

**РГУ**  
ИМ. А.Н. КОСЫГИНА  
ТЕХНОЛОГИИ. ДИЗАЙН. ИСКУССТВО

МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ФОРУМ

ПЕРВЫЕ МЕЖДУНАРОДНЫЕ  
 **КОСЫГИНСКИЕ  
ЧТЕНИЯ**

СБОРНИК ПЛЕНАРНЫХ ДОКЛАДОВ  
**2017**

«СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК»

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ А.Н. КОСЫГИНА  
(ТЕХНОЛОГИИ. ДИЗАЙН. ИСКУССТВО)**



**СБОРНИК ПЛЕНАРНЫХ ДОКЛАДОВ**

**МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ФОРУМА  
ПЕРВЫЕ МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОСЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ**

**Тематика чтений  
«СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК»**

**Проводится при финансовой поддержке Российского фонда  
фундаментальных исследований – проект № 17-08-20544**

**МОСКВА**

**11-12 ОКТЯБРЯ 2017 ГОДА**

УДК 66.02(06)  
С 23

**СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК** [Текст]: сборник пленарных докладов Международного научно-технического Форума «Первые международные Косыгинские чтения» (11-12 октября 2017 года) / М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2017. – 74 с.

**ISBN 978-5-87055-533-1**  
**ISBN 978-5-87055-547-8**

В сборник включены материалы пленарных докладов известных российских и зарубежных ученых, представленных на Форум, в которых рассматриваются проблемы инженерных наук, пути практической реализации современных энерго- ресурсоэффективных экологически чистых процессов и аппаратов химической, текстильной, лёгкой, и других отраслей промышленности.

**ISBN 978-5-87055-533-1**  
**ISBN 978-5-87055-547-8**  
УДК 66.02(06)

© ФГБОУ ВО «РГУ им.  
А.Н. Косыгина», 2017  
© Авторы пленарных докладов, 2017  
© Обложка. Дизайн. Денисов Д. А., 2017

**ОРГАНИЗАТОРЫ**  
**МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ФОРУМА**  
**«ПЕРВЫЕ МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОСЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ**  
**«СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК»»**

- \* Министерство образования и науки Российской Федерации;
- \* Министерство промышленности и торговли Российской Федерации;
- \* Российский Союз научных и инженерных общественных объединений;
- \* Российское химическое общество имени Д.И. Менделеева;
- \* Российская инженерная академия;
- \* Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство);
- \* Институт общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова РАН РФ;
- \* Национальный исследовательский университет «МЭИ»;
- \* Комитет Российского Союза научных и инженерных общественных объединений по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов;
- \* Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна;
- \* Ивановский государственный политехнический университет;
- \* Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси;
- \* Всероссийское общество изобретателей и рационализаторов;
- \* Центр международного промышленного сотрудничества ЮНИДО в Российской Федерации.

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ  
«ПЕРВЫЕ МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОСЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ  
«СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК»»**

**проводится на базе Российского государственного университета имени  
А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), г. Москва, Россия**

**ЦЕЛЬ МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ФОРУМА**

- обмен научно-технической информацией по тематике Форума
- обсуждение путей реализации современных эффективных технологий и оборудования в базовых отраслях народного хозяйства, в промышленности товаров народного потребления
- анализ основных направлений создания инновационных материалов
- обсуждение экономических механизмов и управленческих технологий развития промышленности и АПК

Особое внимание на всех секциях форума и пленарном заседании уделено вопросам повышения эффективности промышленных технологий и оборудования, импортозамещению, повышению производительности труда, энерго- и ресурсосбережению, экологической и производственной безопасности, качеству целевых продуктов.

**Рабочие языки конференции: русский и английский.**

**НАУЧНЫЙ ОРГКОМИТЕТ****МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ФОРУМА  
«ПЕРВЫЕ МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОСЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ  
«СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК»»****Сопредседатели научного комитета Форума**

Ректор Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина

(Технологии. Дизайн. Искусство) профессор

**Белгородский Валерий Савельевич;**

Президент Российского Союза научных и инженерных общественных объединений (РосСНИО), Президент Академии инженерных наук имени

А.М. Прохорова, член Президиума РАН,

академик РАН **Гуляев Юрий Васильевич;**

Директор Московской школы экономики МГУ имени М.В. Ломоносова,

академик РАН **Некипелов Александр Дмитриевич;**

Президент Российского химического общества имени Д.И. Менделеева,

член Президиума РАН, академик РАН **Цивадзе Аслан Юсупович;**

Президент Российской инженерной академии, чл.-корр. РАН

**Гусев Борис Владимирович**

**Учёный секретарь научного комитета форума**

профессор РГУ имени А.Н. Косыгина **Кошелева Мария Константиновна**

(тел. моб. 8 (926) 355 04 48, e-mail: oхtрaxt@ya.ru)

**ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФОРУМА НА САЙТАХ**

<http://www.mgudt.ru>, <http://drying-committee.ru>,

<http://kosyginreadings.ru>

## Научный комитет Форума

### От России:

проф. Александров А.А. (Москва); член-корр. РААСН Алоян Р.М. (Иваново); проф. Белгородский В.С. (Москва); проф. Блиничев В.Н. (Иваново); проф. Вошкин А.А. (Москва); проф. Гаряев А.Б. (Москва); проф. Гальбрайх Л.С. (Москва); акад. РАН Гвишиани А.Д. (Москва); акад. РАН Гуляев Ю.В. (Москва); член-корр. РАН Гусев Б.В. (Москва); проф. Демидов А.В. (С-Петербург); проф. Дорняк О.Р. (Воронеж); проф. Дьяконов С.Г. (Казань); проф. Карташов Э.М. (Москва); проф. Кашеев О.В. (Москва); проф. Кобраков К.И. (Москва), проф. Кошелева М.К. (Москва); проф. Кричевский Г.Е. (Москва); проф. Кулов Н.Н. (Москва); акад. РАН Леонтьев Л.И. (Москва); проф. Мартынов И.А. (Москва); акад. РАН Мешалкин В.П. (Москва); проф. Мищенко С.В. (Тамбов); акад. РАН Некипелов А.Д. (Москва); проф. Остриков А.Н. (Воронеж); проф. Разумеев К.Э. (Москва); проф. Рудобашта С.П. (Москва); д.т.н. Секанов Ю.П. (Москва); проф. Ситцев В.М. (Москва); д.т.н. Сорочинский В.Ф. (Москва); проф. Таран А.Л. (Москва); акад. РААСН Федосов С.В. (Иваново); акад. АХ РФ Церетели З.К. (Москва); акад. РАН Цивадзе А.Ю. (Москва), член-корр. РАН Чилингаров А.Н (Москва), з.д.и. Юдашкин В.А. (Москва)

### Международный:

prof. A. Akulich (Belarus); prof. P. Akulich (Belarus); prof. O. Alves-Filho (Norway); prof. P. Ditl (Czechia); NAS of Ukraine academician A. Dolinsky (Ukraine); Ph.D. D. Gehrman (Germany); prof. T. Kudra (Canada); prof. N. Mihailov (Bulgaria); prof. A. Mudjumdar (Singapore); NAS of Belarus corresponding member N. Pavlukevich (Belarus); prof. F. Rieger (Czechia); prof. G.D. Saravacos (Greece); NAS of Ukraine corresponding member Yu. Snezhkin (Ukraine); prof. Li Zhanyong (China)

## ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

### ОТКРЫТИЕ ФОРУМА



**Белгородский В.С., профессор**

*Ректор Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство)  
г. Москва, Россия*

### ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО



**Мартынов И.А., профессор**

*Советник ректора Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство)  
г. Москва, Россия*

### ВИДЕООБРАЩЕНИЕ К УЧАСТНИКАМ ФОРУМА



**Гвишиани А.Д., академик РАН**

*Внук А.Н. Косыгина  
г. Москва, Россия*

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

### 1. ВКЛАД НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЩЕСТВ В РАЗВИТИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК И ЦИВИЛИЗАЦИИ



**Гуляев Ю.В., академик РАН**

*Член Президиума РАН, Президент  
Российского Союза научных и инженерных  
общественных объединений (РосСННО),  
Президент Академии инженерных наук имени  
А.М. Прохорова  
г. Москва, Россия*

