збуджуючих електронів нижче 15 eВ здійснюється головним чином внаслідок дисоціативного приєднання електронів до азотистих основ з імовірним незначним внеском від дезоксирибозних кілець.

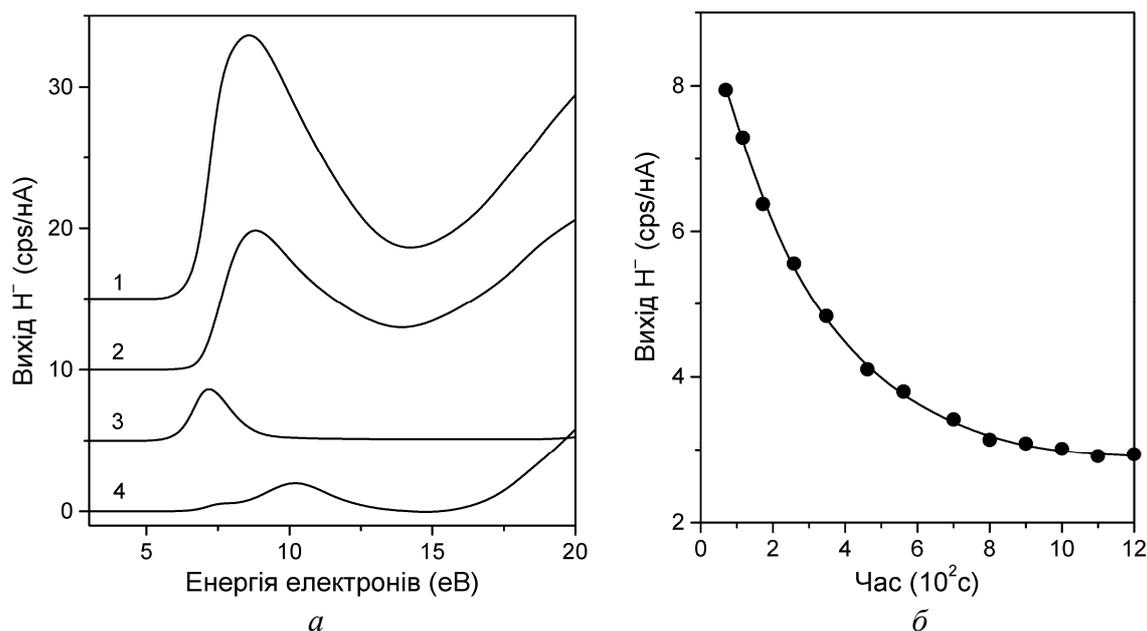


Рисунок 2 – Вихід  $H^-$ : а – спектри виходу від зразків: 1 – ДНК; 2 – тимін; 3 – вода; 4 – ТНФ; б – кінетична крива дегідровання ДНК

Процес дегідровання азотистих основ ДНК будемо розглядати як комбінацію трьох різних процесів [21]:

- 1) процес захоплення електрону азотистою основою і формування метастабільного іону ( $A + e^- \rightarrow A^{(*)}$ ) з константою швидкості ( $k_{EA}$ );
- 2) процес втрати електрону метастабільним іоном і повернення азотистої основи у вихідний стан ( $A^{(*)} \rightarrow A + e^-$ ) з константою швидкості ( $k_{ER}$ );
- 3) процес дисоціативного розпаду метастабільного іону з продукуванням гідрид-іону ( $A^{(*)} \rightarrow A\# + H^-$ ) з константою швидкості ( $k_{DR}$ ).

Передбачається, що низька інтенсивність стаціонарного опромінення створює низьку постійну концентрацію електронів  $n_E$ , що є набагато меншою концентрації азотистих основ,  $n_A \gg n_E$ , і на початку опромінення  $n_A$  може вважатися постійною. Тоді з кінетичного рівняння

$$\frac{dn_A}{dt} = k_{ER}n_{A^{(*)}} - k_{EA}n_A n_E \quad (1)$$

можна визначити константу  $C_1 = k_{ER}/k_{EA} = n_A n_E (n_{A^{(*)}})^{-1}$ , і, з огляду на те, що азотисті основи можуть бути або немодифікованими, або дегідрованими,  $n_A^0 = n_A + n_{A\#}$ , отримати  $dn_{A\#}/dt = C_2$ , де  $C_2 = k_{DR}n_A^0 n_E (C_1 + n_E)$  є постійною величиною. Таким чином, на початковому етапі опромінення, коли концентрація дегідрованих основ мала, їх концентрація зростає лінійно з часом,  $n_{A\#} = C_2 t$ , з синхронним зменшенням концентрації немодифікованих основ  $n_A = n_A^0 - n_{A\#}$ . При  $t \rightarrow \infty$  здійснюється насичення дозових кривих і залежність інтенсивності дегідровання від часу в умовах стаціонарного опромінення може бути представлена у вигляді

$$Y(t) = Y(0) - K \cdot t \cdot (L + t)^{-1}, \quad (2)$$

де  $Y(0)$  – початкова величина виходу дегідрованих основ;  $K$  – значення  $(Y(0) - Y(t))$  при  $t \rightarrow \infty$ ;  $L = (k_{ER} + k_{DR})/(k_{EA}C_2)$  – характеристичний параметр системи. На рис. 2(б) ліні-

єю представлена апроксимація експериментальних даних за формулою (2). Для даного експерименту ця апроксимація дає значення характеристичного параметру  $L = 200$  с,  $K = 880$  cps/nA, що демонструє достатньо високий перетин захоплення електронів та утворення метастабільного аніонного стану азотистих основ, з формування яких починається електронно-стимульований процес дисоціації гідрид-іонів з біополімерів ДНК.

**Висновки.** Застосування кінетичного аналізу процесу дегідрування біополімерів ДНК стимульованої дисоціативним приєднанням електронів дозволило визначити значення параметрів кінетики процесу та відносну стабільність метастабільних аніонів азотистих основ у складі ДНК. Такий підхід дозволяє проводити якісний і кількісний аналіз і сертифікацію зразків біополімерів ДНК та, в перспективі, керувати структурою та впливати на функції молекул ДНК за допомогою селективного опромінення біоматеріалу електронами з енергією 9 еВ. Запропонований метод може бути використаний також для кінетичного аналізу більш складних процесів, наприклад, процесу розриву поліуклеотидного ланцюга ДНК, стимульованого дисоціативним приєднанням електронів з наднизькими енергіями [22]. Результати цього аналізу та їх порівняння з результатами дегідрування азотистих основ, які будуть наведені в наступних публікаціях є частиною створення фізико-хімічних та біофізичних основ технології модифікування біоматеріалів опроміненням.

#### Література

1. Itoh N. *Materials Modification by Electronic Excitation* / N. Itoh, M. Stoneham. – Cambridge : University Press, 2000. – 536 p.
2. *Biomaterials Fabrication and Processing Handbook* / Ed. by P.K. Chu, X. Liu. – Boca Raton : CRC Press, 2008. – 701 p.
3. Фельдман В.И. Молекулярные механизмы селективных эффектов в радиационной химии органических и полимерных систем / В.И. Фельдман // Вестн. МГУ. – 2001. – Т.42, №3. – С. 194–205.
4. *Control of Chemical Reactions by Core Excitations* / K. Tanaka, E.O. Sako, E. Ikegaya [та ін.] // *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* – 2001. – V. 119, № 2. – P. 255–266.
5. Огурцов А.Н. Модификация кристаллов электронными возбуждениями: монография / А.Н. Огурцов. – Х. : НТУ "ХПИ", 2009. – 368 с.
6. von Sonntag C. *Free-Radical-Induced DNA Damage and Its Repair. A Chemical Perspective* / C. von Sonntag. – Berlin : Springer, 2006. – 523 p.
7. Drobny J.D. *Radiation Technology for Polymers.* – London : CRC , 2003. – 224 p.
8. Шарпатый В.А. Радиационная химия биополимеров / В.А. Шарпатый. – М. : Геос, 2008. – 250 с.
9. Michael B.D *A Sting in the Tail of Electron Tracks* / B.D. Michael, P.O'Neill // *Science.* – 2000. – V.287. – P.1603–1604.
10. *Radiation Induced Molecular Phenomena in Nucleic Acids* / Ed. by M.K. Shukla, J. Leszczynski. – Dordrecht : Springer, 2008. – 677 p.
11. *Resonant Formation of DNA Strand Breaks by Low-Energy (3 to 20 eV) Electrons* / B. Boudaïffa, P. Clotier, D. Hunting [та ін.] // *Science.* – 2000. – V. 287. – P. 1658–1660.
12. Gu J. *Electron Attachment-Induced DNA Single-Strand Breaks at the Pyrimidine Sites* / J. Gu, J. Wang, J. Leszczynski // *Nucl. Ac. Res.* – 2010. – V.38, №16. – P. 5280-5290.
13. Schulz G.J. *Resonances in Electron Impact on Diatomic Molecules* / G.J. Schulz // *Rev. Mod. Phys.* – 1973. – V.45, №3. – P. 423–486.
14. *Mechanisms for Low-Energy (0.5–30 eV) Electron-Induced Pyrimidine Ring Fragmentation within Thymidine- and Halogen-Substituted Single Strands of DNA* / P.C. Dugal,

- H. Abdoul-Carime, L. Sanche [та ін.] // *J. Phys. Chem. B.* – 2000. – V.104. – P. 5610–5617.
15. Löwdin P.-O. Proton Tunneling in DNA and its Biological Implications / P.-O. Löwdin // *Rev. Mod. Phys.* – 1963. – V.35, №3. – P. 724–732.
16. Броварець О.О. Новий фізико-хімічний механізм перетворення вотсон-криківської пари основ ДНК Ade·Thy в пари за участі мутагенних таутомерів / О.О. Броварець, Д.М. Говорун // *Ukr. Bioorg. Acta.* – 2010. – №1. – С. 3–10.
17. Pan X. Dissociative Electron Attachment to DNA / X. Pan, P. Cloutier, D. Hunting, L. Sanche // *Phys. Rev. Lett.* – 2003. – V.90, №20. – P. 208102–5.
18. Abdoul-Carime H. Low-Energy (5-40 eV) Electron-Stimulated Desorption of Anions from Physisorbed DNA Bases // H. Abdoul-Carime, O. Cloutier, L. Sanche // *Radiat. Res.* – 2001. – V.155, №4. – P. 625–633.
19. D<sup>-</sup>, O<sup>-</sup> and OD<sup>-</sup> desorption induced by low-energy (0–20) electron impact on amorphous D<sub>2</sub>O films / X. Pan, H. Abdoul-Carime, P. Cloutier, A.D. Bass [та ін.] // *Radiat. Phys. Chem.* – 2004. – V. 72, №2-3. – P. 193–199.
20. Low-Energy Electron Damage to Condensed-Phase Deoxyribose Analogues Investigated by Electron Stimulated Desorption of H- and Electron Energy Loss Spectroscopy / D. Antic, L. Parenteau, M. Lepage [та ін.] // *J. Phys. Chem. B.* – V.103, №31. – P. 6611–6619.
21. Экспериментальные методы химии высоких энергий / Под. ред. М.Я. Мельникова. – М. : Изд-во МГУ, 2009. – 824 с.
22. DNA Strand Breaks Induced by 0-4 eV Electrons: The Role of Shape Resonances / F. Martin, P.D. Burrow, Z. Cai [та ін.] // *Phys. Rev. Lett.* – 2004. – V.93, №6. – P. 68101–4.

Bibliography (transliterated)

1. Itoh N. Materials Modification by Electronic Excitation N. Itoh, M. Stoneham. – Cambridge : University Press, 2000. – 536 p.
2. Biomaterials Fabrication and Processing Handbook Ed. by P.K. Chu, X. Liu. – Boca Raton : CRC Press, 2008. – 701 p.
3. Fel'dman V.I. Molekuljarnye mehanizmy selektivnyh jeffektov v radiacion-noj himii organicheskih i polimernyh sistem V.I. Fel'dman Vestn. MGU. – 2001. – T.42, #3. – p. 194–205.
4. Control of Chemical Reactions by Core Excitations K. Tanaka, E.O. Sako, E. Ikegami [та ін.] *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* – 2001. – V. 119, # 2. – P. 255–266.
5. Ogurcov A.N. Modifikacija kriokristallov jelektronnymi vobuzhdenijami: monografija A.N. Ogurcov. – H. : NTU "HPI", 2009. – 368 p.
6. von Sonntag C. Free-Radical-Induced DNA Damage and Its Repair. A Chemical Perspective C. von Sonntag. – Berlin : Springer, 2006. – 523 p.
7. Drobny J.D. Radiation Technology for Polymers. – London : CRC , 2003. – 224 p.
8. Sharpatyj V.A. Radiacionnaja himija biopolimerov V.A. Sharpatyj. – M. : Geos, 2008. – 250 p.
9. Michael B.D A Sting in the Tail of Electron Tracks B.D. Michael, P.O'Neill *Science.* – 2000. – V.287. – P.1603–1604.
10. Radiation Induced Molecular Phenomena in Nucleic Acids Ed. by M.K. Shukla, J. Leszczynski. – Dordrecht : Springer, 2008. – 677 p.
11. Resonant Formation of DNA Strand Breaks by Low-Energy (3 to 20 eV) Electrons B. Boudaïffa, P. Clotier, D. Hunting [та ін.] *Science.* – 2000. – V. 287. – P. 1658–1660.
12. Gu J. Electron Attachment-Induced DNA Single-Strand Breaks at the Pyrimidine Sites J. Gu, J. Wang, J. Leszczynski *Nucl. Ac. Res.* – 2010. – V.38, #16. – P. 5280-5290.

13. Schulz G.J. Resonances in Electron Impact on Diatomic Molecules G.J. Schulz Rev. Mod. Phys. – 1973. – V.45, #3. – P. 423–486.

14. Mechanisms for Low-Energy (0.5–30 eV) Electron-Induced Pyrimidine Ring Fragmentation within Thymidine- and Halogen-Substituted Single Strands of DNA P.C. Dugal, H. Abdoul-Carime, L. Sanche [ta in.] J. Phys. Chem. B. – 2000. – V.104. – P. 5610–5617.

15. Löwdin P.-O. Proton Tunneling in DNA and its Biological Implications P.-O. Löwdin Rev. Mod. Phys. – 1963. – V.35, #3. – P. 724–732.

16. Brovarec' O.O. Novij fiziko-himichnij mehanizm peretvorennja votson-krikiv-s'koï pari osnov DNK Ade□Thy v pari za uchasti mutagennih tautomeriv O.O. Brova-rec', D.M. Govorun Ukr. Bioorg. Acta. – 2010. – #1. – p. 3–10.

17. Pan X. Dissociative Electron Attachment to DNA X. Pan, P. Cloutier, D. Hunting, L. Sanche Phys. Rev. Lett. – 2003. – V.90, #20. – P. 208102–5.

18. Abdoul-Carime H. Low-Energy (5-40 eV) Electron-Stimulated Desorption of Anions from Physisorbed DNA Bases H. Abdoul-Carime, O. Cloutier, L. Sanche Radiat. Res. – 2001. – V.155, #4. – P. 625–633.

19. D–, O– and OD– desorption induced by low-energy (0–20) electron impact on amorphous D2O films X. Pan, H. Abdoul-Carime, P. Cloutier, A.D. Bass [ta in.] Radiat. Phys. Chem. – 2004. – V. 72, #2-3. – P. 193–199.

20. Low-Energy Electron Damage to Condensed-Phase Deoxyribose Analogues Investigated by Electron Stimulated Desorption of H- and Electron Energy Loss Spectroscopy D. Antic, L. Parenteau, M. Lepage [ta in.] J. Phys. Chem. B. – V.103, #31. – P. 6611–6619.

21. Jeksperimental'nye metody himii vysokih jenergij Pod. red. M.Ja. Mel'ni-kova. – M. : Izd-vo MGU, 2009. – 824 p.

22. DNA Strand Breaks Induced by 0-4 eV Electrons: The Role of Shape Resonances F. Martin, P.D. Burrow, Z. Cai [ta in.] Phys. Rev. Lett. – 2004. – V.93, #6. – P. 68101–4.

УДК 544.542.2; 577.34; 661.7

Огурцов А.Н., Масалитина Н.Ю., Близнюк О.Н.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ДЕГИДРИРОВАНИЯ БИОПОЛИМЕРОВ ДНК  
СТИМУЛИРОВАННОГО ДИССОЦИАТИВНЫМ ПРИСОЕДИНЕНИЕМ  
ЭЛЕКТРОНОВ В ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИКАЦИИ МАТЕРИАЛОВ  
ЭЛЕКТРОННЫМИ ВОЗБУЖДЕНИЯМИ**

Исследован процесс дегидрирования биополимеров ДНК индуцированный диссоциативным присоединением электронов к азотистым основаниям нуклеотидов как одного из каналов управления структурой ДНК в радиационной технологии модификации материалов электронными возбуждениями. Предложена кинетическая модель процесса и определены кинетические параметры дегидрирования ДНК пучком низкоэнергетичных электронов.

Ogurtsov A.N., Masalitina N.Yu., Bliznjuk O.N.

**SIMULATION OF DNA BIOPOLYMERS DEHYDRIDIZATION KINETICS  
INDUCED BY DISSOCIATIVE ELECTRON ATTACHMENT IN TECHNOLOGY OF  
MATERIALS MODIFICATION BY ELECTRONIC EXCITATIONS**

The process of DNA biopolymers dehydrization induced by dissociative electron attachment to nucleic bases of nucleotides as one of the channels of DNA structure engineering

in radiation technology of materials modification by electronic excitations was studied. The kinetic model of the process was proposed and the kinetic parameters of DNA dehydridization by low-energy electron beam were determined.

### ДЕФЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА И СТАРЕНИЕ КАК ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ВОЗМОЖНОГО НЕНОРМАЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ БОЕПРИПАСОВ

Наличие значительного времени хранения артиллерийских боеприпасов в условиях арсеналов и баз является особенностью их технической эксплуатации. После этапа хранения боеприпасы к ствольным артиллерийским системам должны быть безопасными при ведении стрельбы и эффективными при действии по цели. Совокупность этих свойств является необходимым условием допуска боеприпаса к стрельбе.

Накопленные эмпирические знания о поведении артиллерийских боеприпасов говорят о том, что при стрельбе возможны нештатные ситуации, связанные с аномалиями в их поведении при выстреле. В терминологическом плане эти происшествия получили обобщенное название – ненормальное действие боеприпаса (НДБ). Под НДБ понимается особое (анормальное) протекание одного или нескольких этапов физического явления артиллерийского выстрела. Результатом НДБ являются: нерешение поставленной огневой задачи, нанесение ущерба собственной материальной части или личному составу. НДБ как понятие присутствует в организационных документах [1], в технической документации [2], в научной [3] и учебно-методической литературе [4]. По имеющимся оценкам наступление случаев НДБ оценивается как 1 к 10000 выстрелам, что лежит на границе низкого и умеренного техногенного риска [48]. Однако проявление НДБ сопровождается чрезвычайными происшествиями, связанными со значительным ущербом материальной части и людскими потерями. Подтверждениями этого являются фотографии выведенных из строя артиллерийских установок по причине разрывов орудийных стволов, вызванных НДБ. Рис. 1 иллюстрирует разрывы стволов корабельных 127-мм орудий эсминцев Somers (DDG-34, ВМС США, разрыв ствола вблизи дульного среза, фрагмент а) и Brisbane D 41, ВМС Австралии, разрыв ствола вблизи казенной части, фрагмент б).

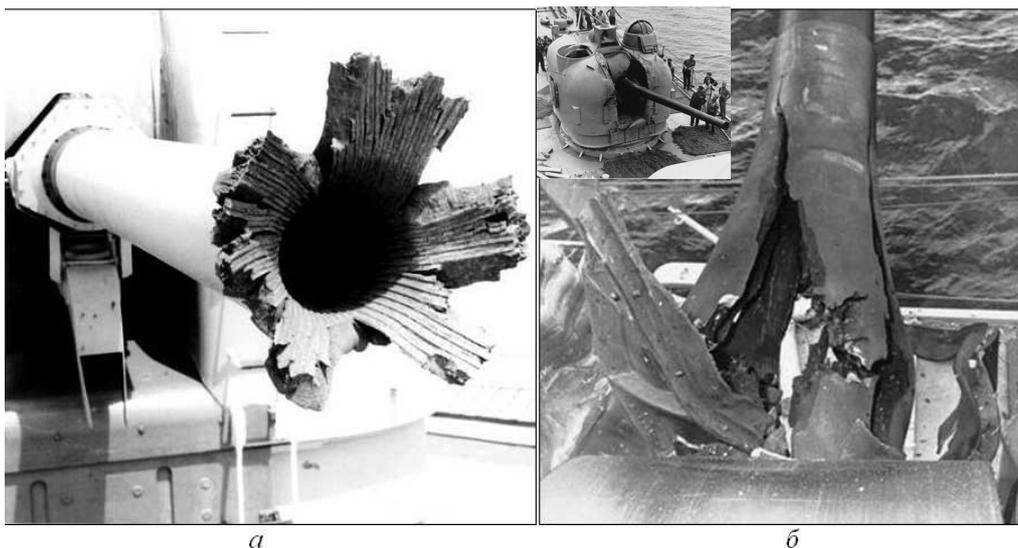


Рисунок 1 – Фотографии разрывов артиллерийских стволов корабельных орудий:  
а – 127-мм пушка эсминца Somers (DDG-34) 1965 г.;  
б – 127-мм пушка эсминца Brisbane (D 41) 1969 г. (вид ствола сверху)

На рис. 2 показаны разрывы танковых гладкоствольных пушек танков Abrams (разрыв ствола вблизи дульного среза, фрагмент а) и танка Меркава – разрыв ствола вблизи казенной части, фрагмент б). На рис. 3 представлены последствия разрыва 105-мм снаряда в авиационной пушке. Фотографии рис. 1–3 заимствованы из сети Интернет.

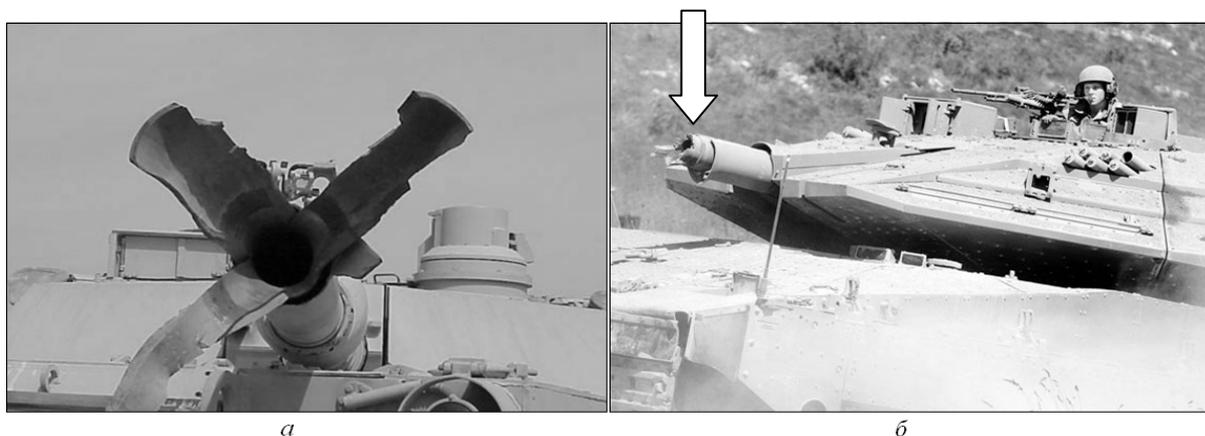
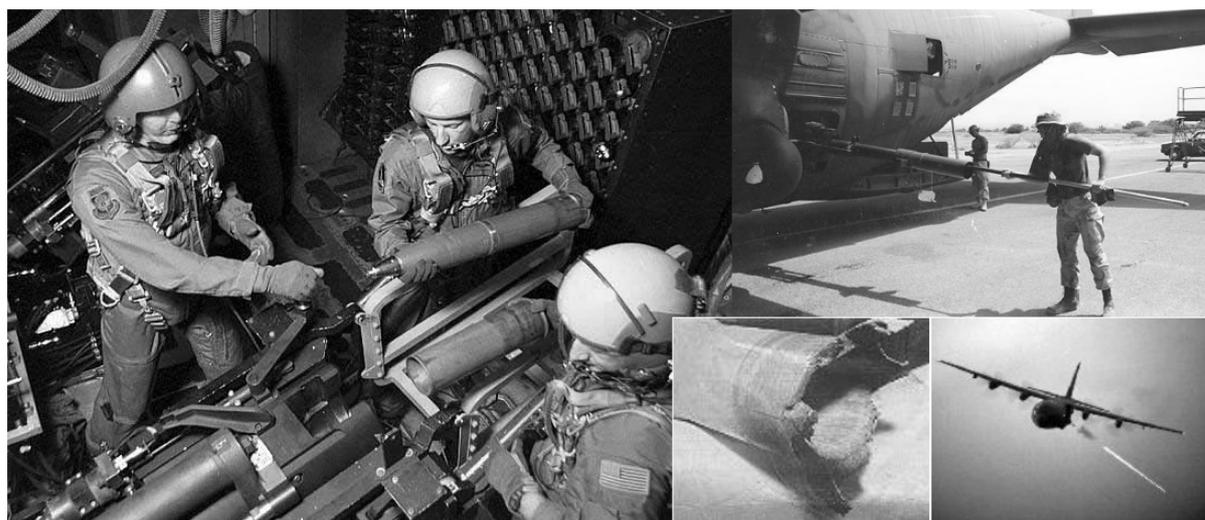


Рисунок 2 – Фотографии разрывов артиллерийских танковых стволов:  
 а – 120-мм пушка М-256 танка Abrams (M1A1);  
 б – 120-мм пушка МG-253 танка Миркава (Mk. 4)



Преждевременный разрыв 105-мм снаряда на борту AC-130H в 1994 г.

Рисунок 3 – Преждевременный разрыв 105-мм снаряда самолета AC 130H (Сомали, 1994 г.). Чрезвычайный инцидент привел к разрыву ствола авиационной 105-мм пушки (см. стрелку), последующему пожару, крушению самолета и гибели группы сил специальных операций. На фотографиях показаны процессы заряжания, обслуживания (чистки) и выстрела авиационной 105-мм пушки самолета сил специальных операций на базе Lockheed C-130 Hercules

Последний зафиксированный информационными агентствами случай НДБ произошел в марте 2011 г. в форте Bragg (США), где от преждевременного взрыва 155-мм снаряда в стволе гаубицы M777A2 пострадало 10 военнослужащих.

Основными причинами ненормального действия кондиционных боеприпасов [5,6], находящихся в пределах гарантийного срока эксплуатации являются:

- недостатки конструкции;
- дефекты производства (например, нарушение технологии снаряжения);
- состояние ствола артиллерийской установки;
- отступления от правил служебного обращения и правил стрельбы.