### 2. РЕШЕНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ ИНЖЕНЕРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ РФ



**Гусев Б.В., член-корр. РАН**

*Президент Российской инженерной академии  
(РИА)  
г. Москва, Россия*

### **3. ИНЖЕНЕРНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ**



**Кулов Н.Н., профессор**

*Вице-президент РХО им. Д.И. Менделеева  
г. Москва, Россия*

### **4. РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**



**Рудобашта С.П., профессор**

*Председатель Комитета Российского Союза  
научных и инженерных общественных  
объединений (РосСНИО)  
г. Москва, Россия*

**5. ECOLOGICALLY FRIENDLY TECHNOLOGIES OF THE 21ST CENTURY**  
**ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 21 ВЕКА**



**Prof. Odilio Alves-Filho**

*PhD Department of Energy and Process  
Engineering Norwegian University of Science and  
Technology  
Trondheim, NORWAY*

*Норвежский университет науки и технологии  
г. Тронхейм, Норвегия*

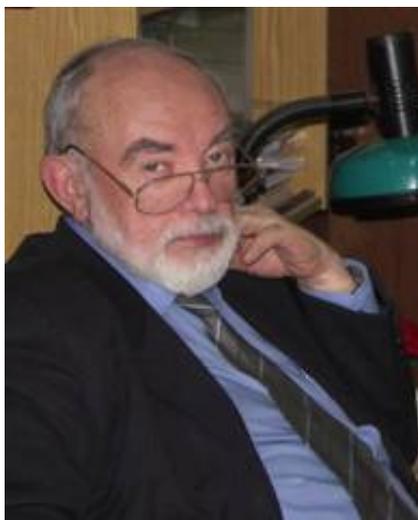
**6. КОНЦЕПЦИЯ ХИМИЗАЦИИ СОВРЕМЕННОЙ ЭКОНОМИКИ  
РОССИИ**



**Бабкин В.В., профессор**

*Президент Международного  
института проблем химизации  
современной экономики  
г. Москва, Россия*

## 7. "ЗЕЛЕНАЯ ХИМИЯ" В РАБОТАХ УЧЕНЫХ РГУ ИМЕНИ А. Н. КОСЫГИНА



**Кобраков К.И., профессор**

*РГУ им. А.Н. Косыгина*

*г. Москва, Россия*

## 8. КОСЫГИНСКАЯ РЕФОРМА



**Некипелов А.Д.,  
академик РАН**

*Институт экономики РАН*

*г. Москва, Россия*

## **9. СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ И ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОРЕСУРСООБЪЕКТОВ И ЦЕПЕЙ ПОСТАВОК НЕФТЕГАЗОХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

**Мешалкин В.П., академик РАН**



*Член правления РХО имени  
Д.И. Менделеева, директор  
Международного института логистики  
ресурсосбережения и технологической  
инноватики (МИ-ЛРТИ)  
г. Москва, Россия*

## **10. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕСТРУКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ СТРОИТЕЛЬСТВА**



**Федосов С.В., академик РААСН**

*Президент Ивановского государственного  
политехнического университета  
г. Иваново, Россия*

УДК 330.341.1

**ВКЛАД ОТЕЧЕСТВЕННЫХ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЩЕСТВ В РАЗВИТИЕ  
ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК И ЦИВИЛИЗАЦИИ**  
**CONTRIBUTION OF DOMESTIC SCIENTIFIC AND TECHNICAL SOCIETIES TO THE  
DEVELOPMENT OF ENGINEERING SCIENCES AND CIVILIZATION**

**Юрий Васильевич Гуляев**  
**Yury V. Gulyaev**

*Российский и Международный союзы научных и инженерных общественных объединений,  
Россия, Москва*

*Russian and International Unions of Scientific and Engineering Associations, Russia, Moscow  
(e-mail: usea1866@gmail.com)*

*Аннотация:* Рассмотрены вопросы влияния инженерных наук на формирование современного общества и роли научно-технических объединений, отечественных научных и инженерных школ в развитии технических наук, образования и цивилизации.

*Abstract:* The article considers issues of the influence of engineering sciences on the formation of modern society and the role of scientific and technical associations, domestic scientific and engineering schools in the development of technical sciences, education and civilization.

*Ключевые слова:* инженерные (технические) науки, Русское техническое общество, Всесоюзный совет научно-технических обществ, Союз научных и инженерных общественных объединений.

*Keywords:* engineering (technical) sciences, Russian Technical Society, All-Union Council of Scientific and Technical Societies, Union of Scientific and Engineering Associations.

Важнейшая роль науки и техники в условиях современной быстроразвивающейся техногенной цивилизации очевидна и общепризнана. Весь технико-технологический прогресс последнего столетия и как его следствие стремительное изменение жизни общества основаны на использовании научных достижений и инженерных разработок.

Фундаментальные науки изучают базовые законы природы, явления, связанные с окружающей средой и мирозданием. В результате может быть открыто новое явление или получена совершенно новая, недоступная с уровня технических наук технология, разработка, например, лазер. Лазерные технологии в современном мире приобрели существенную роль – от светодиодов до технологий оптических носителей информации и военного применения (прицелы, системы наведения, системы вооружений и т.п.). Как правило, новые открытия в фундаментальной науке в корне меняют те или иные представления о явлениях и позволяют открывать общие технические решения.

В отличие от фундаментальных наук, прикладные, инженерные (технические) науки имеют исключительно практическое назначение. Технические науки направлены на достижение конкретных целей (например, заданных тактико-технических характеристик), в заранее определенных условиях (сроки, затраты). Именно постановка целенаправленной задачи привела к созданию первых тепловых двигателей, летательных аппаратов, в том числе космических.

Современная цивилизация, определившая в начале XIX века путь научно-технологического развития, зависит, в первую очередь, от технологий. Именно благодаря использованию (заимствованию, копированию, закупке) новых технологий страны юго-восточной Азии (Китай, Япония, Южная Корея), не имея собственных развитых школ фундаментальных наук, заняли ведущие места в мировой экономике.

Как свидетельствует опыт промышленно развитых стран, основу инновационной экономики составляет именно инженерная деятельность. Инженерные науки вместе с образованием, производством являются драйверами социально-экономического развития

цивилизации. Научные открытия, технологии и связанные с ними производства техники и изделий и определили современную цивилизацию и расстановку сил на планете.

Творческий характер инженерного труда проявляется в создании систем и процессов, которые без участия человека возникнуть не могут. Инженерное творчество и научные исследования связаны между собой, но эта связь не линейна: истории известны случаи, когда системы, созданные инженерами, заставляли ученых радикально пересматривать свои представления о научном знании. Нововведения - это инженерная деятельность. Можно утверждать, что современная цивилизация создана инженерами.

Россия обладает глубокими традициями в инженерном творчестве: невозможно даже перечислить уникальные технические решения отечественных специалистов в различных областях. Например, лампа накаливания в нынешнем виде известна как «лампочка Эдисона», однако первым предложил применять в лампах вольфрамовые нити и закручивать нить накаливания в форме спирали российский ученый, член Русского технического общества Александр Николаевич Лодыгин в 1870 г. Томас Алва Эдисон получил патент на лампу накаливания только в 1879 году.

07 мая 1895 г. Александр Степанович Попов, русский физик и электротехник, изобретатель радио, член Русского технического общества, на заседании Русского физико-химического общества сделал доклад "Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям" и продемонстрировал передачу знаков азбуки Морзе без помощи проводов. В память этого события с 1925 года в нашей стране 7 мая отмечается профессиональный праздник - День радио, который ежегодно празднуется работниками всех отраслей связи и радиотехники.

Борис Львович Розинг, российский физик, учёный, педагог является изобретателем телевидения. 9 мая 1911 года на заседании Русского технического общества Розинг продемонстрировал передачу телевизионных изображений простых геометрических фигур и приём их с воспроизведением на экране электронно-лучевой трубки. За эти опыты Русское техническое общество позднее присудило ему Золотую медаль и премию имени К.Г. Сименса.

Вспомним также еще об одном члене Русского технического общества - выдающемся русском инженере, изобретателе, ученом, В.Г. Шухове, создателе знаменитой "Шуховской башни", дебаркадера Киевского вокзала в Москве, первого в России нефтепровода и других известных сооружений, навсегда вошедших в историю развития инженерной мысли в России, 165-летие со дня рождения которого научно-техническая общественность будет праздновать в следующем году.

Русское техническое общество, 150-летний юбилей которого Союз научных и инженерных общественных объединений (Союз НИО) торжественно отметил в прошлом году, а в дальнейшем Всесоюзный совет научно-технических обществ (ВСНТО) оказали значительное влияние на развитие техники, промышленности и технического образования в России. Согласно своему Уставу Русское техническое общество имело главной целью «содействовать развитию техники и технической промышленности в России».

Передовые ученые, инженеры, конструкторы и технологи, просветители и педагоги, деятели флота и организаторы промышленности, объединенные в рядах Русского технического общества, выступали поборниками независимого промышленного развития страны, активно содействовали становлению основных отраслей промышленности, изысканию и использованию отечественного сырья для промышленности. Деятельность общества охватывала многие направления науки и техники.

По инициативе и с участием РТО проводились крупные экспериментальные работы, широко известные в России и за рубежом. На заседаниях РТО впервые были сделаны доклады о научных исследованиях и открытиях видных представителей отечественной науки и техники. В воздухоплавательном отделе РТО Д. И. Менделеев осуществил большую и плодотворную работу по изучению упругости газов применительно к воздухоплаванию, Д. К. Чернов обнародовал работу «О наступлении возможности воздухоплавания без

помощи баллона» и предложил проект вертолета. К. Э. Циолковский выдвинул проект металлического управляемого аэростата и заложил научные основы покорения космического пространства. Н.Е. Жуковский развил теорию «О присоединенных вихрях», А. Ф. Можайский предложил проект летательного аппарата.

На конференциях и съездах РТО рассматривались важнейшие технические проблемы промышленного развития страны. РТО устроило около 30 всероссийских выставок, созвало 15 съездов, на которых обсуждались важнейшие проблемы развития основных отраслей отечественной промышленности и транспорта.

РТО занималось коренными техническими проблемами промышленного развития страны — созданием угольно-металлургической базы на юге России, строительством нефтепроводов Баку — Батуми, Транссибирской железнодорожной магистрали, развитием новых отраслей промышленности, таких, как: нефтяная промышленность, железнодорожный транспорт, радиотехника, энергетика, автомобилестроение, судостроение, авиация и т.д.

РТО в своей деятельности уделяло внимание вопросам поощрения развития научно-технических исследований и изобретений. Оно принимало непосредственное участие в проведении конкурсов и присвоении специальных премий имени знаменитых ученых, промышленников и деятелей Общества.

Члены РТО широко применяли в своей деятельности то, что мы теперь называем «инновационный подход». Такие инженеры и предприниматели, как В.Г. Шухов, Людвиг Нобель, А. Н. Крылов и др. были авторами принципиально новых идей, разработок, которые они воплощали в жизнь, применяли на практике. Благодаря Русскому техническому обществу инновации получали апробацию, поддержку, распространение и использование во многих отраслях экономики.

В работе РТО и его отделений принимали участие ведущие ученые и инженеры страны. В разное время в РТО входили и активно сотрудничали такие выдающиеся ученые, как Д. И. Менделеев, П. Н. Яблочков, Н. Н. Бенардос, А. С. Попов, М. О. Доливо-Добровольский, Д. К. Чернов, А. Н. Крылов, В. Г. Шухов, М. А. Шателен, Г. О. Графтио, Н. Е. Жуковский, И. М. Губкин, А. В. Винтер, а также крупные промышленники Л. Э. Нобель, С. И. Мамонтов, С. И. Мальцев, Н. И. Путилов и др.

В послереволюционный период научно-технические общества активно участвовали в индустриализации страны, разрабатывали рекомендации по развитию энергетики, машиностроения, химии и других отраслей промышленности, реконструкции транспорта. Важнейшим звеном экономического и технического прогресса, способным одновременно в короткий срок основы для подъема всех отраслей промышленности, стала электрификация страны. План по ее осуществлению вошел в историю как план ГОЭЛРО. В разработке и осуществлении плана ГОЭЛРО принимали участие деятели VI электротехнического отдела РТО, такие как Г. О. Графтио, М. А. Шателен, А. В. Винтер. Одним из идеологов плана ГОЭЛРО стал Г. М. Кржижановский, который позже возглавил Всесоюзный совет научных инженерно-технических обществ. Совместная работа над проблемами индустриализации страны обеспечила преемственность передовых традиций от дореволюционной к новой советской технической интеллигенции.

Деятельность научно-технических обществ расширилась и приобрела размах. Были созданы ячейки обществ на предприятиях, которые принимали непосредственное участие в решении конкретных задач производства. При научно-технических обществах были созданы комитеты содействия стройкам пятилеток, общества принимали участие в решении вопросов создания новых отраслей промышленности, развития угольно-металлургической базы страны, строительства московского метрополитена, организовывали смотры внедрения передовой техники.

К 1932 году в СССР было создано 40 всесоюзных научных инженерно-технических обществ (НИТО). В задачи общества входило повышение квалификации технических специалистов и решения научно-технических проблем, а также реконструкции народного

хозяйства. Координировал деятельность НИТО Всесоюзный совет научных инженерно-технических обществ – ВСНИТО.

В годы Великой отечественной войны общества оказывали помощь оборонным предприятиям в ускоренном освоении ими выпуска продукции для нужд фронта, организовывали консультации, работали над проблемами изыскания и использования резервов для обороны страны и разгрома врага, разрабатывали мероприятия по восстановлению разрушенных предприятий и инфраструктуры. Необходимость восстановления городов, воссоздания производств способствовало тому, что именно инженеры стали играть одну из определяющих ролей в экономическом развитии СССР.

В послевоенные годы профессия инженера становится ключевой профессией в Советском Союзе: открываются новые инженерно-технические вузы, увеличивается число студентов и выпускников-инженеров. Одновременно государство активно способствовало развитию научной базы.

В 1954 году инженерно-технические общества реорганизованы в отраслевые научно-технические общества (НТО), которые стали массовыми объединениями ученых, инженерно-технических работников и рабочих-новаторов. Был создан Всесоюзный совет научно-технических обществ. Такой подход и позволил СССР во многом реализовать инженерный потенциал, имевшийся в стране. Единые задачи и приоритеты, верное направление развития научно-технического общества стали залогом высокого качества инженерной деятельности в СССР.

Организации НТО наряду с разработкой отдельных научно-технических вопросов стали участвовать в выработке направлений технического развития отраслей народного хозяйства, предприятий, в формировании государственных планов развития науки и техники, в осуществлении этих планов. При активном участии научно-технических обществ решались многие проблемы, связанные с развитием наиболее прогрессивных производств, такие как создание новых материалов, развитие электронно-вычислительной техники, радиоэлектроники, телевидения, космических аппаратов и т.д. На основе выработанных НТО рекомендаций было принято ряд постановлений Совета министров СССР и советов министров союзных республик.

В деятельности НТО значительное место занимала пропаганда достижений науки и техники, оказание помощи инженерно-техническим работникам и рабочим в повышении их научно-технических знаний.

Были созданы курсы и семинары по изучению новой техники, школы передового опыта. Научно-технические общества издавали ряд отраслевых технических журналов, в домах науки и техники проходили выставки, конференции, лектории.

Научно-технические общества Советского Союза стали налаживать контакты, активно сотрудничать и входить в международные инженерно-технические организации. Председатель Всесоюзного совета научно-технических обществ, выдающийся учёный-механик, академик Александр Юльевич Ишлинский в течение 20 лет занимал руководящие посты во Всемирной федерации инженерных обществ (ВФИО): с 1971 года был вице-президентом Всемирной федерации инженерных обществ, с 1987 по 1991 гг. президентом Всемирной федерации инженерных организаций, после 1991 года и до конца жизни занимал должность почетного президента ВФИО.

В 1973 году научно-технические общества были награждены высшей государственной наградой – орденом Ленина за большой вклад в развитие научно-технического прогресса, активную работу по пропаганде научных и технических знаний среди трудящихся.

Россия исторически является одной из мировых научных держав: отечественная научная и инженерная школы эффективно решали задачи социально-экономического развития и обеспечения безопасности страны, внесли существенный вклад в накопление человечеством научных знаний и создание передовых технологий.