В настоящее время Украина не производит боеприпасов для ствольных систем вообще, и корабельной артиллерии в частности. Наличие значительных запасов боеприпасов, существенная часть которых имеет длительные сроки хранения, превышающие гарантию производителя, а также частое несоответствия фактических условий хранения требованиям эксплуатационной документации обуславливают появление еще одного фактора НДБ за счет старения взрывчатых веществ под воздействием временного и внешне-климатического факторов. Далее в качестве синонима эффекта старения будет использоваться словосочетание геронтологические изменения. Как отмечалось ранее, особенностью эксплуатации артиллерийских боеприпасов является наличие значительного по времени этапа хранения, в течение которого наблюдается изменение физико-химических свойств взрывчатых веществ и конструктивных элементов боеприпасов [7–9].

Геронтологические изменения взрывчатых веществ являются необратимыми физико-химическими процессами трансформации их химического состава, изменения плотности заряда за счет комплексного влияния климатических факторов (температуры, влажности и т.д.) и условий хранения (вида места хранения, назначенного срока хранения, герметичности корпуса боеприпасов и их тары). Эти изменения обуславливают модификацию баллистических и взрывчатых свойств взрывчатых веществ. Как правило, взаимное действие старения и дефектов производства приводят к их синергии.

Если в пределах гарантийного срока незначительные производственные дефекты в боеприпасах при действии на них факторов старения не приводили к НДБ, то за пределами срока гарантии имеет место прогрессирующее старение. Ранее нахождение боеприпаса внутри гарантийного срока дополнительно стимулировалось плановым их расходом на боевую подготовку и обновлением запасов за счет замены старых партий новыми. На данный момент в силу ряда причин этого не происходит. Более того, имеет место тенденция продления эксплуатации боеприпасов к ствольным системам стоящих на вооружении свыше определенных сроков службы. Таким образом, за пределами срока гарантии первичные мелкие дефекты производства усиленные факторами старения могут приводить к НДБ. Отсутствие 100 % контроля боеприпасов средствами неразрушающего контроля не позволяет выявлять их на стадии технической эксплуатации в арсенале (базе) и не допускать до использования по назначению и направлять их в ремонт (на утилизацию).

Дальнейшая эксплуатация боеприпасов с геронтологическими изменениями, при отсутствии научно-обоснованных моделей и методов прогнозирования остаточного времени службы (хранения) боеприпасов обуславливает возникновение научно-технической и прикладной проблемы разработки методологии мониторинга их состояния с целью исключения НДБ и повышения безопасности стрельбы и служебного обращения.

Причинами НДБ являются наличие скрытых дефектов в:

- метательных зарядах (средствах воспламенения);
- разрывных зарядах снаряда;
- автоматики подрыва боеприпасов (взрыватели и трубки);
- конструктивных элементах снаряда и гильзы;
- стволе орудия.

За исключением последнего фактора метательные и разрывные заряды, а также взрыватели, трубки и конструктивные материалы снаряда и гильзы подвержены старению за счет протекания диффузионных и окислительно-восстановительных процессов.

НДБ за счет метательного заряда (средства воспламенения) проявляется в:

- осечках (при исправном стреляющем механизме затвора);
- не воспламенении порохового заряда;
- замедленном воспламенении порохового заряда;
- неполном сгорании пороха (его выбросе из канала ствола);
- недолете снаряда;
- преждевременном воспламенении порохового заряда;
- прорыве пламени в сторону затвора (назад).

НДБ за счет разрывного заряда проявляется в:

- преждевременном разрыве снаряда в канале ствола, у дульного среза или в полете;
- частичном разрыве снаряда или полном его неразрыве.

НДБ за счет автоматики подрыва боеприпасов имеют те же проявления, что и для разрывного заряда.

Одним из наиболее часто фиксируемых проявлений НДБ является преждевременный разрыв снаряда (ПРС) [10] и не разрыв снаряда (НРС) [11]. Дадим характеристику этих явлений.

Изучение ПРС как физического явления позволяет классифицировать его по следующим классификационным признакам (рис. 4).



Рисунок 4 – Классификация случаев преждевременных разрывов снарядов

Перечень чрезвычайных происшествий с ПРС (premature detonation) имевшие место в период 1905–2011 гг. в вооруженных силах различных стран мира, собранные с использованием данных размещенных в сети Интернет, представлен в табл. 1 и 2. Приведенный список не претендует на полноту.

Целью приведенных данных является иллюстрация факта достаточной распространенности вышеописанного явления и обобщение данных о нем. Дополнительная информация о ПРС, имевших место в 1960-х гг. с 105-мм гаубицей М1; случаях в 1970-х гг. с 81-мм минометом в вооруженных силах США; случаях ПРС в 1980-х гг. с гаубицей G5 в южноафриканских вооруженных силах приведена в [49–51]. Материальные и людские потери для каждого конкретного случая определяются по ссылкам, приведенным в таблице 1 в колонке с номером 6.

Таблиця 1 – Чрезвычайные происшествия связанные с НДБ артиллерийских боеприпасов

№/№	Дата	Место	Принадлежность	Краткое описание	Источник
1	2	3	4	5	6
1	09.1905	Морское сражение в Цусимском проливе	ВМС Японии	Преждевременный взрыв 304-мм снаряда в стволе корабельного орудия броненосца Mikasa	12
2	06.1915	Акватория средиземноморского побережья Турции	ВМС Великобритании	Преждевременный взрыв 152-мм снаряда в стволе корабельного орудия монитора HMS Humber	13
3	09.1915	Акватория побережья Дании	ВМС Великобритании	Преждевременный взрыв 304-мм снаряда в стволе корабельного орудия монитора HMS Lord Clive	14
4	07.1944	Боевые действия на Филиппинах	ВМС США	Преждевременный взрыв 127-мм снаряда в стволе корабельного орудия эсминца Bush (DD 529)	15
5	04.1952	Боевые действия в Корее	ВМС США	Взрыв порохового заряда 203-мм орудия крейсера St. Paul (CA-73)	16
6	09.1956	–	ВМС США	Преждевременный взрыв 127-мм снаряда в стволе корабельного орудия эсминца Buck (DD 761)	17
7	05.1965	Боевые действия во Вьетнаме	ВМС США	Преждевременный взрыв 127-мм снаряда в стволе корабельного орудия эсминца Somers (DDG-34)	18
8	07.1969	Акватория атлантического побережья Франции	ВМС Великобритании	Преждевременный взрыв 381-мм снаряда в стволе корабельного орудия монитора HMS Erebus	19
9	09.1969	Боевые действия во Вьетнаме	ВМС Австралии	Преждевременный взрыв 127-мм снаряда в стволе корабельного орудия эсминца Brisbane (D 41)	20
10	11.1969	Боевые действия во Вьетнаме	15-й полк полевой артиллерии СВ США	Преждевременный взрыв 203-мм снаряда в стволе гаубицы M110.	21

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
11	05.1970	Боевые действия в Камбодже	СВ США	Преждевременный взрыв 105-мм снаряда в стволе гаубицы	22
12	10.1972	Боевые действия во Вьетнаме	ВМС США	Преждевременный взрыв 203-мм снаряда в стволе корабельного орудия крейсера Newport (CA-148)	23
13	01.1973	Боевые действия во Вьетнаме	ВМС США	Преждевременный взрыв 127-мм снаряда в стволе корабельного орудия эс-минца Herry B. Wilson (DDG-7)	24
14	06.1978	Тихоокеанский флот СССР	ВМС СССР	Взрыв порохового заряда в трехорудийной башне главного калибра (МК-5 бис, калибр 152-мм) крейсера «Адмирал Сенявин» при выполнении артиллерийской практической стрельбы	25
15	07.1980	Гавайские острова	СВ США	Преждевременный взрыв 105-мм снаряда в стволе гаубицы	26
16	05.1986	Camp Lejeune, штат Северная Каролина	Полигон ВС США	Взрыв мины в канале ствола 81-мм миномета при выполнении стрельб	27
17	04.1989	Акватория острова Пуэрто-Рико	ВМС США	Взрыв боеприпаса в боевом отделении второй корабельной артиллерийской башни линкора Iowa (BB-61). Инцидент произошел в стволе второго 406,4-мм орудия.	28
18	1990	Саудовская Аравия	101-ая воздушно-десантная дивизия СВ США	Преждевременный взрыв 105-мм снаряда в стволе гаубицы M1.	29

1	2	3	4	5	6
19	03.1994	Боевые действия в Сомали	ВВС США	Преждевременный взрыв 105-мм снаряда в стволе авиационного арторудия самолета сил специальных операций AC-130H ВВС США. Кодовое название экипажа «Jockey 14». Взрыв 105-мм орудия инициировал пожар двигателя самолета, в результате транспортный самолет «Геркулес» упал в Индийский океан.	30
20	03.1997	Военная база Waioeru в Сингапуре	23-й батальон СВ Сингапура	Преждевременный взрыв 155-мм снаряда в стволе гаубицы FH-2000. Инцидент за счет дефекта взрывателя. Последующие рентгеновские исследования взрывателей показали, что 1,3% изделий имели дефекты.	31
21	02.2003	Военный полигон (пос. Прудбой) Волгоградская обл.	СВ России	Взрыв мины в канале ствола миномета при проведении стрельб	32
22	04.2005	Военный полигон (пос. Чебаркуль) Челябинская обл.	СВ России	Взрыв мины в канале ствола миномета при проведении стрельб	33
23	11.2007	Боевые действия в Авганистане	4-й полк королевской артиллерии СВ Великобритании	Преждевременный взрыв 105-мм снаряда в стволе гаубицы.	34
24	07.2008	Военная база (пос. Шали) Чеченская республика.	СВ России	Взрыв танкового боеприпаса танка Т-62 при его перегрузке из боеукладки танка в грузовой автомобиль	35
25	05.2009	Полигон Aberdeen шт. Мериленд	СВ США	При проведении полигонных испытаний преждевременный взрыв танкового боеприпаса УБК-4М со снарядом БК-5М в танке Т-55	36

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
26	06.2010	Военный полигон (пос. Бурдуны) Бурятия.	СВ России	Взрыв танкового боеприпаса танка Т-72 при проведении стрельб	37
27	03.2011	Форт Bragg, штат Северная Каролина	10-й полк морской пехоты ВМС США	Преждевременный взрыв снаряда в стволе 155-мм гаубицы М777А2.	38

Примечание: ВВС – военно-воздушные силы; ВМС – военно-морские силы; СВ – сухопутные войска.

Таблица 2 – Данные о преждевременных разрывах снарядов, имевших место в Советской армии на фронтах Великой отечественной войны в период с 22.06.1941 по 01.09.1941 гг. [3]

Калибр и наименование снаряда	Количество преждевременных разрывов. шт.	Характер и последствия разрыва	Причина преждевременного разрыва
76-мм ОФ снаряд (взрыватель КТМ-1)	2	Разрыв вблизи дула орудия. Отрыв дульной части ствола	Срабатывание взрывателя
76-мм фугасная граната (1915-1917 гг. изготовления с взрывателем КТ-3)	2	Разрыв ствола на расстоянии 230 мм от дула, разрушение люльки и поворотного механизма	Срабатывание взрывателя
107-мм ОФ снаряд	1	Раздутие канала ствола	Воспламенение ВВ в снаряде
122-мм ОФ снаряд (взрыватель ГВМЗ)	5	Обрыв ствола на расстоянии 350-1000 мм от дульного среза	Срабатывание взрывателя
152-мм ОФ снаряд (взрыватель РГМ)	5	Разрушение ствола, люльки и противооткатного механизма	Причина неизвестна
152-мм ОФ снаряд (взрыватель РГМ)	4	Срыв полей нарезов и повреждение дульного тормоза	Воспламенение ВВ в снаряде
152-мм ОФ снаряд (взрыватель РГМ)	2	Разрыв снаряда перед дулом орудия на расстоянии 15–20 м	Срабатывание взрывателя
152-мм ОФ снаряд (взрыватель ГВМЗ)	3	Разрыв дульной части ствола	Срабатывание взрывателя
203-мм бетонобойный снаряд	1	Раздутие ствола	Воспламенение ВВ в снаряде

Примечание: ОФ – осколочно-фугасный

Одной из разновидностей дефектов производства разрывного заряда является наличие зазоров между зарядом и стенками зарядной камеры корпуса снаряда, а также

трещины (полости) в разрывном заряде. В процессе хранения в шашке разрывного заряда идут процессы разложения взрывчатого вещества, молекулярной диффузии и конвективного массопереноса компонентов взрывчатого вещества. Это приводит к развитию свободного объема зазоров, трещин и обогащения находящейся в них воздушной смеси газообразными продуктами деструкции взрывчатого вещества и лакового покрытия внутренней поверхности зарядной камеры снаряда (рис. 5). При выстреле газозвушная смесь подвергается ударному сжатию и разогреву. Отвод тепла происходит через взрывчатое вещество, которое в зависимости от интенсивности воздействия может перейти в режим горения с последующей детонацией.

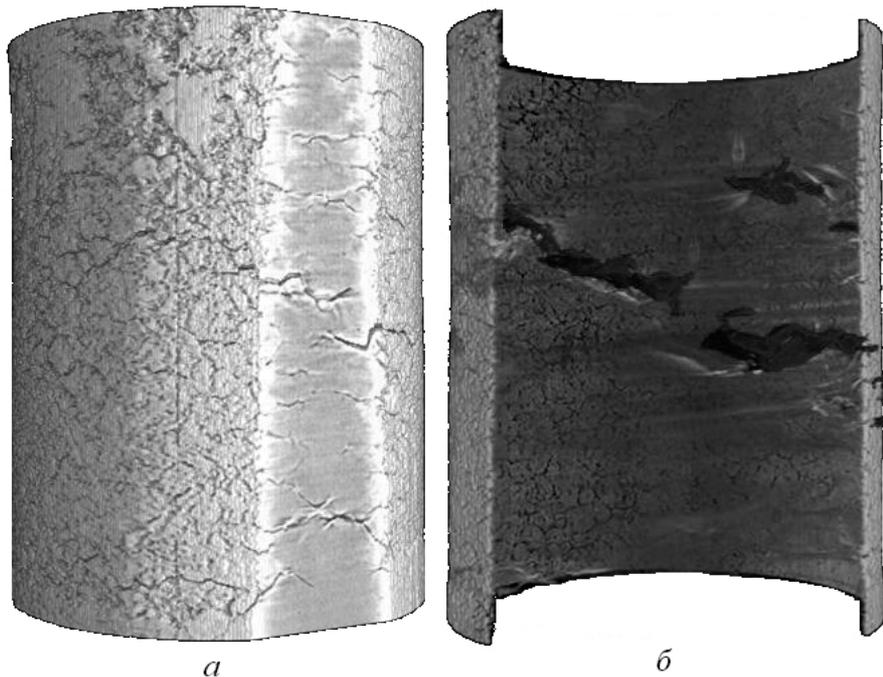


Рисунок 5 – Томографическое изображение трещин (полостей) внутри разрывного заряда:  
а – внешний вид заряда взрывчатого вещества соприкасающегося со стенкой;  
б – расположение трещин (полостей) внутри и снаружи разрывного заряда

Интенсивность воздействия на разрывной заряд зависит от баллистических свойств метательного заряда. Увеличение максимального давления в канале ствола, характерного для порохов находившихся в долговременном хранении, приводит к увеличению напряжений во взрывчатом веществе. Аналогичное действие оказывает эффект увеличения значения давления форсирования, имеющего место при росте износа канала ствола. Подтверждением данного сценария НДБ являются исследования проведенные при выявлении причин отказов авиационной автоматической пушки М230 вертолета АН-64А Apache [47].

Начало операций Enduring Freedom (несокрушимая свобода) и Iraqi Freedom (свобода Ираку, Second Gulf War) сопровождалось значительным возрастанием случаев НДБ 30-мм выстрелов М789 пушки М230 вертолета АН-64А [52]. Следует отметить, что такого рода инциденты, в том числе факты преждевременного разрыва боеприпасов, регистрировались и ранее в 80-х и 90-х годах [47]. Оценив опасности связанную с НДБ, было принято решение о запрещении к использованию более чем 1,1 млн. 30-мм выстрелов М789, произведенных до 1987 г. Так как пушка М230 была принята на вооружение в армию США в 1984 г., то календарный срок хранения самых «молодых» и

«старых» боеприпасов из категории запрещенных к использованию на начало операции Enduring Freedom (2001 г.) был 14–17 лет, а на начало Iraqi Freedom (2003 г.) 16–19 лет.

Таблица 3 – Баллистические характеристики выстрела M789

Температура, °C	Диапазон нормальных начальных скоростей (ННС) снаряда, м/с	Средняя начальная скорость внутри диапазона ННС, м/с	Допустимый разброс начальных скоростей, м/с
21±5	795–815 (20 м/с)	805	25

Источник: MIL-C-63982A(AR) – cartridge, 30mm high explosive dual purpose, M789; пункт 3.8. [53]

Выстрел M789 является выстрелом комбинированного (двойного) поражающего действия – кумулятивного и фугасного. Снаряд снаряжен бризантным взрывчатым веществом PBXN-5 и имеет кумулятивную воронку. Метательный заряд состоит из средства воспламенения (капсульной втулки) PA520, воспламенителя IB52, порохового заряда на базе нитроцеллюлозного сферического пороха типа Ball Powder. Выстрел M789 предназначен для уничтожения легкобронированной техники, наземных объектов и вертолетов противника. Основные баллистические характеристики M789 приведены в табл. 3.

Из 215 зарегистрированных происшествий нештатным функционированием пушки M230 – 94 случая (44 %) были классифицированы как инциденты произошедшие по вине боеприпаса из них:

- 59 % (55 случаев) отнесены к дефектам взрывателя и дефектам металлических конструктивных компонентов этого выстрела;
- 38 % (36 случаев) к дефектам взрывчатых веществ (разрывного и метательного зарядов), входящих в состав 30-мм выстрелов;
- 3 % (3 случая) за счет служебного обращения и несоответствия условий хранения.

Как известно, процесс старения пороха часто имитируют длительным прогреванием выстрела в термостабилизированных камерах. Один день прогрева имитирует N лет хранения боеприпаса в условиях арсенала (базы). При соотношении 1:1 один день нагрева «предсказывает» состояние взрывчатого вещества через 1 год.

Процедуру прогрева пороха с целью исследования его геронтологических свойств (propellant accelerated ageing or aging (american)) не следует путать с процедурой так называемого «термления», т.е. предварительного разогрева выстрела с целью компенсации поправки на изменение температуры метательного заряда.

Для исследования влияния геронтологических изменений пороха на баллистические характеристики метательного заряда выстрела M789 в [47] был произведен отстрел 55 артиллерийских выстрелов, подвергнутых прогреву при температуре 71 °C в течении 35 дней. Стрельба проводилась по 5 выстрелов 11 раз в 1-й, 5-й, 7-й, а также в 9, 12, 15, 19, 22, 26, 30, 35 дни с начала процедуры нагрева. Для исследований была выбрана партия 1995 года с «возрастом» 12 лет. Минимальный промежуток между испытаниями составил 2 суток, максимальный 5 суток. При каждом эксперименте фиксировалось внутрикамерное давление и начальная скорость снаряда. Результаты исследований показывают, что прогрев боеприпаса приводит к повышению максимального давления внутри канала ствола. Разность между давлениями на начальной стадии (1-й

день) и в конце термической обработки (35-й день) составляет 134,3 МПа, что соответствует увеличению давления на 45 %, а следовательно, дополнительному увеличению напряжений внутри разрывного заряда (рис. 6).

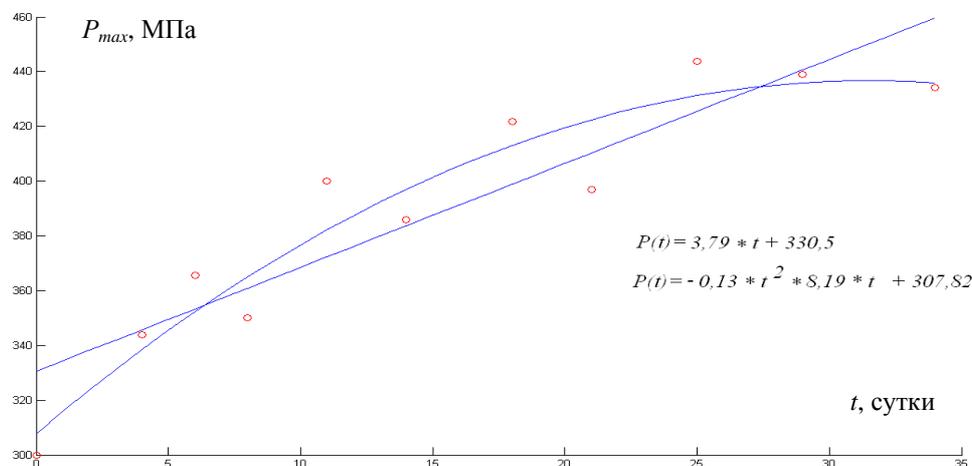


Рисунок 6 – Динамика изменения максимального давления внутри канала ствола ( $P_{max}$ ) при 35 дневном нагревании металевого заряда

На рис. 6 представлены кривые аппроксимирующие экспериментальные данные в виде полиномов первого и второго порядков. Для полинома второго порядка можно показать, что скорость нарастания максимального давления ( $P_{max}$ ) после 24–26 дня процедуры нагревания приближается к нулю. При принятии соотношения 1:1, нарастание  $P_{max}$  прекращается в промежутке 24–26 лет хранения.

Сходные результаты по приросту максимального давления ( $P_{max}$ ) при проведении термического старения пороха получены в работе [54]. В данном случае исследованию были подвергнуты три типа пороха, а продолжительность термического воздействия составила 28 сут. Результаты проведения термического старения порохов приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Результаты проведения термического старения порохов

Тип пороха	Параметры термического старения		Разложение стабилизатора		Деградация нитроцеллюлозы, %	Изменение $P_{max}$ , МПа
	Продолжительность, сутки	Температура, °С	Тип	Количество, %		
Одноосновной порох флегматизированный ДБФ	28	71	ДФА	45	14	+ 9
Сферический порох (Ball powder)	28	71	ДФА	100	37	+ 73,4
Полу-двуосновной порох на ДЕГДН	28	71	АК	32	26	+ 180

Примечание: АК – акардит; ДБФ – дибутилфталат; ДЕГДН – диэтиленгликольдинитрат; ДФА – дифениламин.

Вторым значимым проявлением НДБ является неразрыв (частичный разрыв) снаряда. Американские военные специалисты количественно оценили нижнюю и верхнюю границы НРС при полигонных стрельбах артиллерии [39–41]. Граница НРС по результатам этих исследований находится в диапазоне 2–10 % от общего числа совершенных выстрелов. Приведенные цифры меняются в зависимости от типа боеприпасов и от сборочных партий. Исследование феномена НРС в виде неразрыва или частичном разрыва снарядов (failure rate, dud rate) при проведении тестовых стрельб на военных полигонах объединены в табл. 5 [42]. Стрельбы проводились по программе изучения надежности армейских запасов боеприпасов сухопутных войск вооруженных сил США в 2000 г. (the Army's Ammunition Stockpile Reliability Program).

Следует отметить тот факт, что по мнению экспертов [41] определенное количество НРС является заниженным ввиду того, что боеприпасы, использованные для полигонных стрельб были подвергнуты тщательному отбору и проверкам, что практически не реализуется при массовом боевом применении артиллерии. Можно предполагать, что в реальной боевой обстановке число боеприпасов с НРС возрастет. Это утверждение косвенно подтверждается выводами работы [43], в которой приведены оценки количества неразорвавшихся (частично разорвавшихся) авиационных боеприпасов, найденных при разминировании территории Лаоса и Камбоджи. Верхние и нижние границы этого количества авиабомб составляют 10–30 %.

Одной из причин нештатных разрывов боевого заряда взрывчатого вещества является низкоскоростная детонация (low-order detonation, low-order non-tactical detonations), которая сопровождается неполной детонацией взрывчатого вещества. Причины и механизм этого явления сходен с ПРС.

Таблица 5 – Количество неразрывов (частичных разрывов)

Типы артиллерийских боеприпасов	Усредненное количество неразрывов (частичных разрывов) боеприпасов, %
Артиллерийские боеприпасы для пушек	4,68
Артиллерийские боеприпасы для гаубиц	3,75
Артиллерийские боеприпасы для минометов	2,91
Артиллерийские боеприпасы для безоткатных орудий	3,40
Неуправляемые реактивные снаряды	3,84
Суббоеприпасы	8,23

Процент неразрывов (частичных) разрывов оболочек пушечных снарядов за счет низкоскоростной детонации по оценкам [44] составляет 0,16 %. Источник [45] сообщает, что в результате неполной детонации взрывчатого вещества, в среднем только приблизительно 90 % взрывчатки претерпевают взрывчатое превращение, а остаточные 10 % играют роль так называемой «инертной» прослойки, которая не участвует в процессе детонации, претерпевая механическую дефрагментацию и разброс в виде крупнодисперсных частиц.

Американским стандартом по исследованию причин отказов боеприпасов и взрывчатых веществ [46] установлены следующие количественные нормы НДБ при превышении которых необходимо проводить дополнительные исследования фактов НДБ:

- НРС осколочно-фугасных и кумулятивных, бронебойных оперенных подкалиберных снарядов – 5 %;
- осечки осколочно-фугасных и кумулятивных снарядов 1 %.

### Выводы

Дефекты производства и геронтологические изменения в артиллерийских боеприпасах относятся к основным факторам, которые определяют их ненормальное действие при стрельбе.

Необходимость учета причинно-следственных связей при расследовании ненормального действия боеприпасов требует рассматривать артиллерийский выстрел в единстве метательного и разрывного заряда. Изменения баллистических свойств пороха, выражающиеся в увеличении  $P_{max}$  обуславливают возрастание напряжений возникающих в разрывном заряда при выстреле, а увеличивающиеся объемы газоздушных полостей приводят к дополнительному прогреванию разрывного заряда за счет сжатия газа и воздуха скопившихся в полостях.

Одним из путей оценки увеличения  $P_{max}$  метательного заряда и объема газоздушных полостей разрывного заряда без разрушения конструкции боеприпаса является проведение рентгено-томографических исследований с целью определения распределения плотности по всему объему артиллерийского выстрела.

С целью исключения возможных НДБ при стрельбе, необходимо проводить 100 % рентгено-томографический контроль боеприпасов не только на этапе производства, но и при их технической эксплуатации в арсенале (базе) и на предприятиях утилизирующих артиллерийские боеприпасы.

### Литература

1. Устав внутренней службы вооруженных сил СССР (утв. Указом президиума верховного совета СССР от 30.07.1975) – Москва.: – Воениздат, 1975. М., – 165 с.
2. Инструкция по контролю технического состояния боеприпасов. – Москва.: – Воениздат, 1975. – 96 с.
3. Лаврик Х.М. Преждевременные разрывы артиллерийских снарядов. – М.: Машиностроение, 1984. – 232 с.
4. Молчанов Г.Г., Туркин П.И. Курс артиллерии. Книга 5: Боеприпасы. – М.: Воениздат НКО СССР, 1949.– 212 с.
5. Charles W. Jackson. Are Your Ammunition Procedures Dangerous? Электронный ресурс – [sill-www.army.mil/famag/1969/NOV.../NOV\\_1969\\_PAGES\\_57\\_62.pdf](http://sill-www.army.mil/famag/1969/NOV.../NOV_1969_PAGES_57_62.pdf).
6. Yan Yan Liu Yan. Some safety problems of ammunitions in service management. Электронный ресурс [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTOTAL-AQHJ200004006.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-AQHJ200004006.htm).
7. Смирнов Л.П. Математическое моделирование процессов разложения взрывчатых веществ // Успехи химии.– 2010.– №79.– С. 466–490.
8. Анипко О.Б., Бусяк Ю.М. Внутренняя баллистика ствольных систем при применении боеприпасов длительных сроков хранения. – Харьков.: Изд-во академии внутр. войск МВД Украины, 2010.– 130 с.
9. Смирнов Л.П. Химическая физика разложения энергетических материалов. Проблемы и перспективы // Успехи химии.– 2004.– №73.– С. 1210–1234.

10. Pimbley, G.H. ; Marshall, E.F. Premature detonation problem. Artillery shells. Los Alamos Scientific Lab., Report Number(s) -LA-8352-MS Электронный ресурс – [http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti\\_id=5376921](http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=5376921).
11. Балаганский И.А., Мержиевский Л.А. Действие средств поражения и боеприпасов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 408 с.
12. Повреждения японских кораблей в сражении при Цусиме. Электронный ресурс – <http://www.battleships.spb.ru/Tsusima/Tsusima3.html>.
13. Britain 6"/50 (15.2 cm) BL Mark XIV. Электронный ресурс – [http://www.navweaps.com/Weapons/WNBR\\_6-50\\_mk14.htm](http://www.navweaps.com/Weapons/WNBR_6-50_mk14.htm).
14. HMS Lord Clive. Электронный ресурс – [http://en.wikipedia.org/wiki/HMS\\_Lord\\_Clive\\_%281915%29#cite\\_ref-6](http://en.wikipedia.org/wiki/HMS_Lord_Clive_%281915%29#cite_ref-6).
15. USS Bush (DD 529). Электронный ресурс – <http://www.ussbush.com/memory2.htm>.
16. USS Saint Paul (CA-73). Электронный ресурс – [http://en.wikipedia.org/wiki/USS\\_Saint\\_Paul\\_%28CA-73%29](http://en.wikipedia.org/wiki/USS_Saint_Paul_%28CA-73%29).
17. Welcome to the USS Buck (DD-761) Association. Электронный ресурс – <http://ussbuck.org>.
18. USS Somers history. Электронный ресурс – <http://www.ussomers.com/history.htm>.
19. HMS Erebus vs Battery Goldbrunner, September 1944. Электронный ресурс – <http://www.worldaffairsboard.com/battleships-board/44677-16-guns-vs-hard-targets-reality-check-4.html>.
20. Vietnam, July 22, 1969. Looking down the bore of HMAS BRISBANE [II]'s exploded 5-inch gun. Электронный ресурс – <http://www.flickr.com/photos/41311545@N05/5542147255/in/photostream>.
21. The Guns in Vietnam. Электронный ресурс – <http://www.landscaper.net/theguns.htm#8-inch%20Howitzer%20%28M110%29>.
22. X09. The premature explosion of an 105 mm. howitzer round in Cambodia (May 22, 1970) Электронный ресурс – <http://openjurist.org/512/f2d/77/challoner-v-day-and-zimmermann-inc>.
23. United States of America 8"/55RF (20,3 cm) Mark 16. Электронный ресурс - [http://www.navweaps.com/Weapons/WNUS\\_8-55\\_mk16.htm](http://www.navweaps.com/Weapons/WNUS_8-55_mk16.htm).
24. Casualties: USN and USMC Personnel Killed and Injured in Selected Accidents and Other Incidents Not Directly the Result of Enemy Action, 1946–1989 Электронный ресурс <http://www.navalhistory.org/2010/04/28/casualties-usn-and-usmc-personnel-killed-and-injured-in-selected-accidents-and-other-incidents-not-directly-the-result-of-enemy-action-1946-1989>.
25. Взрыв на крейсере «Адмирал Сенявин». Электронный ресурс – [http://www.atrinaflot.narod.ru/81\\_publications/explosion\\_turret\\_1.htm](http://www.atrinaflot.narod.ru/81_publications/explosion_turret_1.htm).
26. Personal injury damage action. Электронный ресурс – <http://ftp.resource.org/courts.gov/c/F2/884/884.F2d.492.88-2697.88-2696.html>.
27. Two servicemen were killed, and another was seriously injured (May 15, 1986) Электронный ресурс – <http://ftp.resource.org/courts.gov/c/F2/913/913.F2d.242.89-6123.html>.
28. Взрыв на американском линкоре «Айова». Электронный ресурс – [http://www.atrinaflot.narod.ru/81\\_publications/explosion\\_iowa.htm](http://www.atrinaflot.narod.ru/81_publications/explosion_iowa.htm).

29. Walls J. C., Webb D. S. Dynamic impact analysis of the M1 105mm projectile. Central Engineering Services. ORNL/ENG/TM-40. Электронный ресурс – <http://www.scribd.com/doc/28219385/Dynamic-Impact-Analysis-105mm-Projectile-1993>.
30. List of C-130 Hercules crashes. Электронный ресурс – [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_C-130\\_Hercules\\_crashes](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_C-130_Hercules_crashes).
31. Waiouru Army Camp. Электронный ресурс – [http://en.wikipedia.org/wiki/Waiouru\\_Army\\_Camp](http://en.wikipedia.org/wiki/Waiouru_Army_Camp).
32. Интернет портал «Новости России». Электронный ресурс – <http://www.newsru.com/russia/27feb2003/blast1.html>.
33. Интернет портал «Новости России». Электронный ресурс – [http://www.newsru.com/russia/01apr2005/vzryv\\_na\\_poligone.html](http://www.newsru.com/russia/01apr2005/vzryv_na_poligone.html).
34. Squaddies Survive Fireball. Электронный ресурс – [http://www.modoracle.com/news/Squaddies-Survive-Fireball\\_14666.html](http://www.modoracle.com/news/Squaddies-Survive-Fireball_14666.html).
35. Интернет портал «Российская газета». Электронный ресурс – <http://www.rg.ru/2008/07/17/shali.html>.
36. Online information for defence community. Электронный ресурс – <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA532258>.
37. Интернет портал «Новости России». Электронный ресурс – <http://www.newsru.com/russia/10jun2010/poligon.html>.
38. Artillery explosion at Fort Bragg injures 10 military members. Электронный ресурс – <http://www2.nbc17.com/news/2011/mar/15/12/10-military-members-injured-fort-bragg-artillery-e-ar-863585>.
39. Dauphin. L. and Doyle. C., United States Army Environmental Center Report of Findings For: Study of Ammunition and Dud and Low Order Detonation Rates. Report SFIM-AEC-ET-CR-200049, U.S. Army Environmental Center, Aberdeen Proving Ground, MD, 2000.
40. Dauphin. L. and Doyle. C., United States Army Environmental Center Report of Findings For: Phase II Study of Ammunition and Dud and Low Order Detonation Rates. Report SFIM-AEC-PC-CR-200139, U.S. Army Environmental Center, Aberdeen Proving Ground, MD, 2001.
41. MacDonald Jacqueline, Mendez Carmen. Unexploded ordnance cleanup costs: implications of alternative protocols. Santa Monica. RAND Corporation. 2005. 110 p. Электронный ресурс – [www.rand.org/pubs/monographs/2005/RANd\\_MG244.pdf](http://www.rand.org/pubs/monographs/2005/RANd_MG244.pdf).
42. Army Environmental Center and Army Technical Center for Explosives Safety, Study of Ammunition Dud and Low Order Detonation Rates, SFIM-AEC-ET-CR-200049, Army Environmental Center: Aberdeen Proving Ground, Maryland, 2000.
43. Lauritzen, Erik, The Challenge of Demilitarisation and Disposal of Ammunition, Military Technology, Vol. 25, No. 7 (2001), pp. 34–39.
44. Hazardous materials. Northwest training range complex environmental impact statement/overseas environmental impact statement (EIS/OEIS). December 2008. Электронный ресурс – [www.nwtrangecomplexeis.com/.../Resource\\_Section\\_3\\_Hazardous\\_Materials.pdf](http://www.nwtrangecomplexeis.com/.../Resource_Section_3_Hazardous_Materials.pdf).
45. Gerald J. A. and Dortch M. S. Predicting range UXO source quantity and its impact on future training. U.S. Army Engineer Research and Development Center, USA. Электронный ресурс - <http://library.witpress.com/pages/PaperInfo.asp?PaperID=12294>.
46. AP-75-1. Malfunctions involving ammunition and explosives (RCS CSGLD-1961) – 28 p.

47. Hirlinger John, Kukuck Scott. M789 LW 30mm HEDP cartridge in-bore detonation investigation. Электронный ресурс – [www.dtic.mil/ndia/2007gun\\_missile/.../HirlingerPresentation.pdf](http://www.dtic.mil/ndia/2007gun_missile/.../HirlingerPresentation.pdf).
48. Ветошкин А.Г. Надежность техногенных систем и техногенный риск. – Пенза.: Изд-во ПГУАиС, 2003. – 154 с.
49. Ciccia, Joseph F. Malfunction investigation of cartridge, 105-mm HE composition B, M1 with fuze, PD: M51A5. Technical report AD0424555. Piccatinny Arsenal. 1963, – 72 p. Электронный ресурс – <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0424555>.
50. McPartland John, Pick William. In-bore premature malfunction investigations of the 81-mm high explosive mortar cartridges with the M526, M524A5 and XM176 point detonating fuzes. Technical report 4321. Piccatinny Arsenal. 1972, - 86 p. Электронный ресурс – <http://www.stormingmedia.us/40/4013/0401398.html>.
51. Cooking off. Электронный ресурс – [http://en.wikipedia.org/wiki/Cooking\\_off](http://en.wikipedia.org/wiki/Cooking_off).
52. Kenneth Insko. 30-mm Apache Ammunition In-Bore and Hang Fire Investigation Team (ИИТ). Army AL&T. Электронный ресурс – [http://findarticles.com/p/articles/mi\\_7463/is\\_200801/ai\\_n32260187](http://findarticles.com/p/articles/mi_7463/is_200801/ai_n32260187).
53. MIL-C-63982A(AR) – Cartridge, 30mm high explosive dual purpose, M789.
54. Vogelsanger B., Ossola B., Schadeli U., Antenen D., Ryf K. Ballistic shelf life of propellants for medium and small calibre ammunition – influence of deterrent diffusion and nitrocellulose degradation. Электронный ресурс – [www.xrayct.com/documents/data/IBS19/](http://www.xrayct.com/documents/data/IBS19/)

Bibliography (transliterated)

1. Ustav vnutrennej sluzhby vooruzhennyh sil SSSR (utv. Ukazom prezidiuma verhovnogo soveta SSSR ot 30.07.1975) – Moskva.: – Voenizdat, 1975. M., – 165 p.
2. Instrukcija po kontrolju tehničeskogo sostojanija boepripasov. – Moskva.: – Voenizdat, 1975. – 96 p.
3. Lavrik X.M. Prezhdevremennye razryvy artillerijskih snarjadov. – M.: Mashinostroenie, 1984. – 232 p.
4. Molchanov G.G., Turkin P.I. Kurs artillerii. Kniga 5: Boepripasy. – M.: Voenizdat NKO SSSR, 1949.– 212 p.
5. Charles W. Jackson. Are Your Ammunition Procedures Dangerous? Jelektronnyj resurs – [sill-www.army.mil/famag/1969/NOV.../NOV\\_1969\\_PAGES\\_57\\_62.pdf](http://sill-www.army.mil/famag/1969/NOV.../NOV_1969_PAGES_57_62.pdf).
6. Yan Yan Liu Yan. Some safety problems of ammunitions in service management. Jelektronnyj resurs [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTOTAL-AQHJ200004006.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-AQHJ200004006.htm).
7. Smirnov L.P. Matematičeskoe modelirovanie processov razložhenija vzryv-chatyh veshhestv Uspehi himii.– 2010.– #79.– p. 466–490.
8. Anipko O.B., Busjak Ju.M. Vnutrennjaja ballistika stvol'nyh sistem pri pri-menenii boepripasov dlitel'nyh srokov hranenija. – Har'kov.: Izd-vo akademii vnutr. vojsk MVD Ukrainy, 2010.– 130 p.
9. Smirnov L.P. Himičeskaja fizika razložhenija jenergetičeskikh materialov. Problemy i perspektivy Uspehi himii.– 2004.– #73.– p. 1210–1234.
10. Pimbley, G.H. ; Marshall, E.F. Premature detonation problem. Artillery shells. Los Alamos Scientific Lab., Report Number(s) -LA-8352-MS Jelektronnyj resurs – [http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti\\_id=5376921](http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=5376921).
11. Balaganskij I.A., Merzhievskij L.A. Dejstvie sredstv porazhenija i boe-pripasov. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2004. – 408 p.

12. Povrezhdenija japonskih korablej v srazhenii pri Cusime. Jelektronnyj re-surs – <http://www.battleships.spb.ru/Tsusima/Tsusima3.html>.
13. Britain 6"/50 (15.2 cm) BL Mark XIV. Jelektronnyj resurs – [http://www.navweaps.com/Weapons/WNBR\\_6-50\\_mk14.htm](http://www.navweaps.com/Weapons/WNBR_6-50_mk14.htm).
14. HMS Lord Clive. Jelektronnyj resurs – [http://en.wikipedia.org/wiki/HMS\\_Lord\\_Clive\\_%281915%29#cite\\_ref-6](http://en.wikipedia.org/wiki/HMS_Lord_Clive_%281915%29#cite_ref-6).
15. USS Bush (DD 529). Jelektronnyj resurs – <http://www.ussbush.com/memory2.htm>.
16. USS Saint Paul (CA-73). Jelektronnyj resurs – [http://en.wikipedia.org/wiki/USS\\_Saint\\_Paul\\_%28CA-73%29](http://en.wikipedia.org/wiki/USS_Saint_Paul_%28CA-73%29).
17. Welcome to the USS Buck (DD-761) Association. Jelektronnyj resurs – <http://ussbuck.org>.
18. USS Somers history. Jelektronnyj resurs – <http://www.ussomers.com/history.htm>.
19. HMS Erebus vs Battery Goldbrunner, September 1944. Jelektronnyj resurs – <http://www.worldaffairsboard.com/battleships-board/44677-16-guns-vs-hard-targets-reality-check-4.html>.
20. Vietnam, July 22, 1969. Looking down the bore of HMAS BRISBANE [II]'s exploded 5-inch gun. Jelektronnyj resurs – <http://www.flickr.com/photos/41311545@N05/5542147255/in/photostream>.
21. The Guns in Vietnam. Jelektronnyj resurs – <http://www.landscaper.net/theguns.htm#8-inch%20Howitzer%20%28M110%29>.
22. H09. The premature explosion of an 105 mm. howitzer round in Cambodia (May 22, 1970) Jelektronnyj resurs – <http://openjurist.org/512/f2d/77/challoner-v-day-and-zimmermann-inc>.
23. United States of America 8"/55RF (20,3 cm) Mark 16. Jelektronnyj resurs - [http://www.navweaps.com/Weapons/WNUS\\_8-55\\_mk16.htm](http://www.navweaps.com/Weapons/WNUS_8-55_mk16.htm).
24. Casualties: USN and USMC Personnel Killed and Injured in Selected Accidents and Other Incidents Not Directly the Result of Enemy Action, 1946–1989 Jelektronnyj re-surs <http://www.navalhistory.org/2010/04/28/casualties-usn-and-usmc-personnel-killed-and-injured-in-selected-accidents-and-other-incidents-not-directly-the-result-of-enemy-action-1946-1989>.
25. Vzryv na krejsere «Admiral Senjavin». Jelektronnyj resurs – [http://www.atrinaflot.narod.ru/81\\_publications/explosion\\_turret\\_1.htm](http://www.atrinaflot.narod.ru/81_publications/explosion_turret_1.htm).
26. Personal injury damage action. Jelektronnyj resurs – <http://ftp.resource.org/courts.gov/c/F2/884/884.F2d.492.88-2697.88-2696.html>.
27. Two servicemen were killed, and another was seriously injured (May 15, 1986) Jelektronnyj resurs – <http://ftp.resource.org/courts.gov/c/F2/913/913.F2d.242.89-6123.html>.
28. Vzryv na amerikanskom linkore «Ajova». Jelektronnyj resurs – [http://www.atrinaflot.narod.ru/81\\_publications/explosion\\_iowa.htm](http://www.atrinaflot.narod.ru/81_publications/explosion_iowa.htm).
29. Walls J. C., Webb D. S. Dynamic impact analysis of the M1 105mm projectile. Central Engineering Services. ORNL/ENG/TM-40. Jelektronnyj resurs – <http://www.scribd.com/doc/28219385/Dynamic-Impact-Analysis-105mm-Projectile-1993>.
30. List of C-130 Hercules crashes. Jelektronnyj resurs – [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_C-130\\_Hercules\\_crashes](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_C-130_Hercules_crashes).
31. Waiouru Army Camp. Jelektronnyj resurs – [http://en.wikipedia.org/wiki/Waiouru\\_Army\\_Camp](http://en.wikipedia.org/wiki/Waiouru_Army_Camp).
32. Internet portal «Novosti Rossii». Jelektronnyj resurs – <http://www.newsru.com/russia/27feb2003/blast1.html>.

33. Internet portal «Novosti Rossii». Jelektronnyj resurs – [http://www.newsru.com/russia/01apr2005/vzryv\\_na\\_poligone.html](http://www.newsru.com/russia/01apr2005/vzryv_na_poligone.html).
34. Squaddies Survive Fireball. Jelektronnyj resurs – [http://www.modoracle.com/news/Squaddies-Survive-Fireball\\_14666.html](http://www.modoracle.com/news/Squaddies-Survive-Fireball_14666.html).
35. Internet portal «Rossijskaja gazeta». Jelektronnyj resurs – <http://www.rg.ru/2008/07/17/shali.html>.
36. Online information for defence community. Jelektronnyj resurs – <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA532258>.
37. Internet portal «Novosti Rossii». Jelektronnyj resurs – <http://www.newsru.com/russia/10jun2010/poligon.html>.
38. Artillery explosion at Fort Bragg injures 10 military members. Jelektronnyj re-surs – <http://www2.nbc17.com/news/2011/mar/15/12/10-military-members-injured-fort-bragg-artillery-e-ar-863585>.
39. Dauphin. L. and Doyle. C., United States Army Environmental Center Report of Findings For: Study of Ammunition and Dud and Low Order Detonation Rates. Report SFIM-AEC-ET-CR-200049, U.S. Army Environmental Center, Aberdeen Proving Ground, MD, 2000.
40. Dauphin. L. and Doyle. C., United States Army Environmental Center Report of Findings For: Phase II Study of Ammunition and Dud and Low Order Detonation Rates. Report SFIM-AEC-PC-CR-200139, U.S. Army Environmental Center, Aberdeen Proving Ground, MD, 2001.
41. MacDonald Jacqueline, Mendez Carmen. Unexploded ordnance cleanup costs: implications of alternative protocols. Santa Monica. RAND Corporation. 2005. 110 p. Jelektronnyj resurs – [www.rand.org/pubs/monographs/2005/RANd\\_MG244.pdf](http://www.rand.org/pubs/monographs/2005/RANd_MG244.pdf).
42. Army Environmental Center and Army Technical Center for Explosives Safety, Study of Ammunition Dud and Low Order Detonation Rates, SFIM-AEC-ET-CR-200049, Army Environmental Center: Aberdeen Proving Ground, Maryland, 2000.
43. Lauritzen, Erik, The Challenge of Demilitarisation and Disposal of Ammunition, Military Technology, Vol. 25, No. 7 (2001), pp. 34–39.
44. Hazardous materials. Northwest training range complex environmental impact statement/overseas environmental impact statement (EIS/OEIS). December 2008. Jelektronnyj resurs – [www.nwtrangecomplexeis.com/.../Resource\\_Section\\_3\\_Hazardous\\_Materials.pdf](http://www.nwtrangecomplexeis.com/.../Resource_Section_3_Hazardous_Materials.pdf).
45. Gerald J. A. and Dortch M. S. Predicting range UXO source quantity and its impact on future training. U.S. Army Engineer Research and Development Center, USA. Jelektronnyj resurs - <http://library.witpress.com/pages/PaperInfo.asp?PaperID=12294>.
46. AR-75-1. Malfunctions involving ammunition and explosives (RCS CSGLD-1961) – 28 r.
47. Hirlinger John, Kukuck Scott. M789 LW 30mm HEDP cartridge in-bore detonation investigation. Jelektronnyj resurs – [www.dtic.mil/ndia/2007gun\\_missile/.../HirlingerPresentation.pdf](http://www.dtic.mil/ndia/2007gun_missile/.../HirlingerPresentation.pdf).
48. Vetoshkin A.G. Nadezhnost' tehnogennyh sistem i tehnogennyj risk. – Pen-za.: Izd-vo PGU AiS, 2003. – 154 p.
49. Ciccia, Joseph F. Malfunction investigation of cartridge, 105-mm HE composition V, M1 with fuze, PD: M51A5. Technical report AD0424555. Piccatinny Arsenal. 1963, – 72 p. Jelektronnyj resurs – <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0424555>.

50. McPartland John, Pick William. In-bore premature malfunction investigations of the 81-mm high explosive mortar cartridges with the M526, M524A5 and XM176 point detonating fuzes. Technical report 4321. Piccatinny Arsenal. 1972, - 86 p. Jelektronnyj resurs – <http://www.stormingmedia.us/40/4013/0401398.html>.

51. Cooking off. Jelektronnyj resurs – [http://en.wikipedia.org/wiki/Cooking\\_off](http://en.wikipedia.org/wiki/Cooking_off).

52. Kenneth Insko. 30-mm Apache Ammunition In-Bore and Hang Fire Investigation Team (IHIT). Army AL&T. Jelektronnyj resurs – [http://findarticles.com/p/articles/mi\\_7463/is\\_200801/ai\\_n32260187](http://findarticles.com/p/articles/mi_7463/is_200801/ai_n32260187).

53. MIL-C-63982A(AR) – Sartridge, 30mm high explosive dual purpose, M789.

54. Vogelsanger B., Ossola B., Schadel U., Antenen D., Ryf K. Ballistic shelf life of propellants for medium and small calibre ammunition – influence of deterrent diffusion and nitrocellulose degradation. Jelektronnyj resurs – [www.xrayct.com/documents/data/IBS19/](http://www.xrayct.com/documents/data/IBS19/)

УДК 623.451.4

Аніпко О.Б., Хайков В.Л.

### **ДЕФЕКТИ ВИРОБНИЦТВА Й СТАРІННЯ ЯК ОСНОВНІ ФАКТОРИ МОЖЛИВОЇ НЕНОРМАЛЬНОЇ ДІЇ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ БОЄПРИПАСІВ**

У результаті проведеного літературного огляду були розглянуті основні причини ненормальної дії кондиційних боєприпасів (НДБ). З метою виключення можливих НДБ при стрілянні обґрунтована необхідність проведення 100 % томографічного контролю боєприпасів не тільки на етапі виробництва, але й при їхній технічній експлуатації в арсеналі (базі) і на підприємствах утилізуючи артилерійські боєприпаси.

Anipko O.B, Hajkov V.L.

### **DEFECTS OF MANUFACTURE AND AGEING AS MAJOR FACTORS OF POSSIBLE ABNORMAL ACTION OF THE ARTILLERY AMMUNITION**

As a result of the spent literary review principal causes of abnormal action an ammunition (AAA) have been considered. On purpose isklju-chenija possible AAA at shooting necessity of carrying out of 100 % rentgeno-tomografics the control of an ammunition not only at a production phase is proved, but also at their technical operation in an arsenal (base) and at the enterprises recycling an artillery ammunition.

УДК 629.1.032.1

Борисюк М.Д., Вакуленко В.В., Бобер А.В., Зарянов В.А., Иванов Ю.П., Фолунин С.А.

### **О ПРИМЕНЕНИИ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ С ДВИГАТЕЛЕМ ЗТД-3А В БРОНЕТРАНСПОРТЕРЕ БТР-4Е**

**Актуальность проблемы.** Повышение мобильности мотопехотных подразделений сухопутных войск является одной из основных тенденций современного развития вооруженных сил большинства стран. В связи с этим, в настоящее время среди закупок бронетанкового вооружения на мировом рынке вооружений и военной техники преобладает легкобронированная бронетехника – бронетранспортеры, боевые машины пехоты, боевые машины десанта и машины на их базе.

Вместе с тем, повышение характеристик подвижности, предъявляемое к машинам этой категории, требует от разработчиков поиска все новых путей и комплексного подхода в решении данной проблемы, так как повышение мобильности осуществляется на фоне общего повышения тактико-технических характеристик легкобронированных машин: увеличения уровня защиты и огневой мощи, которые приводят к возрастанию массы машины.

С середины 1990-х годов в Украине ведутся работы по модернизации, а с начала 2000-х годов – и разработке новых конструкций бронетранспортеров. В КП ХКБМ им. А.А. Морозова были разработаны, изготовлены и прошли испытания опытные образцы бронетранспортеров с силовыми установками, оснащенными двигателями УТД-20, IVECO, DEUTZ и ЗТД-3А. Накопленный опыт работ по силовым установкам с двухтактными дизельными двигателями 5ТДФ, 6ТД и 6ТД-2 в значительной мере предопределил создание силовых установок для легкобронированной техники с аналогичными двигателями меньшей мощности.

Кроме того, при выборе типа двигателя для нового бронетранспортера, были учтены и такие основные преимущества двухтактных двигателей по сравнению с четырехтактными как:

- меньшие габаритные размеры и масса;
- более высокая габаритная и литровая мощи;
- меньшая суммарная теплоотдача в жидкие теплоносители.

**Целью данной статьи** является отражение теоретических и экспериментальных исследований по обеспечению эксплуатации бронетранспортера БТР-4Е в условиях жаркого (до 55 °С) и запыленного (до 2,5 г/кг) окружающего воздуха за счет применения силовой установки с двигателем ЗТД-3А.

**Основная часть.** Применяемая модель двигателя ЗТД-3А, разработанная КП ХКБД на базе типовой серии ЗТД, была спроектирована специально для установки в данный бронетранспортер и характеризуется следующими основными параметрами [1], которые приведены в таблице 1.