Сегодня российская высокотехнологичная сфера столкнулась с серьезными вызовами глобального, макроэкономического и внутриотраслевого характера, которые продуцируют

новые, более жесткие требования к ее организации и поддержке. Конкуренция на международном и национальном рынках так высока, что наука и технологии ассоциируются преимущественно с прорывными результатами, передовыми коллективами, высокими персональными достижениями ученых. Ситуация усугубилась разразившимся мировым финансовым и экономическим кризисами. Как следствие – снижение спроса на энергетические ресурсы и падение их цены. Уменьшение экспортной выручки привело к резкому уменьшению объема прямых инвестиций в экономику России и стагнации многих отраслей. Этому же способствовало введение экономических санкций в отношении России.

Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. утверждена Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, в которой содержатся основные вызовы, стоящие перед нашей страной. Слабое взаимодействие сектора исследований и разработок с реальным сектором экономики, разомкнутость инновационного цикла приводят к тому, что государственные инвестиции в человеческий капитал фактически обеспечивают рост конкурентоспособности других экономик, вследствие чего возможности удержания наиболее эффективных ученых, инженеров, предпринимателей, создающих прорывные продукты, существенно сокращаются в сравнении со странами, лидирующими в сфере инноваций.

Для реализации Стратегии научно-технического развития на долгосрочный период необходима консолидация усилий федеральных органов государственной власти, органов государственной власти субъектов Российской Федерации, научно-образовательного и предпринимательского сообществ, институтов гражданского общества по обеспечению целостности и единства научно-технологического развития России, созданию благоприятных условий для применения достижений науки и технологий в интересах социально-экономического развития России.

Необходимость преодоления сырьевой зависимости российской экономики, создания современной инновационной экономики и высокотехнологичных производств ставит задачу выведения на совершенно новый качественный уровень системы подготовки инженерных кадров, повышения престижности инженерной профессии.

Особую роль в подготовке инженерных кадров для экономики страны играют ведущие технические университеты. Именно они способны быстро адаптироваться к изменяющимся экономическим условиям, обеспечивать высокое качество инженерного образования, готовить кадровый резерв для инновационных преобразований, роста конкурентоспособности отечественных товаров.

«Инженерное образование имеет важное значение для предоставления людям возможности эффективно использовать современные научные знания и технические средства и процессы, продвигать технологии для улучшения качества жизни граждан данного региона. Инженерное образование должно быть введено на каждом уровне развития человека» - отмечено в декларации, принятой на 5-м Всемирном конгрессе инженеров в ноябре 2015 года в Киото, Япония, проводимом Всемирной Федерацией Инженерных организаций (WFEO). На этом Всемирном конгрессе обсуждались также другие важнейшие темы, а именно: энергетика в интересах устойчивого общества, возобновляемые ресурсы, городское развитие и инфраструктура, мобильность и коммуникационные технологии, промышленность, жизненно важные инновации, техника для общества, образование женщин в области инженерии.

Инновационное развитие промышленности возможно только на базе всё более широкого использования изобретений, создания новых технологий и оборудования. В настоящее время в Российской Федерации существует несколько общественных научных организаций, которые занимаются вопросами передачи инженерных разработок в промышленность, тем самым ускоряя экономику страны. Среди таких организаций Российский Союз научных и инженерных общественных объединений, Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова, Российское научно-техническое общество судостроителей имени академика А.Н. Крылова, Российское НТО радиотехники,

электроники и связи имени А. С. Попова, Российская инженерная академия, Всероссийское общество изобретателей и рационализаторов и др.

Академия инженерных наук им. А. М. Прохорова (АИН) в этом году отмечает 25 лет со дня своего основания и 100 лет со дня рождения её основателя, великого русского учёного, дважды Героя Социалистического труда, лауреата Ленинской, Нобелевской и государственных премий СССР Александра Михайловича Прохорова. Академия осуществляет свою деятельность на всей территории Российской Федерации и имеет в своём составе 10 Межрегиональных отделений. Академия объединяет более 1100 ученых различных инженерных специальностей в 17 научных отделениях. Среди действительных членов Академии около 100 академиков РАН, более 200 ректоров, проректоров, деканов и заведующих кафедрами ВУЗов. В АИН имеется более 300 коллективных членов – ведущих НИИ, ВУЗов, предприятий и объединений страны. Академия имеет отделения в Германии, в Украине, в США, в КНР.

Правопреемником и продолжателем традиций Русского технического общества является Союз научных и инженерных общественных объединений.

Союз НИО видит свою основную задачу в широком вовлечении в научно-технические общества, в процесс инновационного развития страны как молодых, так и уже состоявшихся ученых и специалистов, обеспечении всемерной консультационной, информационной и методической поддержки изобретателям, рационализаторам, новаторам, имеющим интересные, общественно значимые проекты, технологии, инженерные разработки.

В выявлении лучших инженеров страны, популяризации инженерного искусства, пропаганде достижений и опыта, привлечению внимания государства к проблемам инженерного дела в России существенную роль играют проводимые Союзом НИО ежегодно Всероссийский конкурс «Инженер года» и конкурс по присуждению молодежной премии в области науки и техники «Надежда России». Всероссийский конкурс «Инженер года» проводится с 2000 года, а конкурс «Надежда России» - с 2009 года. Конкурсы являются крупнейшим социальным проектом, реализуемым в России с целью выявления и распространения передового опыта и достижений инженерных кадров, лучших в своей сфере деятельности.

Первостепенное внимание уделяется Союзом НИО работе с молодежью. За счет средств Союза ежегодно выделяется 8 стипендий имени В.Г. Шухова для студентов-отличников ведущих технических вузов России. Союз НИО ведет активную работу по укреплению общества в регионах. Дома науки и техники Союза НИО ведут подготовку и переподготовку кадров, обеспечивая возможности системы дополнительного образования для специалистов различного уровня подготовки, проводят научно-технические конференции, семинары и круглые столы по актуальным вопросам науки и техники.

Накопленный опыт входящих в Российский Союз НИО общественных научно-технических объединений, образованных как по профессиональным творческим интересам, так и по региональному признаку, опираются на славную историю и традиции Русского технического общества, созданного в ноябре 1866 года. Использование этого нравственного потенциала в деле формирования духовно богатой и высокопрофессиональной личности российского ученого, инженера, изобретателя должно стать основой его активной гражданской позиции, утверждению истинной ценности научного и инженерного труда, повышения авторитета российских научных и инженерных школ на благо нашего Отчества.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В помощь активу НТО: сборник руководящих материалов / Сост.: В.Ф. Оранжева, А.П. Купчин, В.И. Трошин, П.И. Гапонов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Профиздат, 1969. 432 с.
2. Кричко В.А. Продолжая традиции... (К 125-летию Русского технического общества). – М.: Знание, 1991. – 64 с.
3. Научно-технические общества СССР. Исторический очерк, М.: Профиздат, 1968. 456 с.

УДК 330.341.1

**РЕШЕНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ В РАЗЛИЧНЫХ  
ОБЛАСТЯХ ИНЖЕНЕРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ  
ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ РФ  
SOLUTIONS TO SCIENTIFIC AND TECHNICAL PROBLEMS  
IN VARIOUS ENGINEERING AREAS FOR THE SUSTAINABLE ECONOMIC  
DEVELOPMENT OF THE RUSSIAN FEDERATION**

**Борис Владимирович Гусев  
Boris V. Gusev**

*Российская инженерная академия, Россия, Москва  
Russian Academies of Engineering, Russia, Moscow  
(e-mail: info-rae@mail.ru)*

*Аннотация:* В статье рассматриваются вопросы различных технологических укладов и обосновываются задачи VI технологического уклада, в котором важнейшими элементами являются возобновляемая энергетика, нано- и биоматериалы. Показано, что возобновляемая энергетика имеет в 2-3 раза более высокий коэффициент полезного использования тепла и экологическую целесообразность.

Существенное значение для решения проблем снижения материалоемкости имеет наноструктурирование традиционных материалов. На примере самого массового строительного материала – бетона показана возможность наноструктурирования цементных систем за счет использования минеральных частиц различной дисперсности. Предложена новая технология получения частиц такой дисперсности за счет применения кавитационных процессов измельчения.

В материалах статьи рассматриваются вопросы экологии, как за счет снижения выбросов в атмосферу CO<sub>2</sub> при производстве цемента, так и путем обеспечения высокой эффективности и комфортности стеновых материалов.

*Abstract:* This article deals with the subject of various technological ways and problems of VI technological way in which renewable power, nano- and biomaterials are the key elements. It is shown that the renewable power has by 2-3 times a higher coefficient of energy efficiency and ecological expediency.

Nanostructuring of traditional materials is essential in solving the problems to decrease material consumption. By the example of the most large scale construction material i.e. concrete there was proved the possibility to nanostructure cement systems by means of mineral particles of various dispersion. There has been offered a new technology to receive particles of such dispersion by means of cavitation fining processes.

The article presents environmental issues, i.e. the reduction of CO<sub>2</sub> emission in the process of cement production, and high efficiency and comfort of walling materials.

*Ключевые слова:* Технологические уклады, возобновляемая энергетика, материалы, наноматериалы, дисперсности частиц, наноструктурирование цементных материалов, прочность, долговечность, измельчение частиц, кавитация, экология.

*Keywords:* Technological ways, renewable power, materials, nanomaterials, dispersions of particles, nanostructuring of cement materials, strength, durability, fining, cavitation, ecology.

В табл. 1 представлена обобщенная матрица технологических укладов XVIII-XXI веков, в которой сформулированы основные направления по развитию промышленности, науки и образования. Конечно принципиальными являются вопросы энергетике и материалов.

Таблица 1. Обобщенная матрица технологических укладов

Периоды укладов Основные направления прогресса	I УКЛАД 1780-1840 г.г. Ремесленное производство	II УКЛАД 1825-1890 г.г. Эпоха пара	III УКЛАД 1880-1930г.г. Промышленное производство	IV УКЛАД 1930-1980 г.г. Эпоха нефти	V УКЛАД 1975-2040 г.г. Информационные технологии	VI УКЛАД 2010-2060 г.г. Когнитивные системы
Ведущие промышленности	Текстильная	Паровое машиностроение	Железнодорожный транспорт	Автотракторное производство	Электроника и роботизация	Роботизированные комплексы
Области прогресса	Выплавка чугуна	Черная металлургия	Электрификация	Химизация	Информатизация, телекоммуникации	Интеллектуальные системы
Материаловедение	Железо	Сталь Бетон	Бетон Сталь	Металлы Пластмассы	Композиты	Нanomатериалы Биоматериалы
Энергоносители	Вода Ветер	Пар	Уголь	Нефть	Природные нефть и газ	Возобновляемая энергетика
Науки	Физика Механика	Физика Теплотехника	Неорганическая химия	Органическая химия	Нанотехнологии Вычислительная математика	Биотехнологии
Образование	Освоение профессий	Профессиональное образование	Всеобщее начальное образование	Среднее образование	Высшее образование	Межотраслевое образование
Адаптивное управление, методы контроля	Эмпирические	Сравнительные	Усредненные	Параметрические	Автоматизированные системы технологических процессов	Интеллектуальные системы и кибернетическое управление

Развитие энергетики представлено в монографиях [1, 2]. При оценке развития энергетики основным показателем эффективности является коэффициент полезного действия КПД (коэффициент полезного использования (КПИ) оборудования для производства энергии. Так полезное использование тепла при централизованном теплоснабжении городов в системе ТЭЦ не очень эффективно и может быть представлено следующими направлениями:

установка по производству тепла – 50%  
система доставки – 90%  
отопительная система – 30%

Общий коэффициент полезного использования для системы ТЭЦ будет равен:

$0,5 \times 0,9 \times 0,3 = 0,135$  или 13,5%

Таким образом КПИ полезного использования тепла ТЭЦ вряд ли может превысить 10%. Кроме того по рекомендации ООН в табл. 2 представлен штрафные экологические балы при использовании различных видов топлив и только солнечное тепло, ветер и малые ГЭС являются наиболее эффективными.

Таблица 2. Эффективность теплоносителей

Топливо/технология	Штрафной экологический балл
Бурый уголь	1735
Нефтяное топливо	1398
Каменный уголь	1356
Ядерное топливо	672
Солнечный фотоэлектрические элементы	461
Природный газ	267
Ветер	65
Малые ГЭС	5

В последние годы в мире большое внимание уделяется энергосбережению [2] и развитию ветроэнергетики, использованию солнечной энергии, а также таким мобильным источникам энергии, как топливные насосы. Для тепловых насосов КПД (КПИ) может превысить и 100%, но это за счет использования существенной разности температуры помещения и источника тепла, например грунтового массива. Схема отопления с использованием насоса представлена на рис. 1.

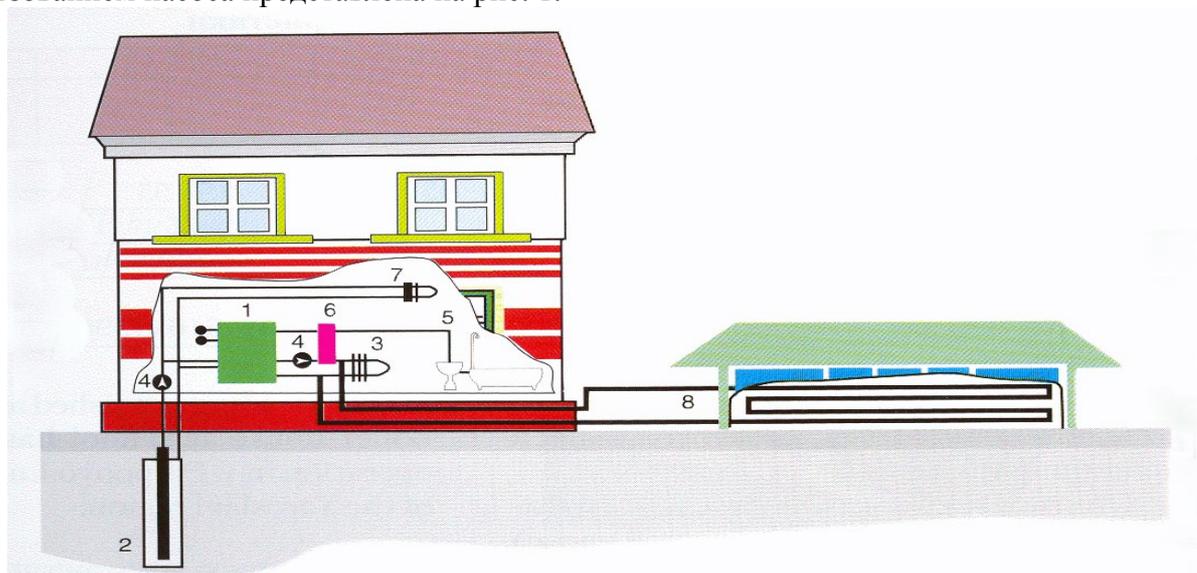


Рис.1. Схема теплоснабжения здания – тепловой насос

*Основные элементы:* 1 – тепловой насос; 2 – вертикальный грунтовый теплообменник; 3 – система отопления дома; 4 – циркуляционные насосы; 5 – система горячего водоснабжения; 6 – электропроводчик;

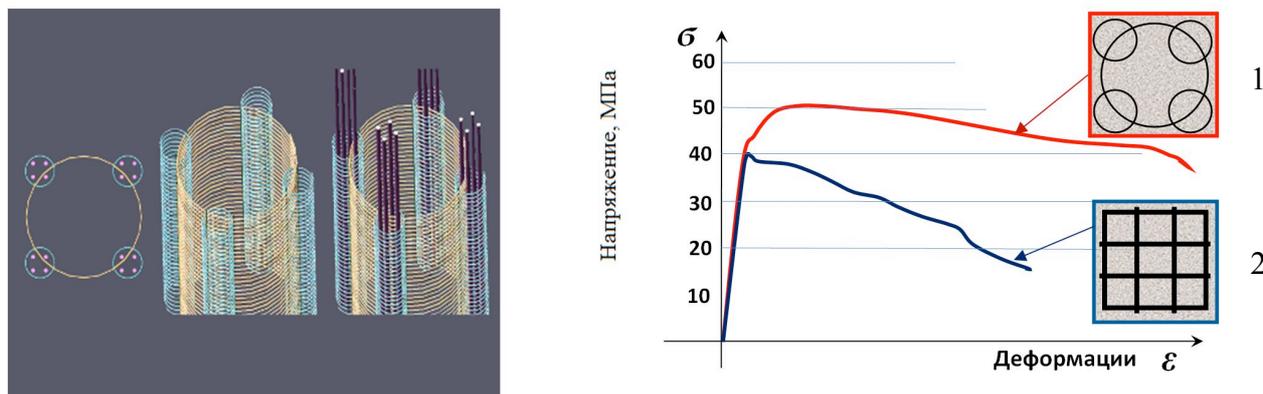
*Дополнительные элементы:* 7 – система охлаждения воздуха (лето); 8 – система обогрева теплицы (весна, осень).