Тактико-техническим заданием на БТР были оговорены требования по выполнению боевых задач в условиях температур окружающего воздуха от минус 40 °С до 55 °С и его запыленности до 2,5 г/кг, без ограничений по скоростному и нагрузочному режимам.

Таким образом, основная задача для обеспечения эффективного функционирования силовой установки сводилась к созданию систем охлаждения, выпуска отработавших газов и питания воздухом с характеристиками, удовлетворяющими вышеуказанным требованиям.

Таблиця 1

Параметр	Значення
максимальная мощность двигателя при работе на дизельном топливе, кВт, (л.с.)	305 (415)
максимальный крутящий момент, Н·м (кгс·м)	1285,5 (131)
при статическом разрежении на впуске в дизель 0,0135 МПа (1350 мм вод. ст.) для расхода воздуха 0,8 кг/с и при статическом противодавлении на выпуске из дизеля 0,03 МПа (0,3 кгс/см <sup>2</sup> ) для расхода газа 0,77 кг/с;	
максимальная мощность двигателя в стендовых условиях, кВт, (л.с.)	368 (500)
удельный расход дизельного топлива на режиме максимальной мощности в стендовых условиях, г/кВт·ч (г/л.с.·ч)	211 (155)
теплоотдача дизеля в масло, кДж/ч (ккал/ч)	168 000 (40 000)
теплоотдача дизеля в ОЖ, кДж/ч (ккал/ч)	450 450 (110 000)
прокачка масла через двигатель, кг/ч	4500
прокачка ОЖ через двигатель, м <sup>3</sup> /ч	25
рабочий диапазон температур ОЖ, К (°С)	348...393(75...120)
максимальная температура ОЖ (кратковременно в течение одного часа), не более, К (°С)	403 (130)

Исходя из особенностей рабочего цикла двигателя, была выбрана эжекционная система охлаждения. Для обеспечения отвода тепла при повышении верхнего предела температуры окружающего воздуха до 55 °С потребовалась оптимизация параметров эжектора системы охлаждения и ресивера системы выпуска отработавших газов, определение наиболее рациональной величины давления на срезе сопел ресивера, а также площадей поверхности теплообменников водяного и масляного контура.

Выбор характеристик эжектора и ресивера производился путем расчета [2] и исследования методом моделирования. Принятые в конструкции параметры приведены в таблице 2.

Таблиця 2

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Диаметр сопла	$d_c$	мм	12
Площадь сопел	$f_c$	м <sup>2</sup>	0,0055
Высота камеры смещения	$H_k$	м	0,08
Ширина свободного проходного сечения камеры смещения	$B_{\Sigma}$	м	1,3
Расстояние от среза сопел до камеры смещения	$l_c$	м	0,04
Длина камеры смещения эжектора	$l_k$	м	0,22
Длина диффузора эжектора	$L_d$	м	0,42
Углы раскрытия диффузора	$\alpha_1$	град	4
	$\alpha_2$	град	4
Число рядов сопел	–	–	2
Число сопел	$z_c$	–	48

Масштаб эжектора (m), характеризующий его эффективность, определялся по соотношению

$$m = \frac{H_k B_3}{f_c} \quad (1)$$

Масштаб эжектора составил 18,91.

Расчет безразмерной характеристики эжектора осуществлялся по уравнению для квазистационарного потока отработавших газов

$$\frac{\Delta P}{h_1} = a + b \left( \frac{q}{\sqrt{\Delta}} \right)^2 - c \left( 1 + \frac{q}{\sqrt{\Delta}} \right)^2, \quad (2)$$

где  $\frac{\Delta P}{h_1}$  – коэффициент статического напора эжектора; a, b, c – коэффициенты уравнения эжектора;  $\frac{q}{\sqrt{\Delta}}$  – приведенный коэффициент эжекции, определяемый масштабом эжектора (m).

Результаты расчета безразмерных характеристик приведены в таблице 3.

Таблица 3

$\frac{q}{\sqrt{\Delta}}$	5,98	5,18	4,44	4,04	3,64	3,09	2,49
$\frac{\Delta P}{h_1}$	-0,06674	0,12770	0,29372	0,38610	0,47268	0,56361	0,66635

Точки размерной характеристики вычислялись из уравнений

$$\Delta P_3 = \left( \frac{\Delta P}{h_1} \right) P_c x \quad \text{и} \quad G_3 = \left( \frac{q}{\sqrt{\Delta}} \right) G_1 \sqrt{\Delta}, \quad (3)$$

где  $\Delta P_3$  – статический напор эжектора, определяемый как разность статического давления на срезе диффузора и полного давления под радиаторами, кгс/см<sup>2</sup>;  $G_3$  – расход воздуха через пакет радиаторов, кг/с;  $P_c$  – скоростной напор на срезе сопел; x – коэффициент, учитывающий сжимаемость отработавших газов;  $G_1$  – расход газа через сопла эжектора, кг/с;  $\sqrt{\Delta}$  – температурный коэффициент.

После определения сопротивления сети  $\Delta P_3$  – суммы сопротивлений всех элементов воздушной трассы (входных и выходных жалюзи, пакета радиаторов) – строятся размерные характеристики эжектора и сети, являющиеся функцией  $G_3$ . Точка пересечения характеристики эжектора и сопротивления сети и определяет значение максимального расхода воздуха через пакет радиаторов (рис. 1).

Анализ проведенных расчетов позволил установить, что при производительности эжектора 4,96 кг/с на режиме максимальной мощности и фронтальной площади теплообменников 0,81 м<sup>2</sup> максимальная температура окружающего воздуха для эксплуатации двигателя без ограничений мощности составляет 55 °С.

Последующая отработка элементов системы охлаждения, проведенная натурным моделированием и исследованием параметров силовой установки на комплексном стенде под нагрузкой, позволила обеспечить установившийся тепловой режим при предельной эксплуатационной температуре окружающего воздуха 58 °С.

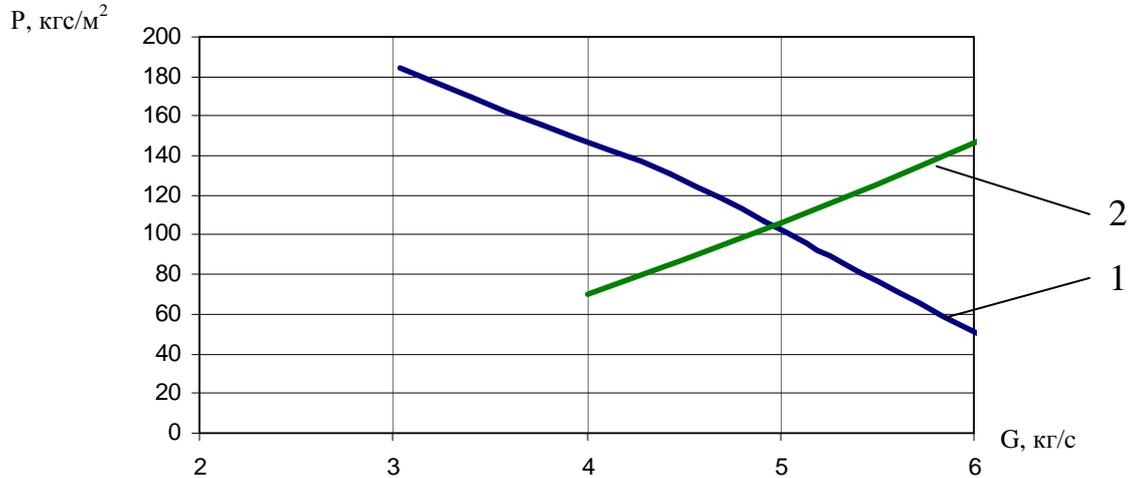


Рисунок 1 – Размерные характеристики эжектора и сети  
 1 – характеристика эжектора системы охлаждения;  
 2 – сопротивление сети системы охлаждения

Следующим этапом в решении поставленной задачи было создание системы питания двигателя воздухом, позволяющей эксплуатировать двигатель при запыленности окружающего воздуха 2,5 г/кг.

Конструктивно была принята схема с трехступенчатой очисткой воздуха, обеспечивающая степень очистки воздуха не менее 99,8 %, в которой первой ступенью является инерционная решетка, второй – циклонный аппарат, третьей – кассеты многоразового использования.

Система питания двигателя воздухом установлена в моторно-трансмиссионном отделе (МТО) и состоит из воздухозаборного устройства, расположенного в крыше МТО, бункера с инерционной решеткой, циклонного аппарата, кассет, трассы отвода очищенного воздуха из воздухоочистителя к нагнетателю двигателя, а также эжекторов для удаления пыли из пылесборника воздухоочистителя и инерционной решетки.

Воздухозаборное устройство, выполненное в виде сварной конструкции и состоящее из обечайки с откидными защитными жалюзи с сетками и фланца для крепления бункера воздухоочистителя, обеспечивает подвод воздуха в бункер воздухоочистителя.

Бункер воздухоочистителя – съемной конструкции, состоит из сварного кожуха, в котором установлена инерционная решетка и уплотняющие узлы, обеспечивающие уплотнение бункера с фланцем воздухозаборного устройства и циклонным аппаратом воздухоочистителя. В бункере с инерционной решеткой осуществляется предварительная очистка атмосферного воздуха и подвод его в циклонный аппарат воздухоочистителя. Пыль из пылесборника инерционной решетки удаляется эжектором.

Воздухоочиститель состоит из циклонного аппарата, установленного в сварном герметичном кожухе, съемных сеток, установленных на воздухоочистителе, патрубка отвода очищенного воздуха, который соединяется переходником с патрубком трассы к нагнетателю двигателя. Пыль из пылесборника циклонного аппарата удаляется эжекто-

ром. Вместе с пылесборником и эжектором пылеудаления он представляет собой вторую ступень очистки.

В головке воздухоочистителя размещены два блока кассет, каждый блок состоит из двух горизонтально расположенных кассет. Кассеты составляют третью ступень очистки воздуха. Каждая кассета состоит из корпуса и обечаек с сетками. Корпуса кассет заполнены специальной набивкой из тонкой проволоки.

Для исключения подсоса неочищенного воздуха между верхними и нижними кассетами воздухоочистителя установлены войлочные прокладки.

Для уменьшения суммарного веса бронетранспортера БТР-4Е узлы и детали системы питания двигателя воздухом изготовлены из алюминиевых сплавов.

Расчет системы питания двигателя воздухом проводился по методике [3] с учетом требований, предъявляемых к данному двигателю.

Нагрузка на один циклон вычислялась по формуле:

$$g = \frac{G_B}{Z_{ц}}, \quad (4)$$

где  $G_B$  – расход воздуха, кг/с;  $Z_{ц}$  – количество установленных циклонов, шт.

Сопротивление циклонного аппарата  $\Delta H_{ц.а.} = 800$  кгс/м<sup>2</sup> определялось при  $g = 0,0049$  кг/с по графику комплексных характеристик циклонных аппаратов воздухоочистителей [4].

Суммарное сопротивление первой ступени очистки воздуха составило:  $\Delta H_{вх.} = 150$  кгс/м<sup>2</sup>.

Сопротивление кассет составило:  $\Delta H_{к.} = 150$  кгс/м<sup>2</sup>.

Суммарное аэродинамическое сопротивление системы питания двигателя воздухом определялось по формуле:

$$\Sigma H_{во} = \Delta H_{ц.а.} + \Delta H_{вх.} + \Delta H_{к.} \quad (5)$$

Суммарное аэродинамическое сопротивление системы составило 1070 кгс/м<sup>2</sup>.

С целью проверки расчетных параметров системы питания двигателя воздухом были проведены стендовые испытания составляющих системы поэлементно.

Для уменьшения погрешности результатов стендовых приемосдаточных испытаний воздухоочистителей и оценки правильности проектирования всех ступеней очистки воздуха, воздухоочиститель был укомплектован всеми штатными узлами системы.

В процессе данных испытаний определялись следующие параметры воздухоочистителя:

– аэродинамическое сопротивление,  $H_{во}$ , которое должно быть в пределах  $(8,5^{+0,5}_{-1,5})$  кПа  $[(850^{+50}_{-150})$ кгс/м<sup>2</sup>];

– коэффициент отсоса,  $q$ , (не менее 15 %);

– коэффициент пропуска,  $\varepsilon$ , (не более 0,22 %).

Результаты стендовых испытаний приведены в таблице 4.

Анализ проведенных расчетов и результатов испытаний показал, что контролируемые аэродинамические и пылевые параметры соответствуют требованиям, предъявляемым к системе питания двигателя воздухом, и позволяют обеспечить эксплуатацию бронетранспортера в условиях запыленности окружающего воздуха до 2,5 г/кг.

Таблиця 4

№ п/п	Параметр	Размерность	Значение
$N_e = 100\%$ мощности, $G_b = 0,8$ кг/с, $P_{стр} = 1,57$ кгс/см <sup>2</sup>			
1.	Начальное аэродинамическое сопротивление воздухоочистителя с кассетами в штатном режиме, $\Delta H_{во}$	кПа (кгс/м <sup>2</sup> )	8,43 (843)
2.	Аэродинамическое сопротивление первой ступени очистки воздуха, $\Delta H_{вх.}$	кПа (кгс/м <sup>2</sup> )	1,13 (113)
3.	Аэродинамическое сопротивление второй ступени очистки воздуха, $\Delta H_{ц.а}$	кПа (кгс/м <sup>2</sup> )	6,86 (686)
4.	Аэродинамическое сопротивление третьей ступени очистки воздуха, $\Delta H_{к}$	кПа (кгс/м <sup>2</sup> )	0,5 (50)
5.	Коэффициент отсоса эжектора пылеудаления, $q$	%	16,48
$N_e = 80\%$ мощности, $G_b = 0,63$ кг/с, $P_{стр} = 0,97$ кгс/см <sup>2</sup>			
6.	Коэффициент пропуска пыли, $\varepsilon$	%	0,17

**Выводы.** Силовая установка с двигателем ЗТД-3А, созданная для бронетранспортера БТР-4Е на основании теоретических расчетов, конструкторских разработок и экспериментальных исследований, обеспечивает его эксплуатацию без ограничений по скоростному и нагрузочному режимам в условиях высоких температур и запыленности окружающего воздуха.

#### Литература

1. Двигатель ЗТД-3А. Технические условия 494СА. ТУ– Харьков, 2010 г.
2. ОСТ В3-1470-72 «Машины военные гусеничные. Методика расчета системы охлаждения» – М., 1972 г.
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Госэнергиздат. М., 1960 г.
4. Отчет № 89030140 о составной части ОКР ВНИИТМ. 1989 г.

#### Bibliography (transliterated)

1. Dvigatel' ZTD-3A. Tehnicheskie uslovija 494SA. TU– Har'kov, 2010.
2. OST V3-1470-72 «Mashiny voennye gusenichnye. Metodika rascheta sistemy ohlazhdenija» – M., 1972.
3. Idel'chik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivlenijam. Gosjenergiz-dat. M., 1960.
4. Otchet # 89030140 o sostavnoj chasti OKR VNIITM. 1989.

УДК 629.1.032.1

Борисюк М.Д., Вакуленко В.В., Бобер А.В., Зарянов В.А., Иванов Ю.П., Фолунін С.О.

### ПРО ЗАСТОСУВАННЯ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ З ДВИГУНОМ ЗТД-3А В БРОНЕТРАНСПОРТЕРІ БТР-4Е

У статті описано визначений на підставі розрахунків та експериментальних досліджень метод підвищення параметрів рухливості бронетранспортера БТР-4Е за рахунок використання силової установки з двигуном 3ТД-3А.

Borysiuk M.D., Vakulenko V.V., Bober A.V., Zaryanov W.A., Ivanov Yu.P., Folunin S.A.

**ABOUT USING THE POWER PACK WITH ENGINE 3TD-3A IN THE BTR-4E  
ARMORED PERSONNEL CARRIER**

The article describes the method of updating the parameters of BTR-4E armored personnel carrier mobility at the expense of using the power pack with engine 3TD-3A. The method is grounded on the calculations and experimental researches.

УДК 621.85-52

Вакуленко В.В., Толстолуцкий В.А., Мущинский Ю.М., Герасименко В.И.,  
Чучмарь И.Д.**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭКОНОМИЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ДВИГАТЕЛЕМ ЗТД-3А НА ИЗДЕЛИИ БТР-4**

К современной военной технике предъявляются высокие требования подвижности, маневренности и проходимости. Обеспечить данные требования удастся за счет повышения мощности энергетической установки, внедрения эффективных силовых установок и современных систем управления трансмиссией и двигателем. Автоматические системы управления трансмиссией позволяют оптимизировать время переключения передач, блокировки гидротрансформатора (ГТ), обеспечивают выбор экономичного или динамичного стиля переключения передач [1, 2]. Однако построить эффективное управление не возможно без согласования работы двигателя и трансмиссии. Таким образом, данная работа посвящена исследованию возможности экономичного управления двигателем ЗТД-3А на изделии БТР-4. Данное исследование является актуальным, поскольку позволит в дальнейшем построить комплексную систему автоматического управления движением БТР-4. Исследование проведено при помощи комплексной математической модели шасси БТР-4, выполненной в соответствии с [1,3].

Момент переключения передач напрямую зависит от положения педали подачи топлива (ППТ) или от частоты вращения вала двигателя, чем выше частота вращения вала двигателя, тем позже произойдет переключение на высшую передачу и тем интенсивнее будет разгон машины [2]. При этом, если намеренно задать системе управления низкую частоту вращения вала двигателя, при которой необходимо переключать передачу, разгон станет менее равномерным, увеличатся просадки частоты вращения вала двигателя, увеличится динамическая нагрузка на элементы трансмиссии при небольшой экономии топлива [1, 4]. Чтобы в полной мере обеспечить эффективность раннего переключения передач необходимо предусмотреть ограничение диапазона рабочих частот вращения вала двигателя при разгоне на низших передачах вплоть до 4-й. При этом верхняя граница диапазона должна соответствовать частоте вращения вала двигателя при максимальном моменте, что с небольшим запасом соответствует 2000 мин<sup>-1</sup>. Подобное ограничение наряду с экономичностью обеспечит движение машины в любых дорожных условиях.

Для достижения максимальной скорости после включения в КП пятой передачи, необходимо плавно расширить диапазон рабочих частот вращения вала двигателя до максимального значения.

Другим направлением улучшения топливной экономичности является управление расходом топлива двигателем при движении в слабо изменяющихся дорожных условиях. На рисунках 1 и 2 приведены характеристики разгона БТР-4 со штатным управлением элементами трансмиссии и двигателем.

Как видно из рисунка 2 при движении с включенным гидротрансформатором крутящий момент двигателя используется на 40–60 % в данных условиях движения (бетонное шоссе). Поскольку блокировка ГТ происходит при переходе ГТ в режим гидромукфы, то крутящий момент на турбинном колесе равен крутящему моменту двигателя и для обеспечения разгона машины достаточным будет уровень потребления топлива двигателем равный 50 % от максимального.

Ограничение крутящего момента двигателя (рис. 3, 4) приводит к увеличению плавности разгонной характеристики машины и снижает расход топлива (табл. 1).

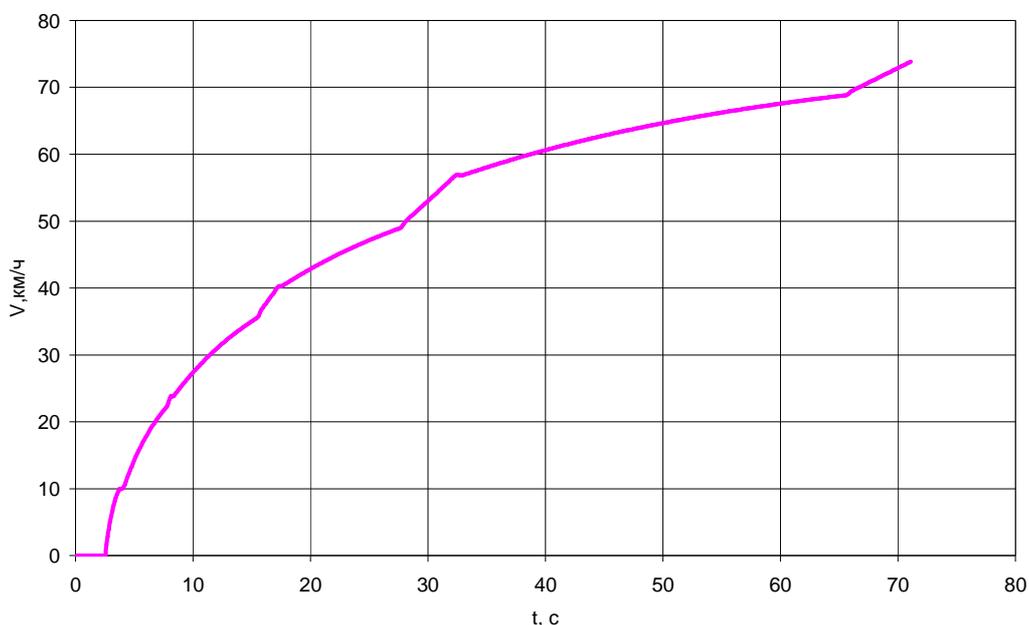


Рисунок 1 – Изменение скорости движения БТР-4 при прохождении дистанции 1000 м

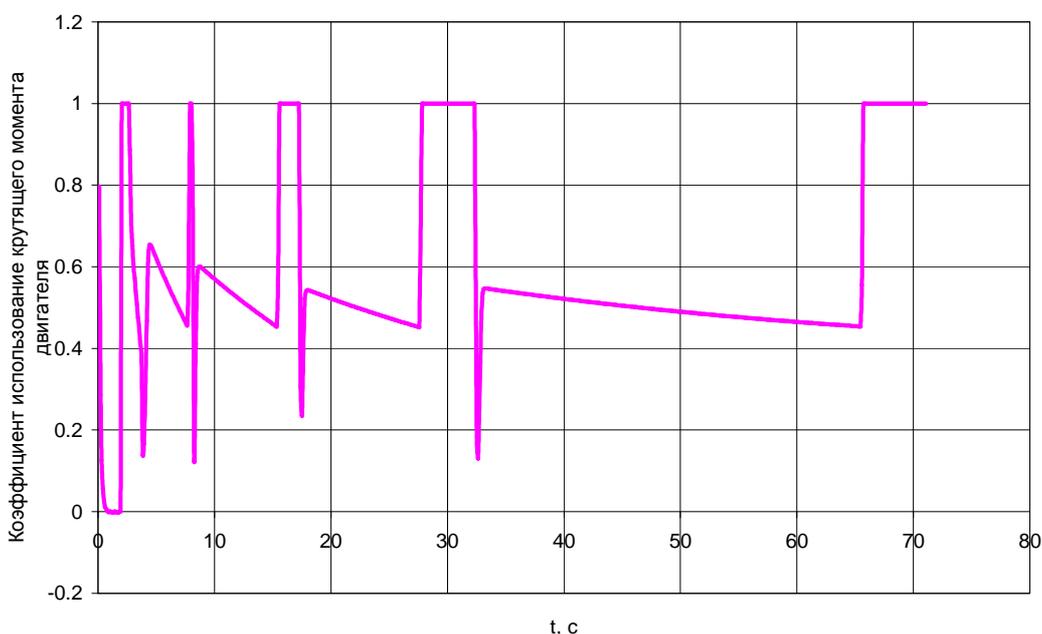


Рисунок 2 – Изменение коэффициента использования крутящего момента двигателя во время разгона БТР-4 на дистанции 1000 м

При формировании закона автоматического управления движением БТР-4 величина ограничения крутящего момента двигателя может быть определена в момент возникновения условия необходимости блокировки ГТ, когда коэффициент трансформации момента близок к единице.

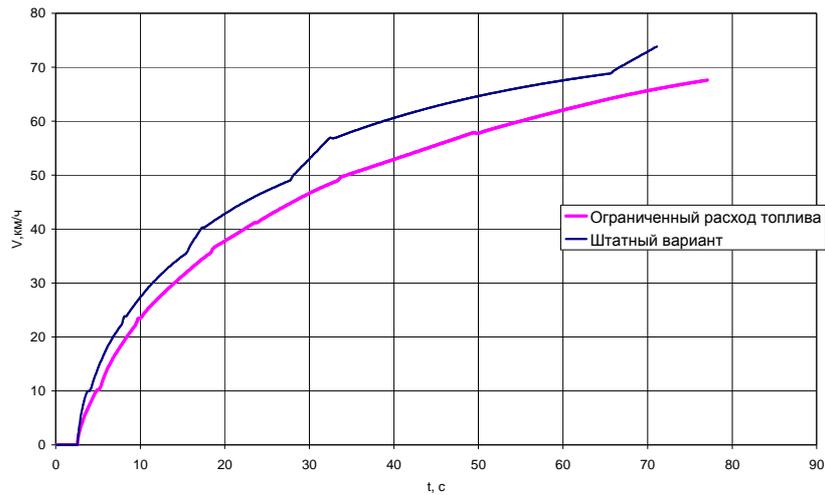


Рисунок 3 – Изменение скорости движения БТР-4 при прохождении дистанции 1000 м со штатным и ограниченным расходом топлива

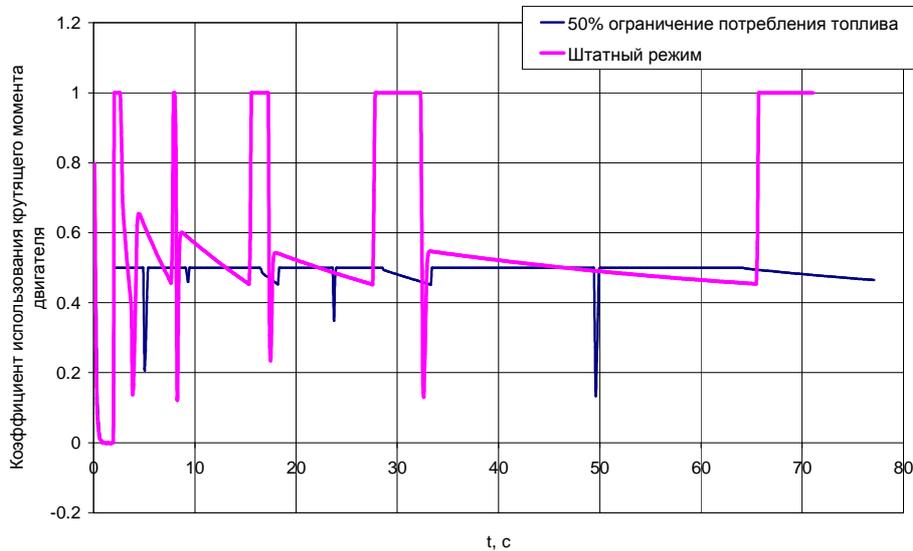


Рисунок 4 – Изменение коэффициента использования крутящего момента двигателя во время разгона БТР-4 на дистанции 1000 м

Таблица 1 – Сравнение характеристик движения БТР-4

Вариант	Путь, м	Расход топлива, кг	Время, с	Скорость, км/ч
Штатный режим	1000	0,664	71,1	74
50% ограничение потребления топлива		0,59	77	67,6
Изменение параметра	–	11 %	-8,2 %	9,5 %

Для оценки предложенных принципов управления двигателем проведен тестовый пробег по маршруту КП ХКБМ – окружная дорога г. Харькова, проходящий через проспект Московский (рис. 5).

Пробег осуществлялся по следующему алгоритму:

1. Трогание с места и начало движение.
2. Движение при фиксированном нажатии педали подачи топлива.

3. Переключение передач в соответствии с выбранным алгоритмом.
  4. В точке остановки производилось нажатие педали тормоза.
- После полной остановки движение возобновлялось.

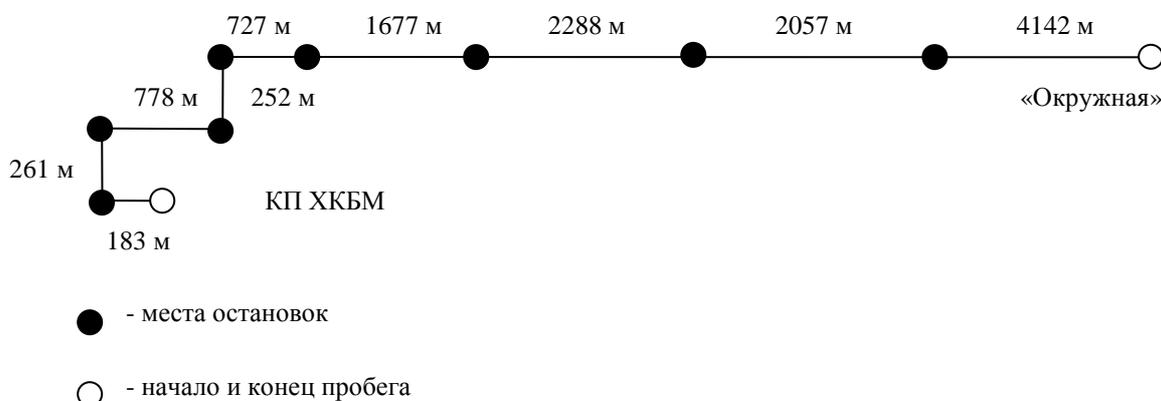


Рисунок 5 – Схема тестового пробега

Для оценки эффективности предложенных принципов управления рассмотрены три алгоритма управления движением БТР-4:

1. Штатный. Данный алгоритм управления БТР-4 на данный момент используется в составе серийной машины.
2. Экономичный. Диапазон рабочих частот вращения вала двигателя ограничен сверху частотой  $2000 \text{ мин}^{-1}$ ; переключение передач производится с упреждением  $200 \text{ мин}^{-1}$ .
3. Динамичный. Диапазон рабочих частот вращения вала двигателя максимален. Переключение передач производится при точном соответствии частоты вращения вала двигателя заданному ППТ значению.

Таблица 2 – Сравнение характеристик движения БТР-4 с разными вариантами управления элементами трансмиссии и двигателем

Вариант управления	Относительный угол нажатия ППТ	Время, с	Расход топлива, кг	Средняя скорость, км/ч	Расход на 100 км, кг
Штатное	1	749,5	8,22	60	65.76
	0,8	764,8	7,31	58,8	58.48
	0,6	819	6,46	54,9	51.68
Динамичное	1	<b>741</b>	8,48	60,7	67.84
	0,8	<b>758,6</b>	7,75	59,3	62
Экономичное	1*	847	<b>6,34</b>	53,13	<b>50.72</b>
	0,8**	916	<b>5,94</b>	49,13	<b>47.52</b>

\* – полное нажатие ППТ для экономичного варианта управления соответствует частоте вращения вала двигателя  $2000 \text{ мин}^{-1}$ .

\*\* – 80 % нажатия ППТ для экономичного варианта управления соответствует частоте вращения вала двигателя  $1800 \text{ мин}^{-1}$ .

По результатам тестового пробега (табл. 2) можно отметить эффективность применения динамичного и экономичного типов управления в сравнении с штатным, который в данный момент применяется на БТР-4.

Для реализации приведенных принципов управления движением бронетранспортера БТР-4 необходима установка информационно-управляющей аппаратуры в контур управления режимами работы двигателя ЗТД-3А и алгоритма «Топливо» [5].

**Выводы.** В результате проведенного исследования определены направления развития системы управления движением бронетранспортера БТР-4. Проведен комплекс численных экспериментов, благодаря чему определены основные принципы экономичного и динамичного управления движением БТР-4, которые показали бо́льшую эффективность в сравнении со штатной системой управления. Однако реализация данных принципов потребует разработки и внедрения дополнительных технических решений в области управления режимами работы двигателя ЗТД-3А.

#### Литература

1. Борисюк М.Д. Дослідження характеристик рухливості легкоброньованої колісної військової машини з гідромеханічною трансмісією / М.Д. Борисюк, В.О. Толстолуцький, С.В. Стрімівський, В.М. Соловійов // Інтегровані технології та енергозбереження.– 2010.– №4.– С. 102–108.
2. Автомобильный справочник BOSCH. Справ. Пособ. / Под общ. Ред. Robert Bosch GmbH. Второе издание переработанное и дополненное. Перевод с английского. – М.: За рулем, 2004. – 992 с.
3. Толстолуцький В.О. Аналіз і параметричний синтез механічних трансмісій сучасних швидкохідних гусеничних машин: Дис. канд. техн. наук: 05.22.02. – Харків, 2007.– 134 с.
4. Цыганков Э.С. Золотые правила безопасного вождения.– М.: Эксмо, 2007.– 48 с.
5. Технические условия. Дизель 6ТД-2Б 459М Б.ТУ. – Харьков: КП ХКБД, 2001. – 34 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Borisjuk M.D. Doslidzhennja harakteristik ruhlivosti legkobron'ovanoї koli-snoї vijs'kovoї mashini z gidromehanichnoju transmisieju M.D. Borisjuk, V.O. Tolsto-luc'kij, S.V. Strimovs'kij, V.M. Solovjov Integrovani tehnologii ta energozbere-zhennja.– 2010.– #4.– p. 102–108.
2. Avtomobil'nyj spravochnik BOSCH. Sprav. Posob. Pod obshh. Red. Robert Bosch GmbH. Vtoroe izdanie pererabotannoe i dopolnennoe. Perevod s anglijskogo. –M.: Za rulem, 2004. – 992 p.
3. Tolstoluc'kij V.O. Analiz i parametrichnij sintez mehanichnih transmisij su-chasnih shvidkohidnih gusenichnih mashin: Dis. kand. tehn. nauk: 05.22.02. – Harkiv, 2007.– 134 p.
4. Cygankov Je.S. Zolotyje pravila bezopasnogo vozhdenija.– M.: Jeksmo, 2007.– 48 p.
5. Tehnicheskie uslovija. Dizel' 6TD-2B 459M B.TU. – Har'kov: KP HKBD, 2001. – 34 p.

УДК 621.85-52

Вакуленко В.В., Толстолуцький В.О., Мушинський Ю.М., Герасименко В.І.,  
Чучмарь І.Д.

**ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЕКОНОМІЧНОГО УПРАВЛІННЯ  
ДВИГУНОМ ЗТД- 3А НА БТР-4**

В результаті проведеного комплексу чисельних експериментів визначені напрямки розвитку системи керування рухом бронетранспортера БТР-4, а також основні принципи економічного та динамічного керування рухом БТР-4, які показали більшу ефективність у порівнянні зі штатною системою керування.

Vakulenko V.V., Tolstolutskiy V.A., Muschinskiy U.M., Gerasimenko V.I., Chuchmar I.D.

**RESEARCH OF POSSIBILITY OF ECONOMIC ENGINE MANAGEMENT 3TD-3A  
ON THE PRODUCT AN ARMORED TROOP-CARRIER-4**

As a result of complex numerical experiments directions of the future development of movement control system of the armored personnel carrier BTR-4 are determined. Cardinal principles of economic and dynamic movement control were investigated for BTR-4. It has shown more efficiency then present movement control system.

УДК 623.4

Сядристый М.А., Федоренко Е.В., Воловик Н.В., Мормило Я.М., Рассказов И.И.

## АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ КОНСТРУКЦИЙ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК МОНОБЛОЧНОГО ТИПА ДЛЯ КОЛЕСНЫХ БОЕВЫХ БРОНИРОВАННЫХ МАШИН

**Постановка проблемы.** Успех проведения любой специальной или боевой операции, в которой задействуются как гусеничные так и колесные боевые бронированные машины (ББМ), в значительной степени зависит от их исправности (боевой готовности) в части подвижности и вооружения. Очевидно, что ни одна единица техники не выедет из парка для выполнения поставленной боевой задачи с неисправной силовой установкой (далее по тексту – моторно-трансмиссионная установка). Поэтому, поддержание силовой установки в исправном состоянии является одной из первостепенных задач.

При создании современных колесных боевых бронированных машин идет строжайший учет габаритно-массовых показателей, поэтому крайне сложно конструктивно обеспечить достаточный объем и свободный доступ к узлам и системам моторно-трансмиссионной установки для выполнения текущего ремонта, в том числе и технического обслуживания, даже в стационарных условиях, а тем более в полевых условиях. Как следствие – значительные затраты времени на выполнение монтажно-демонтажных работ для восстановления боеготовности машины в целом. Это, к сожалению, относится и к колесным боевым бронированным машинам, находящимся на вооружении в силовых структурах и в Вооруженных силах Украины. Зарубежные специалисты при создании боевых машин большое внимание уделяют созданию моторно-трансмиссионных установок моноблочного типа, как техническому решению, одному из аспектов обеспечения высокой надежности и готовности подразделений к выполнению боевых задач. И именно снижение времени на замену, вышедшую из строя моторно-трансмиссионную установку, зачастую становится определяющим фактором в компоновке конструкции всей машины.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В мире существует практика, когда создание разработчиком моторно-трансмиссионных установок моноблочного типа для колесных бронированных боевых машин (ББМ) для нужд национальных вооруженных сил или для экспорта основывалось на создании специальных двигателей, или их коммерческих модификаций, и коробок перемены передач (КПП), установки на них обслуживающих систем. В настоящее время для экспортных поставок наметилась тенденция как создания новых, так и модернизации серийных ББМ с двигателем и КПП, заказанными покупателем (импортером) в спецификации на ББМ, производство или сервисное (гарантийное) обслуживание которых у него уже налажено. В основном, это коммерческие двигатели и КПП близкой потребной мощности и, как правило, не в военном, а в гражданском исполнении.

В связи с этим, у создателей колесных ББМ возник ряд проблем при проектировании новых и модернизации имеющихся в серийном производстве изделий в части разработки моторно-трансмиссионных установок моноблочного типа [1].

К таким проблемам можно отнести:

– необходимость создания конкретной конструкции КПП или унифицированного ряда КПП, адаптированных по подсоединениям и по характеристикам с предлагае-

мыми двигателями;

– сложности стыковки предлагаемого двигателя с базовой КПП, как правило, специального назначения, в силу особенностей компоновки и технических требований как к самой ББМ, так и к трансмиссии;

– сложность поиска конструктивных решений по установке на двигатель и КПП систем, их обслуживающих;

– увеличение стоимости конструкторско-технологической подготовки производства и самого производства;

– увеличение стоимости организации обучения, выполнения гарантийного сервисного обслуживания и ремонта и ББМ на территории импортера.

На рынке колесных ББМ присутствует спрос и на машины, где обязательной является силовая установка не только с указанным заказчиком двигателем, но и КПП. Отсутствие моноблочного исполнения моторно-трансмиссионной установки снижает экспортную привлекательность (потенциал) серийных, модернизируемых или вновь разрабатываемых образцов ББМ в связи с ожидаемой высокой трудоемкостью их технического обслуживания и ремонта.

Наличие указанных проблем и современных технико-экономических требований представляют технические сложности для создателей ББМ. В отечественном двигателестроении существует проблема создания ряда специализированных двигателей, необходимых национальным производителям ББМ, которая стала особенно актуальной при создании современных моторно-трансмиссионных установок моноблочного типа с целью экспорта в составе конкурентоспособных ББМ [2, 3]. Таким образом, необходимо выработать принципы, технические требования и направления разработки универсальной схемы построения моторно-трансмиссионных установок моноблочного типа при обеспечении приемлемых затрат на разработку и обеспечения конкурентоспособных технических характеристик и стоимости, в особенности если броневая защита и вооружение являются конкурентно-способными на мировом рынке вооружений.

**Целью настоящей работы** является проведение анализа конструктивных и эксплуатационных свойств серийно производимых и вновь разрабатываемых моторно-трансмиссионных установок моноблочного типа ведущих мировых производителей ББМ, выработка основных технических требований к конструкции моторно-трансмиссионной установки моноблочного типа для ББМ применительно к современным условиям рынка вооружений.

**Основная часть.** Прежде всего, предлагается оговорить часто используемый термин «моноблок». Так, еще в СССР отраслевым стандартом [4] установлены следующие термины и определения:

1) силовой блок военной машины – моторно-трансмиссионная установка военной машины, выполненная в виде общей конструкции с единой системой крепления в военной машине;

2) моторно-трансмиссионная установка – совокупность силовой и трансмиссионной установок военной машины, предназначенная для выработки энергии и передачи ее к ведущим колесам и другим потребителям;

3) силовая установка – составная часть военной машины, состоящая из двигателя, систем и специального оборудования, обеспечивающего его работу;

4) трансмиссионная установка – составная часть военной машины, состоящая из трансмиссии, приводов отбора мощности для передачи ее от трансмиссии к потребителям мощности и системы управления этими приводами.

В современных украинских стандартах, термин «моноблок», четко не оговорен,

но предлагается следующее толкование [5]: «Силовой блок – двигатель и трансмиссия с системами, обеспечивающими их работу, конструктивно выполненные в виде моноблока. Такая конструкция обеспечивает возможность быстрой замены всей моторно-трансмиссионной установки как одного целого».

Таким образом, моторно-трансмиссионной установкой моноблочного типа, или «моноблоком», предлагается считать законченную конструкцию энергетической установки ББМ, в состав которой входят двигатель и трансмиссия (коробка перемены передач – КПП) как несущие (силовые) элементы с установленными на них системами, обеспечивающими их работу, конструктивно объединенные в единый силовой блок с элементами его установки в ББМ и сгруппированными по назначению местами подсоединений к объектовым потребителям энергии, системам управления двигателем и трансмиссии, а также системами, обеспечивающим пуск и работу двигателя как вне изделия, – на испытательном стенде, так и в составе ББМ.

К основным ведущим мировым производителям ББМ, которые используют моноблочные конструкции моторно-трансмиссионных установок, можно отнести следующие (рис. 1):

- фирма Steyr-Daimler-Puch (подразделение General Dynamics European Land Systems (GDELS), Австрия) – БТР «Pandur»;
- фирма KMW (Германия) – «GTK Boxer»;
- фирма Rheinmetall (Германия) – БТР «Fuchs»;
- фирма General Dynamics Land Systems–Canada (GLDS-C) – БТР «LAV» (Канада) и БТР «Stryker» (США/Канада);
- фирмы MOWAG (подразделение GDELS, Швейцария) – БТР «Piranha»;
- фирма Patria (Финляндия) – бронированная модульная машина «AMV».
- Горьковский автомобильный завод/Арзамасский машиностроительный завод (СССР/Россия) – БТР-60/70 (1960-е – 1980-е г.г.);

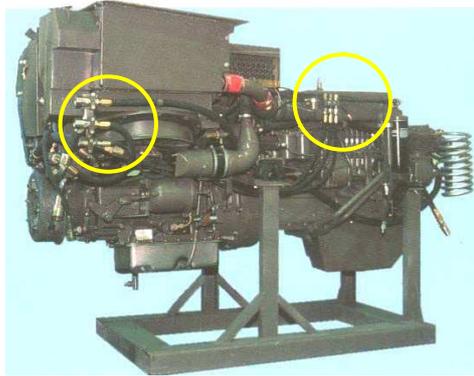
К отечественным разработкам ББМ, которые используют моноблоки, можно отнести (рис.2):

- КП ХКБМ им. А.А. Морозова (Украина) – БТР-4.

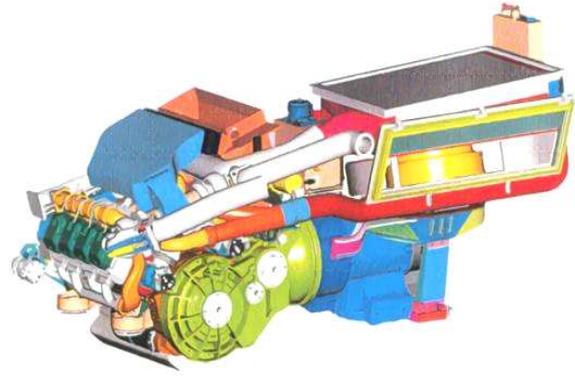
Как видно из рисунков, в мировой практике изготовления моторно-трансмиссионных установок выделяются два вида структурного исполнения моноблоков:

Первый – безрамное исполнение моторно-трансмиссионной установки.

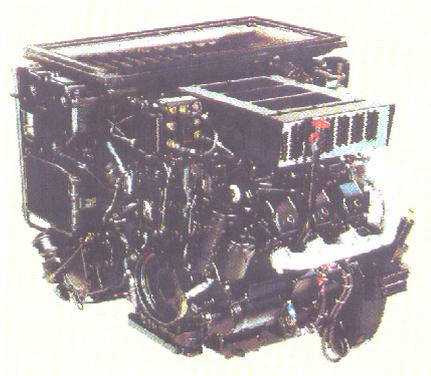
Представляет собой агрегат, центральным несущим элементом в котором выступают жестко соединенные между собой картера двигателя и КПП. Такой агрегат состоит из двигателя, КПП и закрепленных на них с помощью кронштейнов, крепежа и упругих элементов системы охлаждения, системы питания двигателя воздухом, системы предпускового подогрева, системы питания гидроусилителя руля и других потребителей гидравлической энергии, компрессора воздушной системы, компрессора кондиционера, системы выпуска отработавших газов. Имеются единые упругие элементы для установки в ББМ, а также единые чалочные приспособления. Разъемы электрических жгутов, в том числе обеспечивающих функционирование моноблока и его диагностику, присоединительные элементы трубопроводов систем потребителей электрической, гидравлической, пневматической, а также системы кондиционирования, сгруппированы в легко доступных местах и имеют быстроразъемные соединения с целью облегчения монтажа/демонтажа (рис. 1а, г).



а)



б)



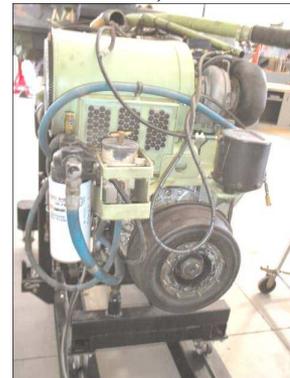
в)



г)



д)



е)



ж)



з)

Рисунок 1 – Безрамное исполнение моноблоков колесных БМ

а) БТР «Pandur»;  
г) БТР «LAV»;

б) «ГТК Воxxер»;  
д), е) БТР «Piranha»;

в) БТР «Fuchs»;  
ж), з) БТР «Stryker»

Второй – рамное исполнение моторно-трансмиссионной установки.

Представляет собой агрегат, центральным несущим элементом в котором является рама. На нее при помощи упругих элементов устанавливается двигатель и КПП, жестко, или через карданную передачу. Также на раму устанавливаются с помощью кронштейнов, крепежа и упругих элементов система охлаждения, система питания двигателя воздухом, система предпускового подогрева, система питания гидроусилителя руля и других потребителей гидравлической энергии, компрессор воздушной системы, компрессор кондиционера, система выпуска отработавших газов. Такой моноблок может иметь жесткую или на единых упругих элементах установку в БМ, а также единые чалочные приспособления.

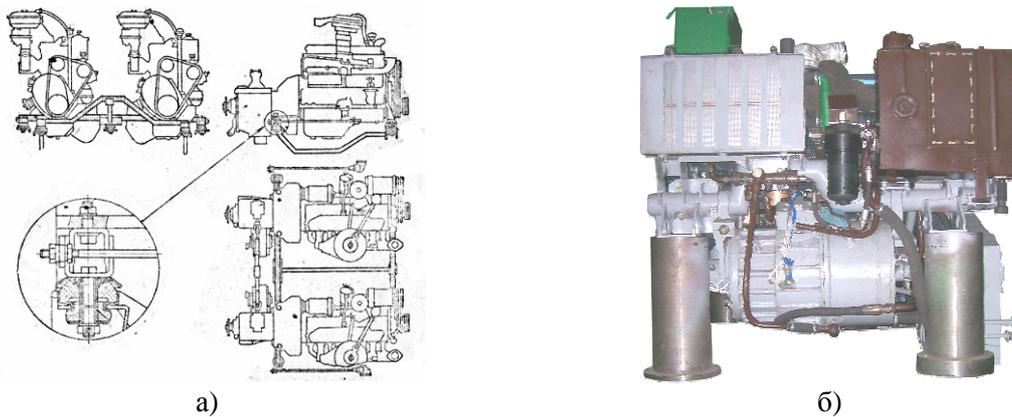


Рисунок 2 – Рамное исполнение моноблоков колесных БМ  
 а) БТР-60/70; б) БТР-4

Аналогично выполнены разъемы электрических жгутов, в том числе обеспечивающие функционирование моноблока и его диагностику, присоединительные элементы трубопроводов систем потребителей электрической, гидравлической, пневматической, а также системы кондиционирования, сгруппированы в легко доступных местах и имеют быстроразъемные соединения с целью облегчения монтажа/демонтажа. Наиболее широкое распространение за рубежом получило безрамное исполнение силовой установки, как имеющее меньшую массу за счет отсутствия рамы, на 150...260 кг.

Компоновочно силовые установки моноблочного типа имеют три варианта установки в БМ: в носовой части справа от отделения управления (реже – слева), за отделением управления, либо в кормовой части за боевым и/или десантным отделениями.

В первом варианте двигатель и КПП расположены друг относительно друга последовательно – «двигатель – КПП» («Pandur», «GTK Boxer», «Piranha», «LAV», «Stryker») [3, 6, 7], реже – по схеме «КПП – двигатель» Этот вариант установки моноблока в БМ, является классическим, часто применяющемся как на колесных, так и на гусеничных БМ.

Во втором варианте, с целью уменьшения длины МТО, двигатель и КПП расположены друг относительно друга параллельно («FUCHS», БТР-4), при этом направление крутящего момента изменяется при помощи промежуточного редуктора.

В третьем варианте двигатель и КПП могут располагаться друг относительно друга как параллельно, так и последовательно [8, 9]. В СССР на БТР-60/70 была реализована еще одна компоновочная схема – параллельное расположение двух независимых

друг от друга силовых установок, конструктивно объединенных в моноблок с помощью рамы, который моноблоком можно считать условно, так как их монтаж/демонтаж двигателей выполняется отдельно (рис. 2а). С одной стороны, такое решение позволило увеличить живучесть машины при выходе из строя одного из двигателей, с другой стороны – усложнило обеспечение их синхронной работы. Из-за последней причины, в настоящее время, при возможности модернизации БТР-60/70, блок, состоящий из двух двигателей, заменяют силовой установкой с одним двигателем или моноблоком соответствующей суммарной мощности.

Особенностью силовой установки с параллельным расположением двигателя и КПП является сложность обеспечения их конструктивной жесткости как единого агрегата, а также создание упругих опор, обеспечивающих приемлемую ударную и вибрационную защиту системы «двигатель – КПП – шасси» из-за присутствия разных центров приложения крутильных колебаний и реактивных моментов [1].

Анализируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что основными задачами, решаемыми моторно-трансмиссионными установками моноблочного типа в составе ББМ, должны быть:

- поддержание высокой технической, и, как следствие, боевой готовности за счет упрощения операций и малого времени (по экспертной оценке – не более 1,5...2 часа) замены неисправных систем, узлов путем замены моноблока;
- минимизация массо-габаритных характеристик моторно-трансмиссионных установок ББМ;
- сокращение цикла среднего и капитального ремонта ББМ за счет минимизации времени монтажа/демонтажа моторно-трансмиссионных установок в корпусе ББМ.

Анализ как серийных, так и вновь разрабатываемых современных моторно-трансмиссионных установок моноблочного типа показал, что к конструкциям установок должны предъявляться следующие основные требования:

- возможность установки двигателя подходящей мощности и КПП, марки которых удовлетворяют конечного потребителя;
- габаритные размеры и конструкция моноблока должны обеспечивать его монтаж/демонтаж без дополнительной разборки составных частей моноблока, кроме фильтра системы питания двигателя воздухом, акустического фильтра системы выпуска отработавших газов и других специальных агрегатов для систем ББМ;
- обеспечение, с помощью входящих в состав моноблока специальных систем или узлов, работы потребителей энергии ББМ (бортовое электрооборудование, пневмосистема (тормозное управление и другие потребители), гидросистема (рулевое управление, привод лебедки и другие потребители), система кондиционирования (отопление, кондиционер);
- возможность доступа через люки корпуса к местам для обслуживания узлов, агрегатов и систем без демонтажа моноблока из ББМ;
- возможность установки нового моноблока или моноблока с однотипной ББМ, без дополнительных трудоемких пуско-наладочных работ в составе ББМ испытаний на проверку качества выполнения установки и подсоединений;
- моноблок, как единая техническая система, должен автономно работать вне ББМ при условии подключения к нему потребителей энергии и энергоносителей (электричество, топливо, сжатый воздух при необходимости и т.д.), например, в условиях диагностического (испытательного) стенда у изготовителя, ремонтном предприятии

или в полевых условиях на специальной раме передвижного стенда;

- возможность монтажа/демонтажа моноблока без слива рабочих жидкостей, ГСМ, обеспечивающих функционирование моноблока и потребителей ББМ, для чего моноблок должен иметь электрические, пневматические, гидравлические быстроразъемные и самозапирающихся соединения для исключения утечек рабочих жидкостей и ГСМ;

- возможность текущего ремонта различной сложности, как в специальных мастерских, так и в полевых условиях моноблока вне ББМ путем замены составных частей моноблока с применением инструмента и приспособлений, входящих в состав комплекта ЗИП ББМ, а также машин технического обслуживания и ремонта;

- возможность замены узлов и агрегатов с ограниченным ресурсом в процессе эксплуатации без демонтажа моноблока из ББМ.

Учитывая вышеизложенное при разработке моноблока для БТР-4 с учетом возможных требований покупателя к типу двигателя и КПП и минимизации сроков, был принят к реализации моноблок рамного исполнения. При разработке моноблока возможность применения различных двигателей и КПП без каких-либо доработок была решена за счет установки их на раме на индивидуальных штатных упругих опорах.