Вторым принципиальным вопросом развития цивилизации является проблема получения и использования эффективных материалов. Если на заре существования человечества основными материалами были материалы животного и растительного происхождения шкуры, дерево, то с зарождением производства стали производить текстиль, выплавлять металлы и возникать ремесла.

В настоящее время производство различных материалов продолжает развиваться ускоренными темпами. Самым массовым материалов для строительства является бетон и железобетон, объем производства которого в мире составляет около 5 млрд м<sup>3</sup> [3, 4].

Бетон состоит из смеси дисперсных частиц цемента, песка и крупного заполнителя (щебня) и его отличительной особенностью является низкая прочность на растяжение, которая составляет всего 5% от прочности на сжатие.

Автором выполнены исследования по изучению напряженно-армированного состояния бетона, как композиционного материала и определению эффективных видов армирования, как самих конструкций, так и цементной матрицы. На рис. 2 предложено спиральное армирование колонн.



**Рис.2. Армирование колонн спиральной арматурой**

а) Общий спиральный вид армирования

б) Несущая способность фрагментов колонн

1 – при спиральном армировании

2 – при существующем армировании

В мире начали широко применяться армирование цементной матрицы различными волокнами, что позволило повысить прочность бетона на растяжение в 2-3 раза.

В табл. 3 представлены свойства различных волокон, которые могут быть использованы для дисперсного армирования.

**Таблица 3. Свойства различных волокон**

Материал	Модуль упругости, ГПа	Прочность на разрыв, ГПа
Наноцеллюлоза (Torcell)	135	8,3
Кевлар 49	125	3,5
Углеродное волокно	150	3,5
Углеродные нанотрубки	300	20
Нержавеющая сталь	200	0,5

В литературе [6, 7, 8, 9] сформирована возможность конструирования цементных систем с использованием минеральных частиц различной дисперсности. Нами представлена классификация дисперсных материалов по размерам частиц в следующем виде:

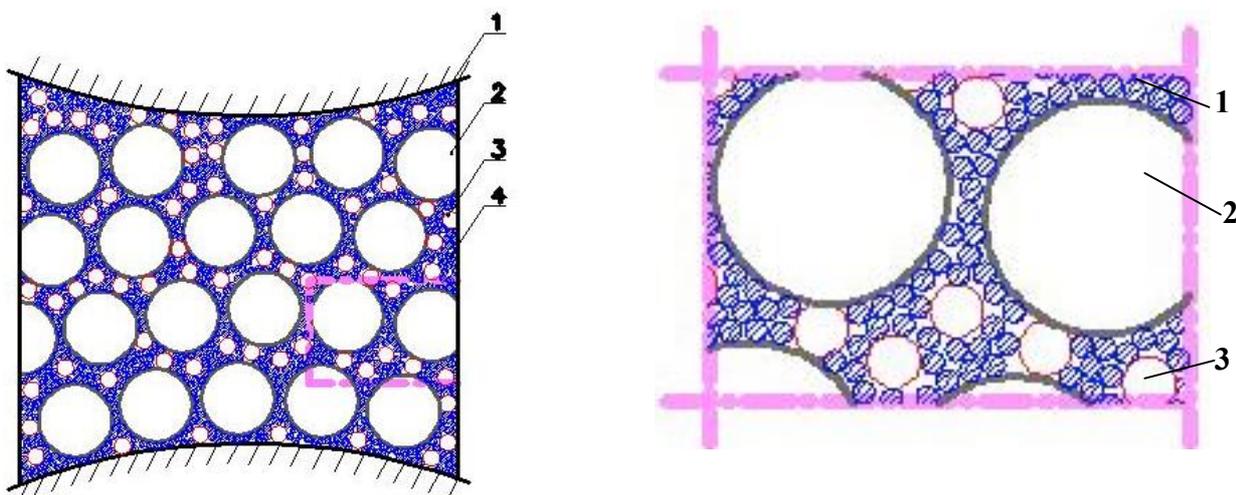
Цементные порошки : (10-80) мкм;  $(1-8) \cdot 10^4$  нм

Тонкодисперсные порошки (наполнители):  $10^4 - 10^3$  нм

Ультрадисперсные наполнители:  $10^3 - 10^2$  нм

Наноматериалы: менее  $10^2$  нм

Представленный зерновой состав обеспечит получение бетонов высокой плотности и прочности, вплоть до наноструктурирования системы.



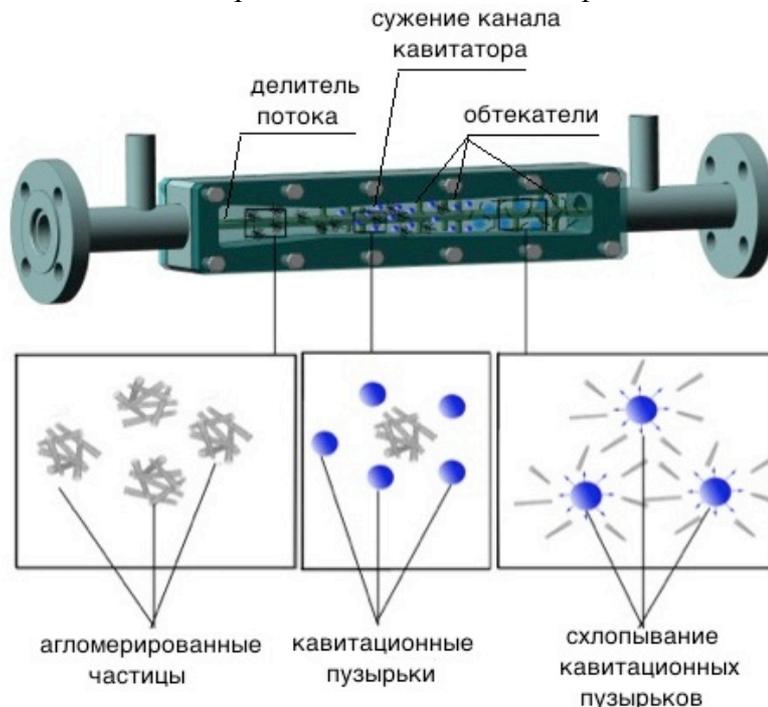
**Рис.3 Наноструктурирование мелкозернистых бетонов**

а) фрагмент наноструктурирования  
 1 - частицы песка; 2 - частицы цемента;  
 3 - тонкомолотые минеральные частицы;  
 4 – наноразмерные частицы

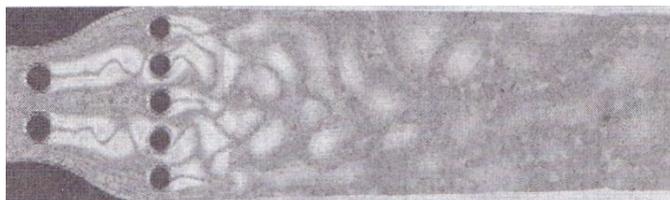
б) фрагмент наноструктуры пространства  
 между частицами цемента  
 1 – наноразмерные частицы  
 2 – частицы цемента  
 3 – тонкодисперсные частицы

Измельчение минеральных частиц может выполняться в водной среде с использованием эффекта кавитации. В настоящее время разработаны различные импульсные и гидродинамические излучатели (кавитаторы), схемы которых будут представлены в докладе. На рис. 4 показан общий вид пассивного гидродинамического диспергатора и вихревые потоки в нем. В зависимости от времени обработки будут происходить измельчение минеральных частиц до различной степени дисперсности.