При разработке конструкции была предложена следующая структура силового моноблока [10]:

- рама с кронштейнами для установки составных частей моноблока;
- двигатель с элементами его крепления на раме;
- система питания двигателя воздухом;
- система питания топливом двигателя;
- система охлаждения в составе блока радиаторов систем охлаждения двигателя, КПП, раздаточной коробки, промежуточного охлаждения наддувочного воздуха (при необходимости), кондиционера (при необходимости), и блока вентиляторов;
- система смазки двигателя, КПП и раздаточной коробки;
- система выпуска отработавших газов;
- противопожарное оборудования моноблока;
- согласующий редуктор между двигателем и КПП с элементами его крепления на раме;

- коробка перемены передач с элементами ее крепления на раме;
- карданная передача между согласующим редуктором и КПП;
- электрическая система моноблока;
- электрическая система диагностики всех необходимых параметров моноблока;
- гидросистема привода вентиляторов системы охлаждения;
- гидросистема рулевого управления, лебедки и др. оборудования;
- компрессор воздушной системы;
- компрессор кондиционера (при необходимости).

Применение в соединениях трубопроводов систем моноблока быстроразъемных самозапирающихся соединений дало возможность осуществления замены силового блока без слива рабочих жидкостей и ГСМ, т.к. на их слив при демонтаже затрачивается от 20 % до 60 % общего времени [2].

В КП ХКБМ им. А.А. Морозова были проведены исследования, направленные на изучение времени на монтаж/демонтаж моноблока, разработанного для бронетранспортера БТР-4. Данные приведены в таблицах 1 и 2, причем время рассчитано исходя

из работы экипажа из трех человек.

Таблица 1 – Анализ времени на демонтаж электрического и гидравлического оборудования моноблока на БТР-4

№ п/п	Операция	Время выполнения операции, мин											
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
1.	Открытие сливных отверстий, слив ГСМ	1 человек											
2.	Демонтаж электрооборудования	1 человек											
3.	Отсоединения патрубков системы охлаждения	1 человек											
4.	Отсоединение патрубков гидросистемы привода вентиляторов					1 человек							
5.	Отсоединения патрубков гидросистемы управления						1 человек						

Таблица 2 – Анализ времени на монтаж электрического и гидравлического оборудования моноблока на БТР-4

№ п/п	Операция	Время выполнения операции, мин												
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
1.	Присоединение патрубков гидросистемы привода вентиляторов	1 человек												
2.	Присоединение патрубков системы охлаждения	1 человек												
3.	Монтаж электрооборудования	1 человек												
4.	Присоединение патрубков гидросистемы управления							1 человек						
5.	Заправка ГСМ										1 человек			

### Выводы

1. Применение моторно-трансмиссионных установок в моноблочном исполнении отвечают техническим требованиям, изложенным в статье, во вновь создаваемых машинах можно добиться следующих результатов:

- достижение более плотной компоновки и сокращения объемов моторно-трансмиссионных установок, а следовательно и массы, на 15–20 %;
- обеспечение возможности сборки и проверки работоспособности моторно-трансмиссионной установки вне машины в условия серийного производства, ремонтного предприятия или в условиях полевого ремонта;
- сокращение в два раза времени ремонта БММ путем замены моноблока в машине;
- упрощение ремонта за счет обнаружения неисправностей моноблока при возможности оценки его работы вне БММ;
- агрегатный (поузловой) метод ремонта моноблока вне машины, в полевых условиях.

2. В результате анализа современных тенденций развития БММ ведущих мировых производителей, которые используют моноблочные конструкции моторно-трансмиссионных установок, сформулированы основные требования, предъявляемые к моторно-трансмиссионным установкам моноблочного типа.

3. На основании общих технических требований к силовому моноблоку Харьковским конструкторским бюро по машиностроению им. А.А. Морозова сформирована структура моторно-трансмиссионной установки моноблочного типа и разработаны конструкции моноблоков с импортными двигателями, которыми оснащаются современные бронетранспортеры БТР-4.

Проведены исследования затрат времени, которые подтверждают уменьшение общего времени на 50 %.

### Литература

1. Баранов С.П., Шпак Ф.П. Подвижность ВГМ. Моторные установки. – М.: ЦНИИ информации, 1984 г. – 96 с.
2. Баранов С.П., Гинзбург Б.М. и др. Моторные установки зарубежных танков. Специальный аналитический обзор за период с 1965 г. по 1975 г. №1572. – М.: ЦНИИ информации, 1977 г. – 144 с.
3. «MTU Starter Generators and Hybrid Systems for Military Vehicles», рекламные материалы по фирме «MTU», 2009 г.
4. ОСТ ВЗ-6270-87. Установка силовая. Трансмиссия. Ходовая часть военных гусеничных машин. Термины и определения. – Введен 01.01.88.
5. Кістерний Ю.І., Немировська Н.Г., Філоненко Т.В. Початковий тлумачний словник бронетанкової термінології. – Х.: Друкарня Харківського гвардійського ордена Червоної Зірки інституту танкових військ імені Верховної Ради України НТУ «ХП», 2003 р. – 47 с.
6. Рекламний проспект БТР «FUCHS».
7. Фотоматериали с сайта <http://www.armyrecognition.com>.
8. Руководство по войсковому ремонту БТР-60ПБ. – М.: Военное издательство, 1982 г. – 309 с.

9. Турчин М.А., Мурашкин Е.М. и др. Бронетранспортер БТР-70. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – М.: Воениздат, 1988 г. – 562 с.

10. Колесный бронетранспортер БТР-4А. Руководство по эксплуатации. В1318РЭ. – Х.: КП ХКБМ им. А.А. Морозова, 2009 г. – 433 с.

Bibliography (transliterated)

1. Baranov S.P., Shpak F.P. Podvizhnost' VGM. Motornye ustanovki. – М.: СНИИ информации, 1984 г. – 96 p.

2. Baranov S.P., Ginzburg B.M. i dr. Motornye ustanovki zarubezhnyh tankov. Special'nyj analiticheskij obzor za period s 1965 g. po 1975 g. #1572. – М.: СНИИ информации, 1977 г. – 144 p.

3. «MTU Starter Generators and Hybrid Systems for Military Vehicles», reklamnye materialy po firme «MTU», 2009 g.

4. OST V3-6270-87. Ustanovka silovaja. Transmissija. Hodovaja chast' voennyh gusenichnyh mashin. Terminy i opredelenija. – Vveden 01.01.88.

5. Kisternij Ju.I., Nemirovs'ka N.G., Filonenko T.V. Pochatkovij tlumachnij slovník bronetankovoї terminologii. – Н.: Drukarnja Harkivs'kogo gvardijs'kogo ordena Chervonoї Zirki institutu tankovih vijs'k imeni Verhovnoї Radi Ukraїni NTU «HPI», 2003 r. – 47 p.

6. Reklamnyj prospekt BTR «FUCHS».

7. Fotomaterialy s sajta <http://www.armyrecognition.com>.

8. Rukovodstvo po vojskovomu remontu BTR-60PB. – М.: Voенное izdatel'stvo, 1982 g. – 309 p.

9. Turchin M.A., Murashkin E.M. i dr. Bronetransporter BTR-70. Tehnicheskoe opisanie i instrukcija po jekspluatacii. – М.: Voениzdat, 1988 g. – 562 p.

10. Kolesnyj bronetransporter BTR-4A. Rukovodstvo po jekspluatacii. V1318RJe. – Н.: КР НКБМ им. А.А. Морозова, 2009 г. – 433 p.

УДК 623.4

Сядристий М.А., Федоренко Є.В., Воловик М.В., Мормило Я.М., Розказов І.І.

**АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ КОНСТРУКЦІЙ СИЛОВИХ  
УСТАНОВОК МОНОБЛОКОВОГО ТИПУ ДЛЯ КОЛІСНИХ БОЙОВИХ  
БРОНЬОВАНИХ МАШИН**

У статті приведений аналіз силових установок сучасних бойових машин провідних світових виробників на предмет зручності та швидкості монтажу/демонтажу їх в машини, крім того, пред'явлені технічні вимоги до моноблокової конструкції силової установки для броньованих колісних машин.

Syadristiy M., Fedorenko E., Volovik M., Mormilo Ya., Rasskazov I.

**ANALYSIS OF MODERN TRENDS IN DESIGNS DEVELOPMENT OF  
MONOBLOCK-TYPE POWERPACKS OF WHEELED ARMORED FIGHTING**

## **VEHICLES**

The article gives analysis of powerpacks intended for modern wheeled armored fighting vehicles of the leading manufacturers with respect to convenience and speed of mounting/dismounting them onto the vehicles. The article also gives technical requirements for monoblock-type designs of powerpack for wheeled armored fighting vehicles.

УДК 621.85-52

Толстолицкий В.А.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО И ЭКОНОМИЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСМИССИЕЙ БТР-4 С ДВИГАТЕЛЕМ ЗТД-ЗА**

В нынешнее время экономия топлива особенно актуальна, так как цены на него постоянно и уверенно растут. Для военной техники проблема экономии топлива остро встает в мирное время, когда есть возможность пожертвовать временем, необходимым для переброски техники, и сократить потребление топлива, а значит, сэкономить средства и ресурсы. Определяющим фактором, влияющим на экономичность движения, является стиль вождения. Приемы вождения автомобиля в экономичном режиме хорошо известны [1, 2]. Приведем наиболее эффективные из них:

- избегать любых резких движений с педалью подачи топлива, стараясь постоянно находиться в экономичном режиме;
- никаких резких стартов, переключать передачи как можно раньше, двигаться прямолинейно и равномерно;
- избегать обгонов и перестроений, не двигаться "накатом" на нейтральной передаче, избегать любых изменений "крейсерской" скорости, стараться, как можно меньше тормозить;
- снижать скорость автомобиля, используя прием "торможение двигателем".

Список приемов экономичного вождения можно продолжать достаточно долго, однако они все сводятся к обеспечению равномерного движения с постоянной или близкой к постоянной скорости.

Внедрение данного принципа в алгоритмы системы управления трансмиссией БТР-4 позволит снизить объемы потребления топлива, увеличить запас хода по шоссе и повысить экологичность БТР. Однако, не всегда топливная экономичность является определяющей. В условиях боевой обстановки (или приближенной к боевой) военная техника должна обладать высокой подвижностью, что предполагает максимальную динамичность движения машины: интенсивный разгон, торможение, движение на максимальных скоростях и т.д., что достигается за счет увеличения потребления топлива.

Таким образом, наряду с экономичным режимом управления трансмиссией БТР-4, который позволит снизить расход топлива, необходим противоположный по сущности, динамичный режим управления, который позволит, если того потребует ситуация, увеличить характеристики подвижности.

Движение машины можно разделить на три этапа: разгон, движение с постоянной скоростью и торможение. Каждый из этих этапов характеризуется своей интенсивностью расхода топлива (рис. 1). При разгоне расход топлива максимален, что связано с необходимостью преодоления сил инерции, возникающих при ускоренном движении. Движение с постоянной скоростью характеризуется наименьшим расходом топлива, необходимым для обеспечения уровня крутящего момента двигателя, соответствующего сумме сил сопротивления движению, таких как сила трения, сопротивления воздуха и т.д. При торможении двигателем потребление топлива минимально или отсутствует.

Автоматическая система управления движением БТР-4 оказывает непосредственное влияние на интенсивность разгона и эффективность торможения двигателем.

Рассмотрим типы управления. Экономичное управление подразумевает прохождение определенного участка трассы с минимальными затратами топлива или

$$\text{const } \Delta S \text{ при min } \Delta g_e, \quad (1)$$

где  $\Delta S$  – пройденный путь;  $\Delta g_e$  – расход топлива.

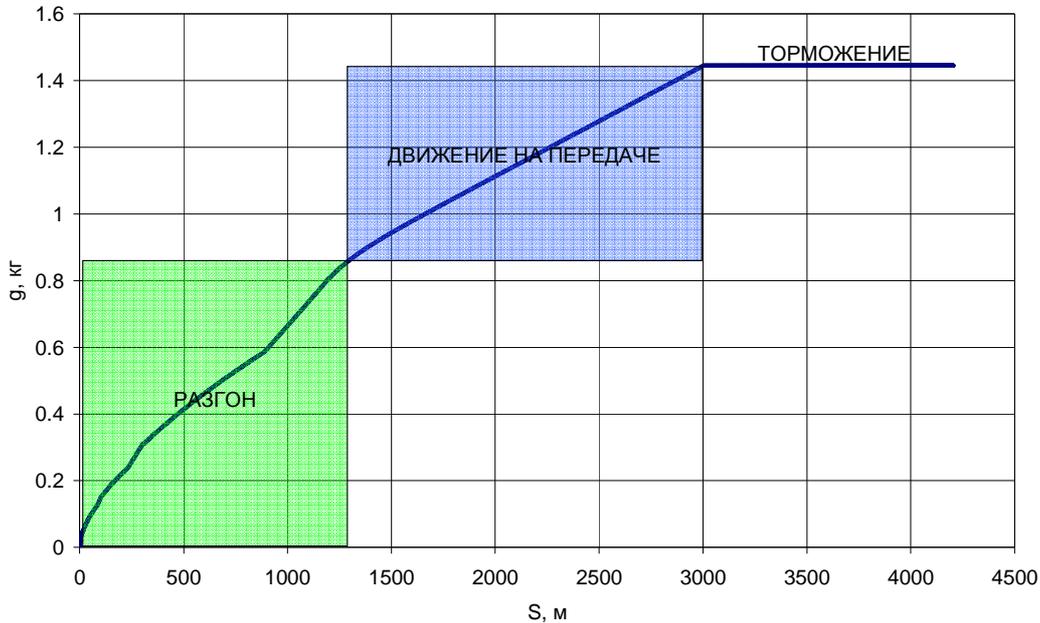


Рисунок 1 – Расход топлива в процессе движения машины

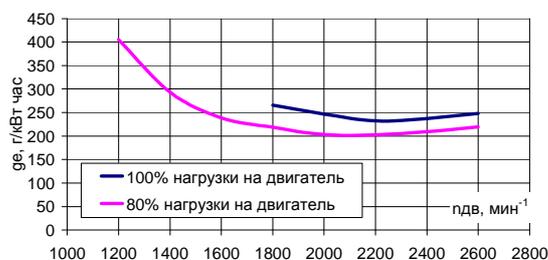
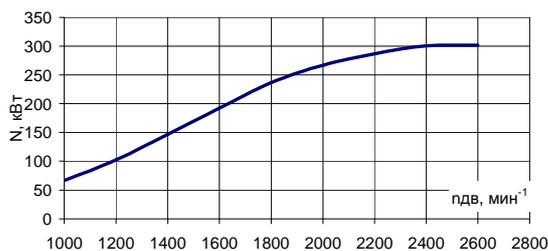
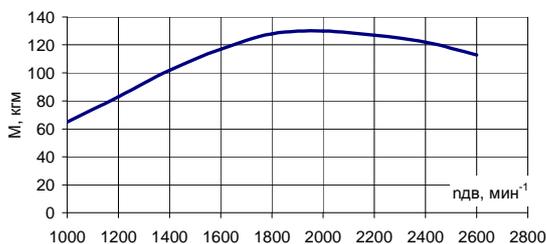


Рисунок 2 – Внешние характеристики двигателя ЗТД-3А

При условии приемлемой динамичности. Динамичное управление, в свою очередь, подразумевает преодоление определенного участка трассы за минимальное время или

$$\text{const } \Delta S \text{ при min } \Delta t, \quad (2)$$

где  $\Delta t$  – время прохождения дистанции  $\Delta S$ .

При условии не превышения предельных динамических нагрузок в элементах трансмиссии и на местах водителя и пассажиров.

Дальнейшее исследование будет построено исходя из этих принципов.

Объектом исследования является шасси изделия БТР-4 с двигателем ЗТД-3А, гидромеханической трансмиссией и системой автоматического управления коробкой перемены передач.

Трансмиссия БТР-4 включает вспомогательный (входной) редуктор, коробку перемены передач, раздаточную

коробку, а также четыре моста, который в свою очередь включают главную передачу и колесный редуктор.

Двигатель ЗТД-3А оснащен гидромеханическим всережимным регулятором частоты вращения прямого действия. Минимальная частота вращения вала двигателя составляет  $800 \text{ мин}^{-1}$ , максимальная  $2800 \text{ мин}^{-1}$ . Максимальная мощность двигателя ЗТД-3А в условиях стенда составляет 368 кВт (500 лс). Соответствующие внешние характеристики двигателя в условиях объекта приведены на рис. 2.

Исследование возможности динамического и экономичного управления трансмиссией БТР-4 с двигателем ЗТД-3А проводилось на базе комплекса численных экспериментов, для чего была использована полная математическая модель шасси БТР-4 [3]. В процессе исследования последовательно рассмотрено влияние отдельных элементов трансмиссии и способов их управления на динамичность и экономичность движения машины.

Процесс переключения передач вверх в значительной степени определяет характеристики динамичности движения машины в процессе разгона. Повышение передачи при низких частотах вращения двигателя положительно сказывается на расходе топлива (табл. 1), но ухудшает динамику разгона (рис. 3).

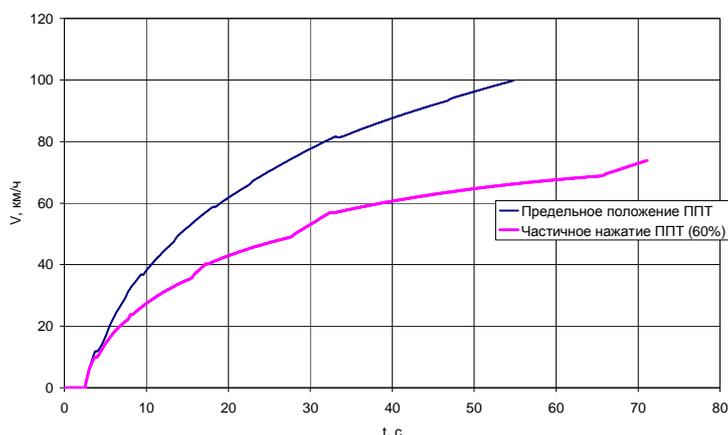


Рисунок 3 – Изменение скорости движения БТР-4 во время разгона при полном и частичном нажатии педали подачи топлива (ППТ)

Это связано с тем, что при раннем переключении в полной мере не реализуется потенциал низших передач, ускорение на которых при разгоне выше, чем на более высоких передачах. Соответственно, общая картина разгона становится плавной, что способствует экономии топлива. Частота вращения вала двигателя при раннем переключении передач соответствует максимуму момента и выбрана в соответствии с наиболее распространенными рекомендациями [1,2,4].

Таблица 1 – Сравнение эффективности раннего и позднего переключения передач

Вариант	Путь, м	Расход топлива, кг	Время, с	Скорость, км/ч
Разгон при полном нажатии ППТ и переключении передач при частоте вращения вала двигателя $2800 \text{ мин}^{-1}$	1000	1,16	54,6	100
Разгон при частично нажатии ППТ (60 %) при частоте вращения вала двигателя $2000 \text{ мин}^{-1}$		0,664	71,1	73
Изменение параметра	-	43 %	-30 %	27 %

Исследование полного цикла движения – разгон, движение с постоянной скоростью, торможение, так же показало большую топливную эффективность варианта с ранним переключением передач (рис. 4, табл. 2).

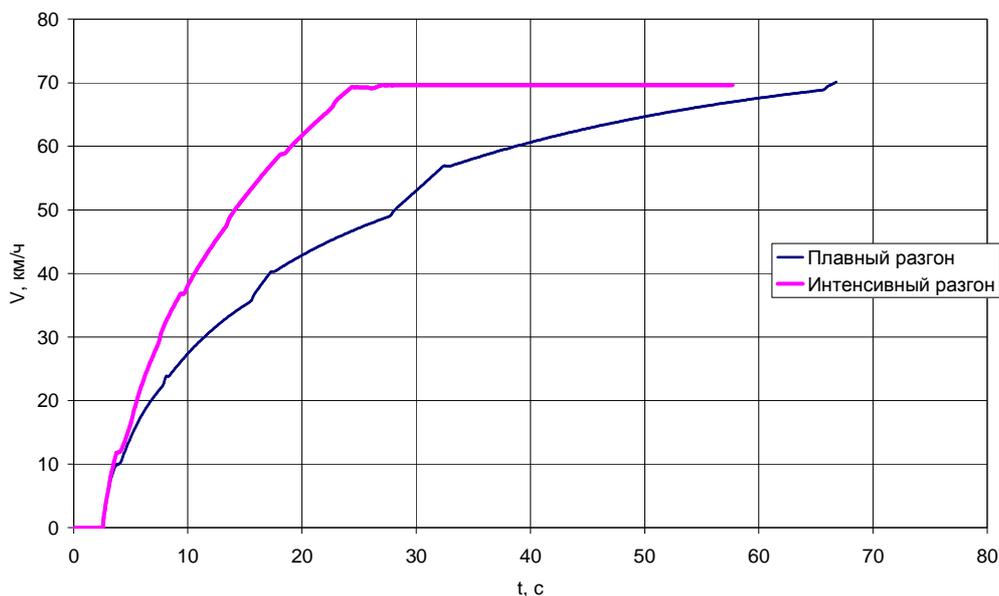


Рисунок 4 – Изменение скорости движения БТР-4 при прохождении дистанции 914 м с разными стилями управления

Таблица 2 – Сравнение эффективности различных стилей вождения при полном цикле движения (для дистанции 914 м)

Вариант управления	Путь, м	Расход топлива, кг	Время, с	Скорость, км/ч
Динамичный	914	0,67	57,72	70
Экономичный		0,604	68,78	
Изменение параметра	–	10 %	-19 %	–

Гидродинамические трансформаторы служат для преобразования крутящего момента двигателя, обеспечивая гидравлическую связь между ведущим и ведомым (трансмиссия) звеньями транспортного средства. Основными преимуществами ГТ являются: автоматичность изменения режима работы в зависимости от нагрузки на ведомом валу, отсутствие жесткой связи между ведущим и ведомым звеньями, гашение крутильных колебаний двигателя и динамических нагрузок трансмиссии, увеличение срока службы элементов двигателя и трансмиссии.

При блокировке ГТ обеспечивается жесткая кинематическая связь двигателя и трансмиссии, что способствует повышению КПД силовой установки и позволяет реализовать двигателю полный крутящий момент. Однако, срабатывание блокировки ГТ приводит к резкому падению частоты вращения вала двигателя, что приводит к выходу двигателя на внешнюю характеристику и увеличению потребления топлива.

Ранняя блокировка ГТ увеличивает динамичность разгона машины (рис. 5) за счет более полного использования крутящего момента двигателя (рис. 6), однако значительно увеличивает потребление топлива (табл. 3).

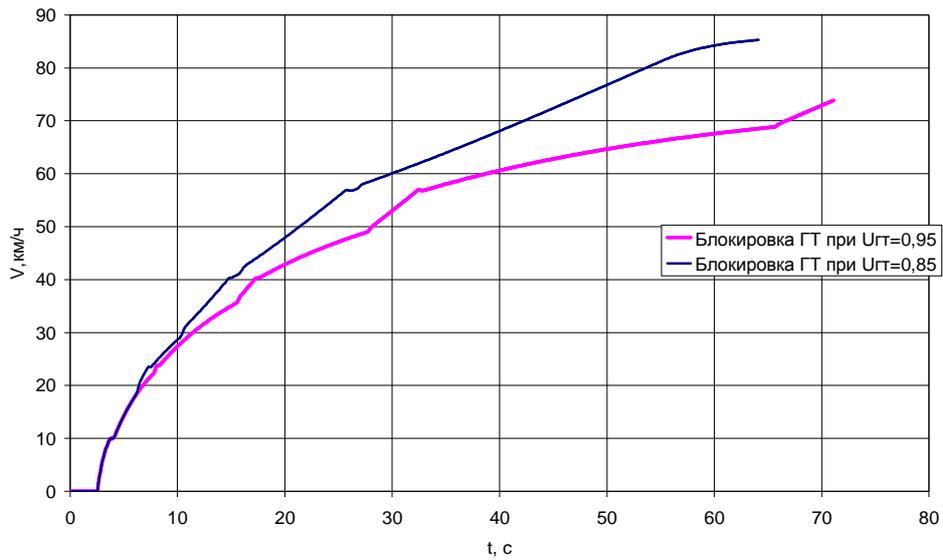


Рисунок 5 – Изменение скорости движения БТР-4 при прохождении дистанции 1000 м с ранней (кинематическое передаточное отношение ГТ,  $U_{ГТ} = 0,85$ ) и штатной ( $U_{ГТ} = 0,95$ ) блокировкой ГТ

Таблица 3 – Влияние момента блокировки ГТ

Вариант	Путь, м	Расход топлива, кг	Время, с	Скорость, км/ч
Разгон при штатной блокировке ГТ	1000	0,664	71,1	74
Разгон при ранней блокировке ГТ		0,79	64,1	85
Изменение параметра	-	-19%	10%	-15%

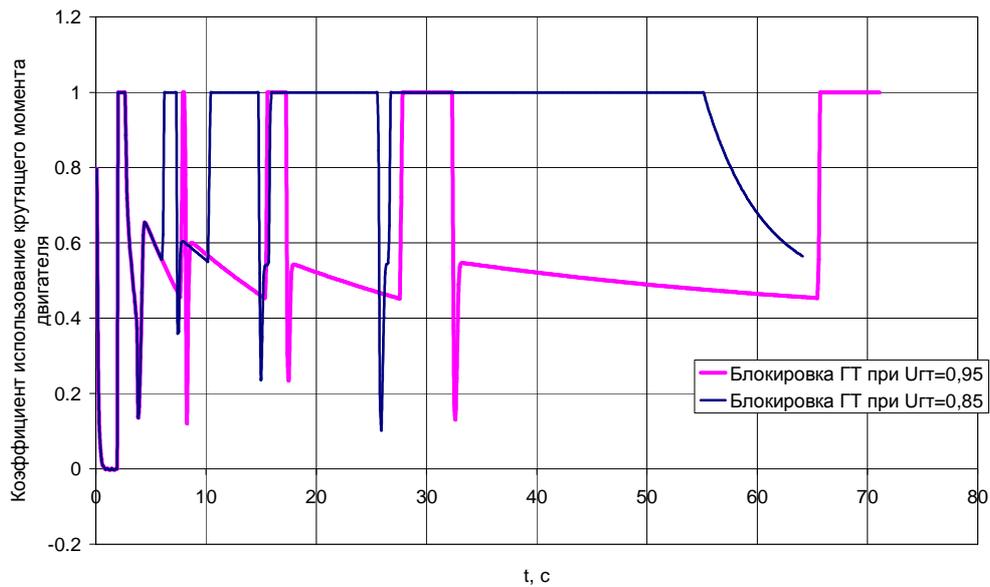


Рисунок 6 – Изменение коэффициента использования крутящего момента двигателя во время разгона БТР-4 на дистанции 1000 м с ранней и штатной блокировкой ГТ

Таким образом, наиболее экономичным вариантом управления является блокировка гидротрансформатора при приближении кинематического передаточного отношения к единице при условии ускоренного движения машины, что является необходимым для разгона. Обеспечить предельную динамичность разгона позволит блокировка ГТ при условии достаточности крутящего момента двигателя для разгона в данных дорожных условиях (рис. 7) или

$$K_M = K_{МДВ} \cdot K_{МГТ} \leq 1, \quad (3)$$

где  $K_{МДВ}$  – коэффициент использования крутящего момента двигателя;  $K_{МГТ}$  – коэффициент трансформации момента ГТ.