а)



б)



**Рис.4. Общий вид пассивного гидродинамического диспергатора и поле вихревых потоков в суспензии**

При диспергации минеральных частиц в кавитационном диспергаторе происходит образование тонкодисперсных и наночастиц при минимальном времени обработки. В табл. 4 и 5 представлены результаты по изменению дисперсности и наноструктурированию цементных систем. При таком наноструктурировании прочность бетона возрастает в 2-2,5 раза.

**Таблица 4. Изменение дисперсности частиц при измельчении золы в кавитаторе**

Время обработки, мин.	Содержание частиц, %, размером мкм				
	0 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 80	Более 80
Без обработки	5,2	8,6	7	35,2	44
3	10,5	13,3	9,1	38,1	29
5	14,3	16,7	11,9	44,1	13

**Таблица 5. Составы наномодифицированных бетонов**

Щебень <sup>3</sup> кг/м	Песок <sup>3</sup> кг/м	Цемент <sup>3</sup> кг/м	Тонкомолотый наполнитель <sup>3</sup> кг/м	Ультро- дисперсный наполнитель <sup>3</sup> кг/м	Нанодис- персный наполнитель <sup>3</sup> кг/м	Вода л	Водо- твердые отношения В/Т	Объемная масса, <sup>3</sup> кг/м	Прочность МПа
1000-1100	450-550	240-270	160-180	68-72	28-31	200-220	0,27-0,29	2200-2250	-
1100	550	270	110	50	20	210	0,5	2200	130 МПа
<b>Песчаный бетон</b>	1402	477	167	72	31	209	0,28	2210	170 МПа

При применении тонкомолотых и наносуспензий может быть снижен расход цемента в составе бетонной смеси до 50%. Таким образом введение обработанных в кавитаторе минеральных добавок решают и экономическую и экологическую проблему [10].

В материалах доклада приводятся работы по решению экологических проблем при создании новых видов материалов для наружных стен, повторного использования бетона с получением на его основе низкомарочных цементов [11, 12].

В докладе будут изложены вопросы получения на основе органических отходов и их модифицирования вторичных продуктов типа протеина и биогаза.

Для обеспечения высокой плотности и долговечности бетона при участии и под редакцией автора изданы 7 книг и брошюр [13, 14].

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Энергетика России. 1920-2020гг. М., ИД «Энергия», 2008, Т.2, -1002с.
2. Сажин Б.С., Тюрин М.П. Энергосберегающие процессы и аппараты текстильных и химических предприятий. М., 2001, -311с.
3. Гусев Б.В., Зазимко В.Г., Нетеса .М.И. Бетон. Яким йому бути? Київ, 1978, 47с.
4. Гусев Б.В. Новые методы изготовления сборных железобетонных изделий, «Знание», серия «Строительство и архитектура», М., 1980, с.32-64.
5. Гусев Б.В., Деминов А.Д., Крюков Б.И., Литвин Л.М., Логвиненко Е.А Ударно-вибрационная технология уплотнения бетонных смесей. М., Стройиздат, 1982, 150 с.
6. Гусев Б.В., Кондращенко В.И., Маслов Б.П., Файвусович А.С. Формирование структуры композиционных материалов и их свойства. М., Научный мир, 2006, 560 с., (под редакцией Гусева Б.В.).
7. Холпанов Л.П., Гусев Б.В. Блочная коллоидно-химическая кристаллизация. М., Научный мир, 2008, 37 с.
8. Гусев Б.В., Минсардов И.Н., Селиванов М.Н. Нановязующие. Патент №2412919, 2011.
9. Гусев Б.В. Наноструктурирование бетонных материалов // Промышленное и гражданское строительство, М., 2016, №1, с. 7-10.
10. Б.В.Гусев, Ю.Р.Кривобородов, С.В.Самченко Технология портландцемента и его разновидностей. М., МГСУ, 2016, 112 с.
11. Гусев Б.В., Езерский В.А., Монастырский П.В., Кузнецов Н.В. Повышение теплотехнической однородности утепленных наружных стен с вентилируемым фасадом. М., Научный мир, 2005, 179 с. (под редакцией Гусева Б.В.).
12. Гусев Б.В. Перспективные технологии при производстве сборного железобетона. Издание 2. Ижевск, 2015, 205 с.
13. Гусев Б.В., Файвусович А.С., Степанова В.Ф., Розенталь Н.К. Математические модели процессов коррозии бетонов. М., Научный мир, 1996, 102 с.
14. Гусев Б.В., Файвусович А.С. Прогнозирование долговечности бетона при выщелачивании. М., Научный мир, 2014, 69 с.

УДК 66

**ИНЖЕНЕРНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ  
ENGINEERING PROBLEMS OF INCREASING ENERGY EFFICIENCY  
OF CHEMICAL TECHNOLOGICAL PROCESSES AND APPARATUS**

**Николай Николаевич Кулов  
Nikolay N. Kulov**

*Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Россия, Москва  
Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry RAS, Russia, Moscow  
(e-mail: kulov@igic.ras.ru)*

*Аннотация:* Рассматриваются два направления повышения энергетической эффективности. Одно из них связано с уменьшением движущей силы, так как согласно второму закону термодинамики эксергитические потери минимальны, если процесс проводится при минимальной движущей силе. Другое направление связано с увеличением кинетических коэффициентов. Обсуждается новое поколение оборудования.

*Abstract:* The article considers two directions for increasing energy efficiency. One of them is associated with a decrease in the driving force, since according to the second law of thermodynamics the exergic losses are minimal if the process is carried out with a minimum driving force. Another direction is associated with an increase in the kinetic coefficients. A new generation of equipment is being discussed.

*Ключевые слова:* энергетическая эффективность, эксергия, разделение смесей, ректификация, гибридные процессы, каталитическая дистилляция

*Keywords:* energy efficiency, separation, exergy, rectification, hybrid processes, catalytic distillation

В настоящее время удовлетворение нужд населения, торговли, транспорта и промышленности в энергии осуществляется весьма неэффективно. Термодинамический анализ показывает, что средняя эффективность утилизации энергии составляет лишь одну десятую в индустриально развитых обществах и даже меньше, чем одна десятая в развивающихся странах. С инженерной точки зрения это весьма низкая эффективность и теоретический потенциал для улучшения огромен.

Так, в США была разработана Национальная энергетическая стратегия до 2030 г., при реализации инициатив которой промышленный сектор по сравнению с 2000 годом к 2030 году станет на 15 % энергетически более эффективным. В этом документе Департамент энергетики США отмечает, что благоприятная возможность экономии энергии в результате нового взгляда на производственные процессы, существует при рассмотрении отдельных энергоемких отраслей промышленности, таких как производство стали, а также в случае совершенствования технологических процессов, которые пронизывают многие отрасли промышленности, таких, например, как **процессы разделения смесей**. Рассмотрению именно этого раздела химической технологии, -энергоемким процессам разделения смесей,- в значительной мере посвящен настоящий доклад.

В России необходимость экономии энергии значительно больше, чем в США. Так, по данным НИИТЭХИМ в настоящее время энергопотребление на тонну продукции для таких продуктов как аммиак, метанол, карбамид примерно в 1,5 раза больше, чем в Европе и США, в процессах первичной переработки нефти в 1,7 раза, каталитического крекинга в 3,2 раза, гидрокрекинга в 2,2 раза.

Химическая промышленность относится к числу самых энергоемких производств, на ее долю приходится 15-16% всей электроэнергии, потребляемой перерабатывающей промышленностью в технически развитых странах

Особенности энергетики химической промышленности определяются не только широким ассортиментом первичных энергоресурсов, но также и необыкновенным разнообразием вторичных энергоресурсов, виды которых даже трудно перечислить. Выбор в этих условиях альтернативных технологических схем и их энергетическая оптимизация представляют значительные трудности, что не позволяет обходиться только энергетическими и тепловыми балансами. Отражением этих трудностей стало развитие и широкое применение эксергетического метода термодинамического анализа. Существо этого подхода сводится, в конечном счете, к анализу всех энергетических превращений на основе одновременного учета, как первого, так и второго начал термодинамики. Рассмотрение химико-технологического процесса с позиций эксергетического анализа отражает тот факт, что для практических нужд важна не энергия вообще, а лишь работоспособная ее часть – эксергия. Другими словами, учитывается качество энергии, определяющее ее работоспособность.