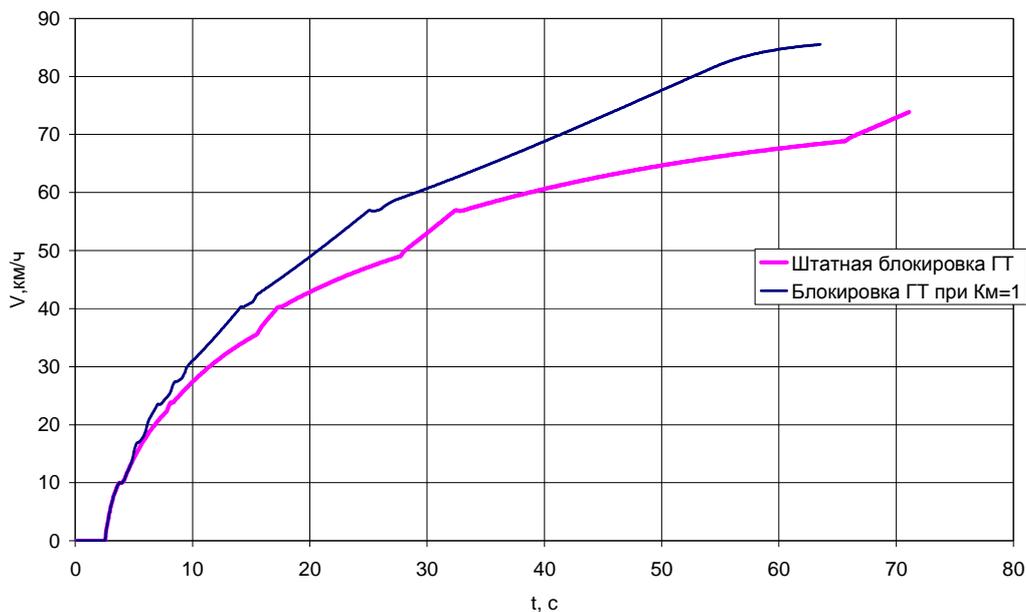


Рисунок 7 – Изменение скорости движения ВТР-4 при прохождении дистанции 1000 м со штатной и динамичной блокировкой ГТ

Данный метод блокировки ГТ обеспечит динамичный разгон ВТР-4 при любых положениях педали подачи топлива, а также не допустит останова двигателя под действием внешней нагрузки.

**Выводы.** Проведен комплекс численных экспериментов, благодаря чему определены направления развития алгоритмов системы автоматического управления трансмиссией ВТР-4. Обоснованы основные принципы управления элементами трансмиссии, применение которых обеспечит динамичность движения или топливную экономичность в зависимости от условий эксплуатации ВТР-4.

#### Литература

1. Автомобильный справочник BOSCH. Справ. Пособ. / Под общ. Ред. Robert Bosch GmbH. Второе издание переработанное и дополненное. Перевод с английского. – М.: За рулем, 2004. – 992 с.
2. Цыганков Э.С. Золотые правила безопасного вождения.– М.: Эксмо, 2007.– 48 с.

3. Толстолуцький В.О. Аналіз і параметричний синтез механічних трансмісій сучасних швидкохідних гусеничних машин: Дис. канд. техн. наук: 05.22.02. – Харків, 2007.– 134 с.

4. Харитонов С.А. Автоматические коробки передач. Инструкция по эксплуатации, диагностике и техобслуживанию./ Харитонов С.А., Сологуб С.А., Нагайцов М.В. – М.: "Легион-Автодата", 2000.– 78 с.

**Bibliography (transliterated)**

1. Avtomobil'nyj spravochnik BOSCH. Sprav. Posob. Pod obshh. Red. Robert Bosch GmbH. Vtoroe izdanie pererabotannoe i dopolnennoe. Perevod s anglijskogo. –М.: За rulem, 2004. – 992 p.

2. Cygankov Je.S. Zolotyje pravila bezopasnogo vozhdenija.– М.: Jeksmo, 2007.– 48 p.

3. Tolstoluc'kij V.O. Analiz i parametrichnij sintez mehanichnih transmisij su-chasnih shvidkohidnih gusenichnih mashin: Dis. kand. tehn. nauk: 05.22.02. – Harkiv, 2007.– 134 p.

4. Haritonov S.A. Avtomaticheskie korobki peredach. Instrukcija po jekspluata-cii, diagnostike i tehobsluzhivaniju. Haritonov S.A., Sologub S.A., Nagajcov M.V. – М.: "Legion-Avtodata", 2000.– 78 p.

УДК 621.85-52

Толстолуцький В.А.

**ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ДИНАМІЧНОГО ТА ЕКОНОМІЧНОГО  
КЕРУВАННЯ ТРАНСМІСІЄЮ БТР-4 С ДВИГУНОМ 3ТД-3А**

Проведено дослідження впливу моменту перемикання передач і блокування гідротрансформатора на динамічні характеристики розгону та паливну економічність БТР-4. Виявлені основні принципи підвищення ефективності керування трансмісією БТР-4 у різних умовах експлуатації.

Tolstolutskiy V.A.

**INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY FOR DYNAMICAL AND FUEL  
ECONOMICAL TRANSMISSION CONTROL OF BTR-4 WITH ENGINE 3TD-3A**

Investigation of the gearshift and hydro transformer blocking influence at dynamic characteristics of the speed increasing and fuel economy of the BTR-4 was studied. Cardinal principles were discovered for increase efficiency of transmission control system of BTR-4 for different condition of usage.

Рассоха А.Н., Черкашина А.Н., Храмова Т.И.

### ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ МЕЖФАЗНОГО СЛОЯ НА СВОЙСТВА ФУРАНО-ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ

Химическая природа и структура межфазного слоя (МФС) в полимерных композиционных материалах (ПКМ) оказывает существенное влияние на комплекс деформационно-прочностных, технологических и эксплуатационных свойств композитов, используемых в различных областях техники и народного хозяйства [1,2].

Представляло интерес исследовать влияние химической природы МФС в композиционном материале, отличного от полимерной матрицы, на свойства ПКМ, а также оценить структурно-геометрические параметры композита с учетом граничных областей полимерного связующего.

В качестве связующего ПКМ выбран фурано-эпоксидный полимер на основе реакционноспособного олигомера ФАЭД-50(20), отвержденного амина фенольным структурирующим агентом марки Агидол АФ-2 (режим обработки: 20 °С – 24 ч; 60 °С – 2 ч; 80 °С – 4 ч.). Наполнителем (НП) служил кварцевый песок (КП) фракции менее 0,63 мм. Модификаторами поверхности КП выбраны высокомолекулярные соединения из ряда полиацеталей: поливинилбутираль (ПВБ); поливинилбутиральфурфураль (ПВБФ); поливинилформаль (ПВФ); поливинилформальэтилаль (ПВФЭ); поливинилэтилаль (ПВЭ); поливинилкеталь (ПВК), нанесенные на поверхность частиц наполнителя в процессе совместного помола КП и полиацетала в шаровой мельнице в течение 3 ч при температуре 20 °С.

Деформационно-прочностные и сорбционные свойства фурано-эпоксидных ПКМ (разрушающее напряжение при изгибе  $\sigma_u$ , сжатии  $\sigma_c$ , ударная вязкость  $a$ , относительная деформация сжатия при разрушении  $\epsilon$ , угол прогиба  $\phi$ , водопоглощение за 24 ч, коэффициенты диффузии, сорбции, проницаемости) определяли по стандартным лабораторным методикам. Коэффициент однородности  $K_o$  оценивали по результатам статистического анализа испытаний образцов на изгиб (нормальный закон распределения).

На основании анализа литературных данных [2–7] и собственных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований при формировании МФС в фурано-эпоксидных композитах следует выделить следующие факторы, определяющие структуру связующего в граничных областях композиционной системы:

– геометрический (энтропийный), обуславливающий ограничение сегментальной и групповой подвижности цепей макромолекул связующего, что приводит к снижению плотности упаковки. В разной степени проявляется в широком температурном диапазоне;

– адсорбционный (энергетический), зависящий от химической природы наполнителя, в том числе его поверхности – поверхностной энергии, определяющей прочность адгезионного контакта между наполнителем и матрицей. Проявляется преимущественно до температуры стеклования; вследствие ориентации цепей макромолекул в МФС плотность связующего на границе раздела фаз несколько увеличивается;

– химический, оказывающий влияние на характер, скорость и направленность процессов структурирования фурано-эпоксидного реакционноспособного олигомера в тонких адсорбционных слоях, что приводит к изменению степени конверсии олигомера, вызывает снижение температуры стеклования и др. В значительной мере проявляется в области высоких степеней наполнения.

Сочетание данных факторов приводит к формированию МФС в фурано-эпоксидных композитах со значительной структурной градиентной неоднородностью (рис. 1).

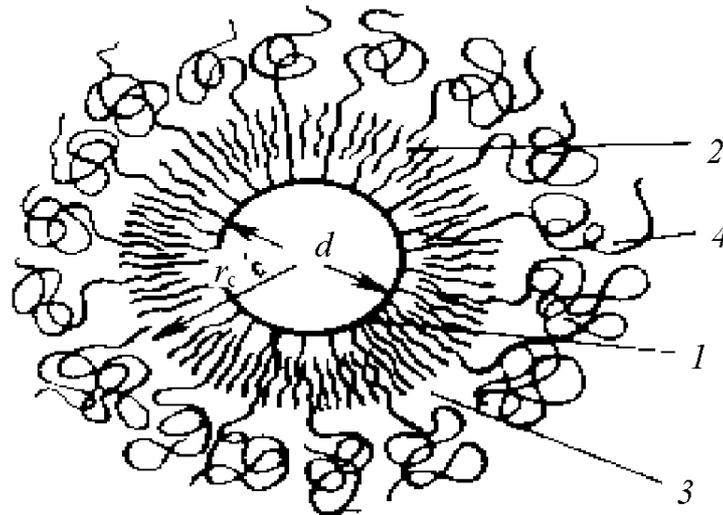


Рисунок 1 – Модель структуры граничного слоя фурано-эпоксидного полимера у поверхности частиц наполнителя в композиционном материале  
 1 – адсорбционный слой полимера; 2 – ориентированный слой матрицы;  
 3 – переходной (со структурными дефектами) слой полимера; 4 – связующее в объемной фазе;  
 $d$  – диаметр частицы наполнителя;  $r_c$  – радиус ближней корреляции

Граничный слой у поверхности частицы наполнителя в данной модели выступает в качестве элементарной квазичастицы новой фазы полимерного связующего – фэйзона полимерной матрицы, характеризующийся ориентационно-упорядоченной структурированностью и повышенной прочностью [2,7].

В табл. 1 представлены некоторые физико-механические свойства фурано-эпоксидных композитов, содержащих исходный и модифицированный полиацетальми наполнитель (КП).

Анализ полученных экспериментальных данных (табл.1) позволяет сделать вывод о существенном влиянии природы МФС слоя на комплекс деформационно-прочностных свойств фурано-эпоксидных композиционных материалов. При этом на 7–22 % увеличивается прочность при изгибе, 5–13 % разрушающее напряжение при сжатии, несколько повышается стойкость к воздействию ударных нагрузок, эластичность (угол прогиба) и материал становится структурно более однородным (увеличивается  $K_o$ ).

Обработка поверхности наполнителя полиацетальми приводит к повышению стойкости фурано-эпоксидных композитов к воздействию эксплуатационных сред, в частности влаги. При этом влагопоглощение за 24 ч. в среднем снижается на 12–25 %, а коэффициенты диффузии, сорбции и проницаемости – на 8–13 %.

Таблиця 1 – Деформаційно-прочностні властивості фурано-епоксидних композитів

Модифікатор	$\sigma_u$ , МПа	$\sigma_c$ , МПа	$a$ , кДж/м <sup>2</sup>	$\epsilon$ , %	$\phi$ , град	$K_o$
–	<u>80</u>	<u>105</u>	<u>3,5</u>	<u>0,55</u>	<u>10,5</u>	<u>0,69</u>
	89	112	2,1	0,33	8,5	0,52
ПВБ	<u>93</u>	<u>115</u>	<u>4,0</u>	<u>0,59</u>	<u>12,3</u>	<u>0,78</u>
	97	120	3,2	0,35	10,0	0,60
ПВБФ	<u>98</u>	<u>119</u>	<u>4,5</u>	<u>0,61</u>	<u>12,5</u>	<u>0,81</u>
	102	125	4,0	0,38	10,0	0,65
ПВФ	<u>88</u>	<u>110</u>	<u>4,0</u>	<u>0,59</u>	<u>11,5</u>	<u>0,76</u>
	95	117	3,5	0,35	9,5	0,62
ПВФЭ	<u>90</u>	<u>110</u>	<u>4,0</u>	<u>0,60</u>	<u>11,0</u>	<u>0,74</u>
	95	115	3,3	0,33	9,0	0,59
ПВЭ	<u>89</u>	<u>109</u>	<u>3,9</u>	<u>0,58</u>	<u>11,3</u>	<u>0,75</u>
	94	115	2,8	0,34	9,5	0,61
ПВК	<u>86</u>	<u>108</u>	<u>3,9</u>	<u>0,58</u>	<u>11,0</u>	<u>0,73</u>
	90	113	3,0	0,35	9,3	0,58

Примечание: содержание КП – числитель – 36 масс.%; знаменатель – 75 масс. %.

Хімічна природа модифікатора також впливає на аналізовані властивості композитів. Максимальний позитивний ефект досягається в разі використання ПВБФ і ПВБ.

В межах перколяційного підходу [2] при аналізі структури фурано-епоксидних композитів з моно- і полідисперсними наповнювачами (рис. 2) цілесообразно оцінити при відомому діаметрі  $d_o$  (фракція 1) структурно-геометричні параметри композиційної системи: середній діаметр сфер  $d_t$  з урахуванням феїзонних шарів (при протіканні по перекриваючимся сферам); середній оптимальний розмір феїзонного шару  $h_i$ , необхідний для утворення первинного кластера (табл. 2–3).

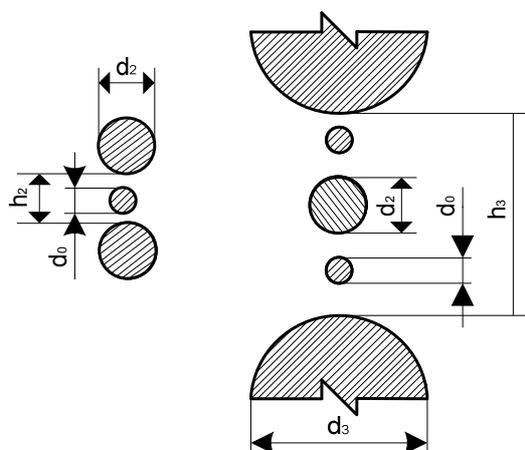


Рисунок 2 – Модель розташування частинок наповнювача з дискретною гранулометриєю в структурі фурано-епоксидних композитів ( $d_2$  – фракція 2,  $d_3$  – фракція 3)

Таблица 2 – Структурно-геометрические параметры композитов для монофракции наполнителя

Параметр	Значение параметра при диаметре частиц $d_o$ , мкм							
	1	10	20	50	100	200	500	1000
$d_t$ , мкм	1,28	12,8	25,6	64,0	128,0	256,0	640	2560
$h_i$ , мкм	0,14	1,4	2,8	7,0	14,0	28,0	70	140

Таблица 3 – Структурно-геометрические параметры композитов для трехфракционного НП

Параметр	Значение параметра для фракции		
	1	2	3
$d_i$ , мкм	<u>5</u>	<u>46</u>	<u>420</u>
	25	228	2006
$d_t$ , мкм	<u>6,4</u>	<u>58,9</u>	<u>537,6</u>
	32,0	291,8	2560
$h_i$ , мкм	<u>0,7</u>	<u>6,4</u>	<u>58,8</u>
	3,5	32,0	280,8

Как видно из представленных данных (табл. 2,3), структуру граничных слоев фурано-эпоксидного связующего в композите, а следовательно, и свойства системы в целом, можно целенаправленно регулировать, варьируя гранулометрический состав дисперсной фазы (кварцевого песка), создавая рациональную структуру композиционного материала с комплексом высоких функциональных свойств.

Таким образом, проведенные экспериментальные и расчетно-теоретические исследования структуры и свойств фурано-эпоксидных композитов с модифицированным полиацеталами кварцевым песком, позволяют при разработке композиционных систем получать материалы с заданным уровнем прочностных и эксплуатационных свойств.

#### Литература

1. Корнеев А.Д., Потапов Ю.Б., Соломатов В.И. Эпоксидные полимербетоны.– Липецк: ЛГТУ, 2001.– 181 с.
2. Соломатов В.И., Бобрышев А.Н., Химмлер К.Г. Полимерные композиционные материалы в строительстве / Под ред. В.И. Соломатова.– М.: Стройиздат, 1988.– 312 с.
3. Лукошюте И., Левинскас Р., Квикликс А. Образование переходного слоя на наполнителях полимерных композитов // Механика композитных материалов.– 2006.– Т. 42.– № 5.– С. 693–700.
4. Хозин В.Г., Иващенко Ю.Г., Соломатов В.И. Формирование и роль граничных слоев связующих в полимербетонах // Известия ВУЗов. Строительство.– 1995.– № 10.– С. 47–59.
5. Стухляк П.Д., Митник М.М., Орлов В.О. Вплив граничних прошарків на властивості композитних полімерних матеріалів (огляд) // Фізико-хімічна механіка матеріалів.– 2001.0 № 1.– С. 69–75.

6. Кулезнев В.Н., Мархасин И.Л., Кондрашов О.Ф. и др. Образование граничного слоя фурфуролацетонным мономером на твердой поверхности // Коллоидный журнал –1980.– Т. XLII.– № 1.– С. 49–53.

7. Хозин В.Г. Усиление эпоксидных полимеров.– Казань: Изд-во ПИК «Дом печати», 2004.– 446 с.

Bibliography (transliterated)

1. Korneev A.D., Potapov Ju.B., Solomatov V.I. Jepoksidnye polimerbetony.– Lipeck: LGTU, 2001.– 181 p.

2. Solomatov V.I., Bobryshev A.N., Himmler K.G. Polimernye kompozicion-nye materialy v stroitel'stve Pod red. V.I. Solomatoва.– М.: Strojizdat, 1988.– 312 p.

3. Lukoshjute I., Levinskas R., Kvikliks A. Obrazovanie perehodnogo sloja na napolniteljah polimernih kompozitov Mehanika kompozitnyh materialov.– 2006.– Т. 42.– # 5.– p. 693–700.

4. Hozin V.G., Ivashhenko Ju.G., Solomatov V.I. Formirovanie i rol' granich-nyh sloev svjazujushhih v polimerbetonah Izvestija VUZov. Stroitel'stvo.– 1995.– # 10.– p. 47–59.

5. Stuhljak P.D., Mitnik M.M., Orlov V.O. Vpliv granichnih prosharkiv na vlastivosti kompozitnih polimernih materialiv (ogljad) Fiziko-himichna mehanika materialiv.– 2001.0 # 1.– p. 69–75.

6. Kuleznev V.N., Marhasin I.L., Kondrashov O.F. i dr. Obrazovanie granichno-go sloja furfurolacetonovym monomerom na tverdoj poverhnosti Kolloidnyj zhurnal –1980.– Т. XLII.– # 1.– p. 49–53.

7. Hozin V.G. Usilenie jepoksidnyh polimerov.– Kazan': Izd-vo PIK «Dom pe-chati», 2004.– 446 p.

УДК 678.5

Рассоха О.М., Черкашина Г.М., Храмова Т.И.

**ВПЛИВ ПРИРОДИ МЕЖФАЗНОГО ШАРУ НА ВЛАСТИВОСТІ ФУРАНО-ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ**

У роботі проведені експериментальні й розрахунково-теоретичні дослідження структури й властивостей фурано-епоксидних композитів з модифікованим поліацеталами кварцовим піском. Результати досліджень дозволяють при розробці композиційних систем одержувати матеріали із заданим рівнем прочностних та експлуатаційних властивостей.

Rassokha A.N., Cherkashyna A.N., Chramova T.I.

**EFFECT OF THE INTERFACIAL LAYER NATURE ON THE FURAN-EPOXY  
COMPOSITE PROPERTIES**

Effect of the interfacial layer nature on structure and strength properties of the furan-epoxy composites is investigated.

УДК 66.01

Хавина Д.Г.

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВНЕДРЕНИЯ НОВОГО ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

подавляющее большинство технологических процессов в химической, пищевой и других отраслях промышленности включают в себя использование теплообменных аппаратов различных типов. Большинство производств в Украине реализуют типовые технологические процессы, разработанные 30–50 лет назад. Необходимость модернизации производств назрела уже давно и в настоящее время такие мероприятия проводятся. Интенсивность технического перевооружения ограничена финансовыми возможностями предприятий всех видов собственности.

В качестве основного типа теплообменного аппарата в технологических процессах используются кожухотрубчатые теплообменники. Бурное развитие производства более эффективных пластинчатых аппаратов сделало возможным произвести замену устаревшего кожухотрубчатого оборудования на пластинчатое. Однако такая замена по старым стандартам не всегда приводит к положительному эффекту в силу некоторых принципиальных конструктивных различий теплообменных аппаратов. С другой стороны замена оборудования требует значительных финансовых средств, которые должны принести экономический эффект от их внедрения как можно быстрее и в как можно большем объеме.

Таким образом, задача модернизации производства с заменой теплообменного оборудования требует с одной стороны создания достоверных методик чисто технического подбора теплообменников, а с другой стороны экономического обоснования предложенного выбора с учетом возможных источников финансирования процесса модернизации. Фактически необходима разработка модели расчета теплообменника связывающая математические параметры проектирования аппарата с экономическими факторами, определяющими эффективность проведения модернизации. Такая модель должна формулировать задачу технико-экономической оптимизации, решение которой позволит найти не только оптимальную конструкцию теплообменного аппарата, но и обеспечит минимальные финансовые затраты.

Решение такой задачи является актуальным и помимо своей ярко выраженной практической ценности носит также экологический аспект в том смысле, что качественно проведенная замена теплообменного оборудования позволит экономить топливно-энергетические ресурсы и снизить выброс углекислого газа и, таким образом, частично решить экологические проблемы.

Для технико-экономической оптимизации отдельного теплообменного аппарата наиболее часто используют целевую функцию приведенных затрат  $C_{mc}$  [1–3] вида

$$C_{mc} = C_m + C_{tr} + C_{use} + E \cdot C_{he}, \quad (1)$$

где  $C_m$  – затраты материалов;  $C_{tr}$  – затраты энергии на транспортировку теплоносителей через теплообменный аппарат;  $C_{use}$  – затраты на содержание и эксплуатацию теплообменника;  $C_{he}$  – капитальные вложения в аппарат и относящиеся к нему коммуникации;  $E$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, кото-

рий обычно трактуется как величина обратная нормативному сроку окупаемости внедряемого оборудования.

Естественно для экономической оптимизации имеет смысл предварительно оценить потенциал различных видов теплопередачи, после чего определиться с выбором экономического критерия и входящих в его состав величин. Это во многом может облегчить подготовку исходной экономической информации, которая не только определяет конечный результат оптимизации, но и зачастую и основную трудоемкость процесса.

Затраты (стоимость) на материалы при работе любого теплообменного аппарата состоят из: стоимости теплоносителей  $C_{hc}$ , греющего –  $C_h$  и нагреваемого –  $C_c$ , которые в условиях промышленного производства обычно относят к общезаводским затратам. Стоимость транспортировки (прокачивания) теплоносителей  $C_{tr}$ , как правило, не включает в себя стоимость насосного оборудования, которое уже установлено, а состоит из стоимости электроэнергии затраченной на прокачивание теплоносителей через аппарат [3]. Затраты на обслуживание теплообменного аппарата, включая чистку и мойку –  $C_{cl}$  и прочие расходы. Эти величины обычно представляются в виде [2]

$$C_{hc} = C_h + C_c, \text{ где } C_h = c_h \cdot G_h, C_c = c_c \cdot G_c; \quad (2)$$

$$C_{tr} = E_h \cdot c_{hp} + E_c \cdot c_{cp}; \quad (3)$$

$$C_{cl} = K_{cl} \cdot C_{he}, \quad (4)$$

где  $c_h, c_c$  – стоимость единицы измерения греющего и нагреваемого теплоносителя соответственно;  $c_{hp}, c_{cp}$  – стоимость 1 кВт мощности насоса с учетом требуемых капиталовложений для перекачивания греющего и нагреваемого теплоносителя;  $E_h, E_c$  – расход электроэнергии на прокачивание через теплообменник греющего и нагреваемого теплоносителя;  $K_{cl}$  – коэффициент, учитывающий стоимость обслуживания (очистки, промывки и т.п.) в процентах от стоимости аппарата [3].

Расход электроэнергии на прохождение теплоносителей через теплообменник может быть рассчитан по формуле

$$E_h = \frac{\Delta p_h \cdot G_h}{\eta_h} \text{ и } E_c = \frac{\Delta p_c \cdot G_c}{\eta_c}, \quad (5)$$

где  $\Delta p_h, \Delta p_c$  – потери давления;  $\eta_h, \eta_c$  – коэффициент полезного действия насосов, соответственно по стороне греющего и нагреваемого теплоносителей.

Затраты на содержание и эксплуатацию оборудования  $C_{use}$  обычно представляются в виде [3]

$$C_{use} = C_{ex} + A_m, \quad (6)$$

где  $C_{ex}$  – собственно затраты на эксплуатацию теплообменника;  $A_m$  – норма амортизационных отчислений на теплообменник, перекачивание теплоносителей и т.п. Затраты на содержание и эксплуатацию оборудования являются функцией стоимости теплообменника, включая его монтаж, обвязку и трубопроводы, т.е.  $C_{use} = f(C_{he})$ . Если учитывать только амортизационную составляющую и принять нормативный коэффициент амортизационных отчислений равным 0,15, то  $C_{use} \approx 0,15 \cdot C_{he}$ .

В такой постановке приведенные затраты как критерий оптимизации можно записать в виде уравнения

$$C_{mc} = C_{tr} + C_{hc} + C_{cl} + C_{use} + (A_m + E) \cdot C_{he}, \quad (7)$$

где приближенно можно принять  $A_m \approx 0,15$ ,  $E \approx 0,025$ .

Таким образом, решение задачи оптимального проектирования пластинчатого теплообменника свелась к минимизации целевой функции (7), состоящей из эксплуатационных затрат, определяемых удачным выбором конструкции аппарата и прямых капитальных затрат на сам теплообменник. Фактически для замены старого кожухотрубного аппарата необходимо приобрести новый пластинчатый.

Наиболее простая и ясная ситуация имеет место, когда аппарат приобретается одновременно за полную его стоимость в такой комплектации, которая необходима для нужд предприятия. Частным случаем является ситуация, когда приобретаемый аппарат на первых порах не обеспечивает максимальный экономический эффект от его покупки, но оптимизирует затраты на первых этапах эксплуатации и в последующем будет усовершенствован для увеличения эффективности использования. Например, устанавливается пластинчатый теплообменник с пакетом пластин на определенную мощность с минимальной стоимостью, который в дальнейшем с увеличением мощности будет наращиваться путем добавления пластин.

В настоящее время большинство промышленных предприятий работают в условиях жесткой финансовой экономии, и одновременное приобретение оборудования является серьезной финансовой проблемой. В этом случае предприятие может пойти на привлечение заемных средств, например покупку оборудования в лизинг.

Лизинг – это вид финансовых услуг, связанных с формой приобретения основных фондов. Другими словами это долгосрочная аренда имущества для целей производства с последующим правом выкупа, обладающая некоторыми налоговыми преференциями. Лизингодатель обязуется приобрести в собственность указанное лизингополучателем имущество у указанного продавца и предоставить лизингополучателю это имущество за плату во временное владение и пользование. Более того, договор может предусматривать, что выбор продавца и приобретаемого имущества делает лизингодатель. Лизингодатель может изначально являться собственником имущества (совмещать в своем лице продавца). В зависимости от срока полезного использования объекта лизинга и экономической сущности договора лизинга различают финансовый и операционный лизинг.

Суть финансового лизинга (финансовой аренды) состоит в том, что срок договора лизинга сравним со сроком полезного использования объекта лизинга. Как правило, по окончании договора лизинга остаточная стоимость объекта лизинга близка к нулю и объект лизинга может без дополнительной оплаты перейти в собственность лизингополучателя. Иногда сам договор предполагает переход собственности в связи с полной оплатой первоначальной стоимости. По своей сути, это способ привлечения лизинго-

получателем целевого финансирования, которое применительно к пластинчатому теплообменному аппарату выглядит примерно так. В лизинг приобретается заранее рассчитанный пластинчатый теплообменник срок эксплуатации, которого составляет не менее 10–15 лет (в процессе эксплуатации могут быть заменены прокладки на пластинах, средний срок эксплуатации которых составляет 5 лет с учетом плановой разборки и сборки аппарата на чистку). В этом случае проектирование или расчет теплообменника на заданную технологическую позицию должен включать в себя помимо чисто технического расчета учет срока лизинга, замену прокладок (неоднократную), возможный ремонт входных коллекторов [4] и т.п. Это определяется спецификой позиции в технологическом процессе, на которую устанавливается теплообменный аппарат, а именно: свойствами теплоносителя, скоростями движения, давлением и температурой. Иными словами, расчет теплообменника должен включать в себя срок лизинга и возможность дальнейшего использования теплообменника как объекта лизинга.

Применительно к пластинчатым теплообменникам, у которых основная конструкция (рама) состоит из неподвижной и подвижной плит, несущей и направляющей балок и стяжных болтов, практически не изнашиваются. На пластинах к концу срока эксплуатации может появиться неустранимый налет различных соединений, который ухудшает теплопередачу [4]. Такой неустранимый слой может быть с одной или двух сторон пластины в зависимости от свойств теплоносителей. В худшем случае пакет может быть заменен или произведена замена отдельных пластин.

Операционный (оперативный) лизинг состоит в том, что договор лизинга существенно меньше срока полезного использования объекта. Обычно предметом лизинга являются уже имеющиеся в распоряжении лизингодателя активы (может не быть третьей стороны – продавца). По окончании договора объект лизинга либо возвращается лизингодателю и может быть передан в лизинг повторно, либо выкупается лизингополучателем по остаточной стоимости. Лизинговая ставка обычно выше, чем по финансовому лизингу. Естественно, что и выбор теплообменника должен быть сориентирован на такие условия, например на срок до замены прокладок в теплообменнике или на календарное время эксплуатации. Все эти факторы должны быть включены расчетную модель (1) как в эксплуатационные, так и в капитальные затраты.

Особым случаем является обратный лизинг, при котором продавец лизингового имущества одновременно является лизингополучателем. Фактически, это форма получения кредита под залог производственных фондов и получения дополнительного экономического эффекта от различий в налогообложении. Обратным лизингом может являться банковский кредит под залог основных фондов, когда право собственности переходит в банк, а предприятие арендует оборудование, так как оно уже не числится на балансе в прежнем виде. Основным арендным платежом по лизингу будет являться возврат стоимости объекта в сумме с процентами за пользование (устанавливается лизингодателем).

В Украине существует две основные схемы начисления лизинговых платежей: классическая или дифференцированная (начисления процентов на остаток с выплатой основной стоимости равными долями) и аннуитет, когда сумма процентов равномерно распределяется на весь срок договора, и сумма платежа неизменна.

Рассмотрим случай, когда предметом интереса является финансовый лизинг, по которому теплообменный аппарат перейдет в собственность после осуществления последнего платежа. Будем считать, что процентная ставка по договору фиксирована. Начисления процентов осуществляется в соответствии с аннуитетом (в литературе еще встречается термин финансовая рента), характеризующимся одинаковым уровнем про-

центных ставок на протяжении всего периода. Основным преимуществом аннуитета является то, что платеж зафиксирован. Начиная с первого платежа предприятие не несет такой финансовой нагрузки как при начислении процентов на остаток, легче спрогнозировать уровень затрат (финансовых) на весь срок лизинга. Главным недостатком для предприятия является большая переплата по сравнению с классической схемой. Сумма уплаченных за аппарат средств значительно превышает первоначальную стоимость объекта лизинга.

Нормированное помесечное осуществление платежа осуществляется по следующему соотношению

$$R = P \cdot \frac{i/12}{1 - (1 + i/12)^{-12 \cdot N}}, \quad (8)$$

где  $R$  – сумма ежемесячного платежа на протяжении всего срока действия договора;  $P$  – сумма кредита (стоимость аппарата за вычетом первоначального взноса, если он предусмотрен договором);  $i$  – процентная ставка по договору;  $N$  – количество лет кредитования, т.е. действия договора лизинга.

При выборе оборудования в лизинг очень часто уровень инфляции побуждает к расчетам по такой схеме погашения задолженности в надежде на обесценивание валюты заемных средств и облегчения кредитного давления с первого дня выплат до последнего. Практика показывает, что лизингодатели и их партнеры (разного рода финансовые организации, обеспечивающие осуществления договора лизинга) предпочитают работу по классической схеме для более быстрого восполнения вложенных ресурсов.

Дифференцированная схема формализовано выглядит так (нормирование в расчете на ежемесячное погашение)

$$S = P / (N \cdot n), \quad R_k = [P - S \cdot (k - 1)] \cdot i \cdot m / t + S, \quad k = 1..(N \cdot 12),$$

где  $k$  – номер платежа;  $S$  – тело кредита, т.е. часть стоимости объекта лизинга, постоянная на протяжении действия договора;  $P$  – сумма кредита (стоимость аппарата за вычетом первоначального взноса, если он предусмотрен договором);  $N$  – количество лет кредитования по договору;  $n$  – количество месяцев в году;  $m$  – количество дней в месяце начисления процентов на остаток;  $t$  – количество дней в году начисления (для валютного обязательства всегда 360).

Используя классическую схему, предприятие основное процентное бремя возлагает на первые годы оплаты. Главным преимуществом является то, что если в аннуитетной схеме сверх обязательной вы можете доплачивать лишь сумму, равную основному размеру платежа (или нескольким), то в дифференцированной схеме после уплаты процентов можно вносить любую сумму превышающую основной платеж. Такое частичное досрочное погашение уменьшает размер уплачиваемых процентов в следующих периодах. Классическая схема всегда предполагает меньшую переплату по процентам, чем аннуитет, и заинтересованность в скорейшем погашении.

Лизингополучатель, он же заемщик, в данном случае предприятие, само определяет, исходя из своих финансовых показателей, какую схему выбрать. Существенным фактором являются договоренности с лизингодателем (будем считать, что он же и кредитор). В стандартных схемах применяются механизмы отсрочек, реструктуризации,

продлення строків, об'легчення кредитного бремени в зв'язі з змінившимися умовами. Крім того, лізингодатель в більшості випадків зобов'язаний страхувати об'єкт лізингу за рахунок лізингополучателя. Необхідність страхування пропадає тільки в разі кредитування без застави на дуже короткий термін, наприклад, за програмою модернізації виробництва за овердрафтними схемами.

Головним перевагою лізингу є прискорена амортизація та пільги в оподаткуванні. В угодах за лізингом може бути передбачено технічне обслуговування постачаної техніки, навчання персоналу тощо. Зазвичай встановлюється базисний період, протягом якого сторони не мають права розірвати угоду лізингу.

Таким чином, здійснено спробу сформулювати задачу оптимізації вибору пластинчатого теплообмінного апарату за критерієм приведених витрат з урахуванням придбання обладнання за лізингом. Розглянуто різні варіанти лізингу, які повинні бути включені в задачу техніко-економічної оптимізації теплообмінника.

#### Литература

1. Каневец Г.Е. Теплообменники и теплообменные системы.- Киев: Наук. думка, 1981.– 272 с.
2. Кафаров В.В., Перов В.Л., Мешалкин В.П. Принципы математического моделирования химико-технологических систем.- М.: Химия, 1974.– 210 с.
3. Арсеньева О.П., Демирский А.В., Хавин Г.Л. Оптимизация пластинчатого теплообменника // Пробл. машиностроения, 2011.– т.13, №1.
4. Пластинчатые теплообменники в теплоснабжении /Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Г.Л. Хавин, О.П. Арсеньева. – Харьков: НТУ „ХПИ”, 2007.– 448 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Kanevec G.E. Teploobmenniki i teploobmennye sistemy.- Kiev: Nauk. dumka, 1981.– 272 p.
2. Kafarov V.V., Perov V.L., Meshalkin V.P. Principy matematicheskogo modelirovaniya himiko-tehnologicheskikh sistem.- M.: Himija, 1974.– 210 p.
3. Arsen'eva O.P., Demirskij A.V., Havin G.L. Optimizacija plastinchatogo teploobmennika /Probl. mashinostroenija, 2011.– t.13, #1.
4. Platinchatye teploobmenniki v teplosnabzhenii L.L. Tovazhnjanskij, P.A. Kapustenko, G.L. Havin, O.P. Arsen'eva. – Har'kov: NTU „HPI”, 2007.– 448 p.

УДК 66.01

Хавіна Д.Г.

#### **ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ НОВОГО ТЕПЛОБІМНОГО ОБЛАДНАННЯ**

Зроблено спробу сформулювати задачу вибору пластинчатого теплообмінного апарату згідно з критерієм приведених витрат з урахуванням придбання обладнання за лізингом. Розглянуто різні варіанти лізингу, які повинні бути включені у задачу техніко-економічної оптимізації теплообмінника.

Khavina D.G.

**THE TECHNICAL-ECONOMIC ASPECTS OF NEW HEAT EXCHANGERS  
INTRODUCTION**

The new formulation for problem of plate heat exchangers design is presented. The criterion of reduced costs with taking into account leasing equipment is considered. The different variants of leasing made out. They must be insert in technical-economic problem of plate heat exchanger optimization.

УДК 629.73.017.2

Ковтонюк И.Б., Анипко О.Б., Иленко Е.Ю., Ковтонюк Я.И.

**СТАТИЧЕСКИЙ ПОКАЗАТЕЛЬ РАЦИОНАЛЬНОСТИ  
АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ КОМПОНОВКИ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ  
ИСТРЕБИТЕЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПРИНИМАЕМЫХ  
КОНСТРУКТИВНО-КОМПОНОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ  
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОПЕРЕЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

В современных военных конфликтах важную роль играет истребительная авиация. Боевые возможности современных истребителей определяются их летно-техническими характеристиками, вооружением, возможностями бортового радиоэлектронного оборудования по управлению оружием, информационному обеспечению экипажа и защите самолета [1]. Решение задач по отражению ударов авиации противника и завоевания господства в воздухе требует максимального использования маневренных возможностей истребителя, которые непрерывно совершенствуются для успешного ведения борьбы с новыми средствами воздушного нападения.

Характеристики маневренности истребителей тесно взаимосвязаны с характеристиками устойчивости и управляемости. Для современных истребителей величина допустимой нормальной перегрузки и допустимого угла атаки ограничена возможностью поперечного управления. Элероны и флапероны на больших углах атаки попадают в отрывные зоны на крыле и теряют свою аэродинамическую эффективность. Таким образом, обязательным этапом усовершенствования истребителей является формирование требований к характеристикам их устойчивости и управляемости.

Авторами разработаны основы методического подхода к решению задачи формирования требований к характеристикам устойчивости и управляемости перспективных и модернизируемых истребителей [2,3]. На первом этапе этот методический подход предполагает анализ истребителя как сложной технической системы, разработку иерархического набора параметров, характеристик и комплексных показателей, которые характеризуют свойства планера истребителя, связанные с его устойчивостью и управляемостью. Синтез бортовой системы автоматического управления на основе известных характеристик устойчивости и управляемости планера истребителя является отлаженной процедурой и в предлагаемом методическом подходе не рассматривается [4].

В работе [5] разработан и предложен статический показатель рациональности аэродинамической компоновки органов поперечного управления самолета, который на этапе предэскизных концептуальных проработок позволяет из альтернативных вариантов выбрать рациональный, обеспечивающий требуемую аэродинамическую эффективность руля управления по крену.

Цель данной работы состоит в определении и анализе значений статического показателя рациональности аэродинамической компоновки органов поперечного управления для различных типов истребителей.

Был рассмотрен ряд реализованных проектов современных истребителей разных аэродинамических схем, которые находятся на вооружении военно-воздушных сил различных стран мира [6,7]. Для каждого из рассмотренных самолетов определялись характеристики, входящие в выражение для статического показателя рациональности аэ-

родинамической компоновки органов поперечного управления  $U$  и значения самого показателя:

$$U = \frac{S_p}{S_{кр}} \frac{L_p}{L} \frac{G}{S_{кр}\eta}, \quad (1)$$

где  $S_{кр}$  – площадь крыла;  $S_p$  – площадь руля поперечного управления ЛА;  $L$  – размах крыла;  $L_p$  – расстояние вдоль размаха крыла от середины средней аэродинамической хорды (САХ) руля до продольной оси самолета;  $G$  – вес самолета;  $\eta$  – сужение крыла.

Полученные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения параметров и статического показателя рациональности аэродинамической компоновки органов поперечного управления для различных типов истребителей

№ п/п	Параметр	Су-27	F-16	МиГ-29	F-15	EF-2000	JAS-39A Gripen	Cheng du J-10A
1.	Максимальная взлетная масса, кг	28000	16060	18480	30850	23500	12974	18000
2.	Площадь крыла $S_{кр}$ , м <sup>2</sup>	62,37	27,87	38,036	56,49	50	28	34,6
3.	Размах крыла $L$ , м	14,7	9,45	11,36	13,05	10,95	8,4	9,36
4.	Сужение крыла $\eta$	3,442	4,39	4,154	4,5	6	5,93	10,2
5.	Максимальная эксплуатационная перегрузка	9	9	9	7,3	9	9	
6.	Удельная нагрузка на крыло, Н/м <sup>2</sup>	4403,7	5653,0	4762,8	5357,2	4610,7	4545,6	5103,5
7.	Тяговооруженность	1,05	1,045	1,089	1,132	0,982	0,859	
8.	Расстояние вдоль размаха крыла от САХ руля до продольной оси самолета $L_p$ , м	3,769	2,28	4,53	4,69	4,36	3,34	3,769
9.	Статический показатель рациональности аэродинамической компоновки органов поперечного управления $U$ , Н/м <sup>2</sup>	119,19	164,91	97,12	91,23	77,99	66,51	67,39

Анализ данных таблицы 1 показывает, что значение показателя  $U$  для групп истребителей различных аэродинамических схем находится во вполне определенном ограниченном диапазоне значений. Кроме того, оно отличается для истребителей, ис-

пользующих различные органы поперечного управления. Исходя из значения показателя  $U$ , можно выделить три основные группы истребителей (см. табл. 2).

Первую группу составляют истребители, выполненные по нормальной схеме и использующие для поперечного управления рули, совмещенные с закрылками – флапероны. В эту группу входят истребители Су-27 и F-16. Показатель  $U$  для этой группы находится в пределах  $U = 120...170 \text{ Н/м}^2$ .

Вторая группа – это истребители, выполненные по нормальной аэродинамической схеме и использующие для управления по крену элероны. К этой группе относятся МиГ-29 и F-15. Величина показателя  $U$  для этой группы составляет  $90...100 \text{ Н/м}^2$ .

К третьей группе относятся истребители, выполненные по схеме “утка” и имеющие переднее горизонтальное оперение: EF-2000, JAS-39A Gripen и Chengdu J-10A. Для этой группы величина  $U$  заключена в диапазоне  $U = 60...80 \text{ Н/м}^2$ .

Таблица 2 – Аэродинамические схемы и органы поперечного управления истребителей

№ п/п	Самолет	Аэродинамическая схема	Орган поперечного управления	Номер группы
1.	Су-27	нормальная	флаперон	I
2.	F-16	нормальная	флаперон	I
3.	МиГ-29	нормальная	элерон	II
4.	F-15	нормальная	элерон	II
5.	EF-2000	утка	элерон	III
6.	JAS-39A Gripen	утка	элерон	III
7.	Chengdu J-10A	утка	элерон	III

Таким образом, показатель  $U$  чувствителен к особенностям аэродинамической компоновки истребителя и его органов поперечного управления и может быть использован для оценки аэродинамических компоновок при проведении многовариантных проработок разрабатываемых и модернизируемых истребителей.

Выявленные диапазоны и соответствующие им конструктивно-компоновочные решения позволяют решать и обратную задачу, когда задана аэродинамическая схема истребителя, его взлетная масса, площадь крыла, а требуется определить рациональные значения  $S_p$  и  $L_p$ .

Решение этой задачи необходимо на этапе параметрического согласования технического проекта при анализе конструктивно-компоновочных схем истребителей и определения основных проектных параметров планера и органов поперечного управления.

#### Литература

1. Баханов Л.Е., Давыдов А.Н., Корниенко В.Н., Слатин В.В., Федосеев Е.П., Федосов Е.А., Федунюв Б.Е., Широков Л.Е. Системы управления вооружением истребителей: Основы интеллекта многофункционального самолета. Под ред. Е.А. Федосова. – М.: Машиностроение – 2005. – 400 с.
2. Анипко О.Б., Борисюк М.Д., Бусяк Ю.М. Концептуальное проектирование объектов бронетанковой техники. – Харьков: НТУ «ХПИ» – 2008. – 196 с.

3. Ковтонюк І.Б., Аніпко О.Б. Обоснование требований к характеристикам маневренности, устойчивости и управляемости истребителей при перехвате малоскоростных целей // Интегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ» – 2010. – №3. – с. 36–43.

4. Красовский А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. – М.: Наука. – 1973. – 560 с.

5. Ковтонюк І.Б. Статический показатель рациональности аэродинамической компоновки органов поперечного управления самолета // Интегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ» – 2011. – №1. – с. 32–34.

6. Уголок неба: Авиационная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.airwar.ru/](http://www.airwar.ru/)

7. The ultimate F-16 reference [Электронный ресурс].– Режим доступа: [www.f-16.net/](http://www.f-16.net/)

#### Bibliography (transliterated)

1. Bahanov L.E., Davydov A.N., Kornienko V.N., Slatin V.V., Fedoseev E.P., Fedosov E.A., Fedunov B.E., Shirokov L.E. Sistemy upravlenija vooruzheniem istre-bitelej: Osnovy intellekta mnogofunkcional'nogo samoleta. Pod red. E.A. Fedosova. – М.: Mashinostroenie – 2005. – 400 p.

2. Anipko O.B., Borisjuk M.D., Busjak Ju.M. Konceptual'noe proektirovanie ob"ektov bronetankovoj tehniki. – Har'kov: NTU «HPI» – 2008. – 196 p.

3. Kovtonjuk I.B., Anipko O.B. Obosnovanie trebovanij k harakteristikam manevrennosti, ustojchivosti i upravljaemosti istrebitelej pri perehvate maloskorost-nyh celej Integrovani tehnologii ta energozberezhennja. Shhokvartal'nij naukovopraktichnij zhurnal. – Har'kov: NTU «HPI» – 2010. – #3. – p. 36–43.

4. Krasovskij A.A. Sistemy avtomaticheskogo upravlenija poletom i ih analiticheskoe konstruirovanie. – М.: Nauka. – 1973. – 560 p.

5. Kovtonjuk I.B. Sticheskiy pokazatel' racional'nosti ajerodinamicheskoy komponovki organov poperechnogo upravlenija samoleta Integrovani tehnologii ta energozberezhennja. Shhokvartal'nij naukovopraktichnij zhurnal. – Har'kov: NTU «HPI» – 2011. – #1. – p. 32–34.

6. Ugolok neba: Aviacionnaja jenciklopedija [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [www.airwar.ru](http://www.airwar.ru)

7. The ultimate F-16 reference [Jelektronnyj resurs].– Rezhim dostupa: [www.f-16.net](http://www.f-16.net)

УДК 629.73.017.2

Ковтонюк І.Б., Аніпко О.Б., Іленко Є.Ю., Ковтонюк Я.І.

### **СТАТИЧНИЙ ПОКАЗНИК РАЦІОНАЛЬНОСТІ АЕРОДИНАМІЧНОГО КОМПОНУВАННЯ ОРГАНІВ УПРАВЛІННЯ ВИНИЩУВАЧА ДЛЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНО-КОМПОНУВАЛЬНИХ РІШЕНЬ, ЯКІ ПРИЙМАЮТЬСЯ, НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОПЕРЕЧНОГО КЕРУВАННЯ**

Наведений аналіз статичного показника раціональності аеродинамічного компонування органів поперечного управління для різних типів винищувачів.

Показник може бути використаний для оцінки аеродинамічних компонок при розробці винищувачів.

Kovtonyuk I.B., Anipko O.B., Ilenko Ye.Yu., Kovtonyuk Y.I.

**STATIC INDEX OF RATIONALITY OF AERODYNAMIC ARRANGEMENT OF CONTROLS OF FIGHTER FOR ESTIMATION OF INFLUENCE OF STRUCTURALLY LAYOUT DECISIONS WHICH ARE ACCEPTED, ON EFFICIENCY OF LATERAL CONTROL**

The brought analysis over of static index of rationality of aerodynamic arrangement of organs of lateral control for the different types of fighters.

An index can be used for the estimation of aerodynamic arrangements of fighters, which are developed.

«ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Ежеквартальный научно-практический журнал

Редколлегией к опубликованию принимаются статьи по следующим научным направлениям:

- ✓ энергетика и энергосбережение; энерготехнология энергоемких отраслей промышленности; нетрадиционная энергетика; ресурсосбережение; энергетика и окружающая среда;
- ✓ теплоиспользующие установки; моделирование процессов промышленного оборудования; процессы и аппараты различных отраслей промышленности (химической, пищевой, мед. оборудования и проч.);
- ✓ применение ЭВМ в технологических процессах; автоматизированные системы управления и обработки информации;
- ✓ тепло- и массообменные процессы и оборудование специальной техники; тепловые процессы и криогенное оборудование медицинского назначения;
- ✓ электроэнергетика; оборудование электростанций и передача электроэнергии;
- ✓ экономические аспекты энергетики и промышленной экологии; коммерческий инжиниринг, реинжиниринг и технологический менеджмент,

а также другим направлениям, на стыке различных отраслей знаний.

Материалы к опубликованию в каждый последующий номер принимаются до 20 числа последнего месяца предыдущего квартала. Рукописи авторам не возвращаются.

Материал должен быть подготовлен на IBM-совместимом компьютере и распечатан в 2-х экземплярах. К материалам должен прилагаться диск CD-R или CD-RW со статьей, набранной в редакторе текстов MS Word for Windows версий 97, XP, 2000 или 2003.

К статье необходимо приложить экспертное заключение о возможности опубликования материалов в открытой печати и рецензию доктора наук по профилю подаваемой статьи.

**ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ:**

Размер бумаги А4 (210x297 мм); левое и правое поля – 25 мм, верхнее и нижнее – 30 мм; рекомендуемый шрифт Times New Roman Суг; размер шрифта – 12; межстрочный интервал – 1.

**ПОРЯДОК РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА:**

- непосредственно под верхней границей слева БОЛЬШИМИ БУКВАМИ печатается УДК статьи;
- пропустив одну строку, по центру печатаются инициалы и фамилии авторов;
- пропустив одну строку, по центру полужирным шрифтом БОЛЬШИМИ БУКВАМИ печатается название статьи;
- пропускается одна строка и с абзаца (1,25 см) печатается основной текст, отформатированный по ширине страницы;
- перед и после формул и уравнений должно быть расстояние в одну пустую строку до текста с интервалом 1;
- формулы и уравнения должны быть выровнены по центру;
- номера формул и уравнений выровнены по правому краю;
- размер шрифта формул и уравнений для основного текста – 12 пт.;
- рисунки, схемы и графики должны быть выполнены в черно-белом изображении;
- пропустив одну строку, следует список литературы, оформленный в соответствие с требованиями ДСТУ;
- в конце статьи на украинском (русском – для статьи на украинском языке), русском и английском языках должны быть напечатаны УДК, авторы, название и аннотация.

**РЕДКОЛЛЕГИИ**

Украина, 61002,  
Харьков-2, ул. Фрунзе, 21,  
НТУ «ХПИ», редколлегия журнала  
«Интегрированные технологии и энергосбережение»,  
секретарю редколлегии Горбунову К.А.  
Тел. (057) 707-69-58.  
(057) 707-61-99  
Email: [sita\\_gor@mail.ru](mailto:sita_gor@mail.ru)

**СТАТЬИ, ОФОРМЛЕННЫЕ НЕ В СООТВЕТСТВИИ  
С ПРАВИЛАМИ,  
РЕДКОЛЛЕГИЕЙ НЕ РАССМАТРИВАЮТСЯ**

**НА ЖУРНАЛ ОТКРЫТА ПОДПИСКА  
В ПОЧТОВЫХ ОТДЕЛЕНИЯХ УКРАИНЫ**

**ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 22786**