По оценкам, сделанным в середине 1990-х группой профессора Линхофф в Манчестерском университете, интеграция и термодинамическая оптимизация энергетических и материальных потоков крупных химических производств может дать существенную экономию общих энергозатрат: нефтехимические и неорганические производства – до 30 %, производство смол – до 25%, производство пищевых продуктов – до 25%.

Однако это всего лишь теоретические оценки предельных возможностей совершенствования конкретных процессов. Единая методология совершенствования химико-технологических процессов пока отсутствует.

Все же можно указать производства, в которых инновационная деятельность привела к резкому снижению удельных затрат энергии.

Классическим примером успешной энерготехнологической оптимизации является производство синтетического аммиака. В результате улучшения катализатора, внедрения турбокомпрессоров и создания интегральной энерготехнологической схемы процесса, в настоящее время удельные затраты энергии на тонну аммиака приблизились вплотную к теоретически возможной величине. По утверждению вице-президента фирмы BASF профессора Клауса Винтермантеля «инновационные кривые» ряда продуктов, таких как метанол, формальдегид в пределах их жизненного цикла подобны зависимости упомянутой для производства аммиака.

Отличительной особенностью анализа структуры химико-технологических процессов является наличие нескольких существенных критериев, не сочетающихся между собой. Примером является экономическая, массовая и энергетическая эффективность, надежность, безопасность, управляемость и другие. Это вносит в структуру промышленности высокую степень взаимосвязанности. Поэтому **локальное улучшение частных составляющих не обязательно приведет к улучшению работы всей системы.**

При непрерывном удорожании электроэнергии и таких энергоносителей, как газ и нефть, эффективное использование сырья и энергии становится жизненно важным. Необходима многоуровневая математическая модель химической промышленности для непрерывного техно-экономического анализа изменяющейся ситуации, оценки альтернативных технологий, учета влияния цен на продукты, сырье и энергоносители. Это верхний уровень модели.

Следующий уровень – анализ работы конкретных заводов. На этом уровне открывается возможность объективно сопоставить различные способы получения продуктов, найти источники потерь. К сожалению, конкуренция требует охраны «ноу-хау» и затрудняет эту работу.

Наконец, необходим третий уровень модели для описания работы отдельных процессов и аппаратов, включая реактор, и выбора оптимальных режимов. На этом уровне активно проводятся работы, как за рубежом, так и в России. Настоящий материал посвящен главным образом рассмотрению путей повышения энергетической эффективности процессов и аппаратов третьего уровня. Именно на этом уровне может быть сделан наибольший вклад в улучшение технологических процессов и повышение эффективности аппаратов.

### Разделение смесей

В химической технологии различают основные процессы, которые характеризуются изменением химического состава системы, и вспомогательные, такие как нагревание, охлаждение, перемешивание и т.п. К основным относятся процессы, протекающие в химических и биохимических реакторах и процессы разделения смесей.

Практически во всех прогнозах по развитию химии и химической технологии в первой трети 21 века упоминаются три наиболее важных области науки и техники – биотехнология, катализ и разделение смесей. Процессы разделения смесей в этот “short list” технологических приоритетов попали не случайно.

Потребность в совершенствовании методов разделения смесей не уменьшается со временем, а напротив, увеличивается особенно в последние десятилетия, когда к проблемам энерго- и ресурсосбережения добавились жесткие условия экологической безопасности химико-технологических производств.

Процессы разделения отличаются высокой энергоемкостью. На них расходуется около 7% общего годового энергопотребления развитых стран. Эффективность разделения смесей во многих случаях определяет уровень энергетических и капитальных затрат для всего процесса в целом, а также его экологическое совершенство и конкурентоспособность.

### Ректификация

Наиболее часто используемым методом разделения жидких или газовых смесей является ректификация, которая потребляет значительное количество энергии. Работы по замене ректификации другими методами разделения, такими, как абсорбция, жидкостная экстракция, кристаллизация из расплавов, мембранные процессы, привели лишь к решению отдельных конкретных проблем. Однако, мы все еще не имеем исчерпывающей методологии для нахождения оптимального, с точки зрения энергетической эффективности, процесса разделения для любой жидкой или газовой смеси.

Симпозиум по дистилляции с участием ряда международных экспертов, организованный в 2000 году Американским обществом инженеров-химиков, позволил сделать ряд важных выводов о перспективах развития процессов разделения в ближайшие два десятилетия. Анализ показал, что реальная альтернатива ректификации в настоящее время отсутствует, и она остается ключевым процессом для разделения, по крайней мере, на ближайшие 30 лет. Снижение затрат на разделение будет осуществляться за счет внедрения большого числа гибридных процессов, объединяющих два различных процесса - ректификацию с химической реакцией, с кристаллизацией, абсорбцией, жидкостной экстракцией, с мембранным разделением и т.п. Отдельные специалисты полагают, что до 20% классических ректификационных процессов будет заменено на гибридные.

Можно назвать более 20 различных методов разделения, которые за последние 30 лет конкурируют между собой, однако лидером рынка процессов разделения по-прежнему остается ректификация. Только в США сейчас работает около 40000 ректификационных колонн.

Альтернативные ректификации методы используются в ситуациях, когда стоимость дистилляции чрезмерно высока. Это обычно происходит, когда разделяются маленькие или очень большие молекулы. Маленькие молекулы можно определить как смеси молекул, в

которых каждый из компонентов имеет критическую температуру меньше примерно 50°C. Такие смеси не могут быть сконденсированы охлаждающей водой, даже если давление в ректификационной колонне повышенное. Для их разделения должна быть использована более сложная и дорогая криогенная ректификация. Вещества с молекулярной массой меньше примерно 40 иногда разделяют путем абсорбции жидким поглотителем, адсорбции на твердом сорбенте или в мембранных газоразделительных установках. Эти методы, в которых движущей силой является давление, целесообразно использовать в тех производствах, где газовая смесь уже находится под повышенным давлением. Примеры: разделение при обработке природного газа, производство аммиака или процессы газификации.

Большие молекулы можно определить как такие смеси, которые кипят выше 150°C даже когда абсолютное давление в аппарате меньше 20 миллибар (0,02 атм.). Смеси компонентов с молекулярной массой больше 130 попадают в эту категорию. В этом случае с дорогостоящей вакуумной ректификацией могут конкурировать жидкостная экстракция и кристаллизация из расплавов.

### Обратимая ректификация

Сейчас в мире активно развиваются два основных направления повышения энергетической эффективности разделения, которые я поясню на примере дистилляции.

В основе одного из этих направлений лежит идея уменьшения движущей силы процесса, так как, согласно второму закону термодинамики, эксергетические потери минимальны, если процесс проводится при минимальной движущей силе на всем протяжении разделительной колонны или реактора. Увеличение обратимости ректификации происходит с ростом числа теоретических ступеней разделения в колонне. С увеличением числа ступеней движущая сила уменьшается и в пределе она становится равной нулю. Рабочая и равновесная линия в этом случае совпадают, и число ступеней колонны становится бесконечным. Это предельный случай термодинамически обратимой ректификации.

При обратимой ректификации необходим дифференциальный подвод тепла и холода по высоте колонны. Вследствие этого основные источники потерь энергии – кипятильник в низу колонны и конденсатор вверху – отсутствуют, в каждом сечении колонны имеет место равновесие фаз, массо- и теплообмен в этих условиях не происходит, а, следовательно, отсутствует диссипация энергии. Обратимая ректификация бинарных смесей впервые была рассмотрена Хаузенем в 1932 г. и Бенедиктом в 1947 г., а математическое описание ее для случая многокомпонентных смесей в 1950 -1960-х гг. было разработано в России Феликсом Петлюком.

Модель термодинамически обратимой ректификации служит отправной точкой для создания аппаратов и схем разделения с низким потреблением энергии. Так, например, в колонне со связанными тепловыми и материальными потоками боковая колонна работает без кипятильника и дефлегматора, питаясь жидкостью и паром основной колонны и возвращая эти потоки в соответствующее место по высоте основной колонны. Такая конструкция позволяет существенно сократить потери энергии.

Следует упомянуть еще одну принципиально новую конструкцию - колонну с разделяющей стенкой. Здесь две колонны как бы вложены одна в другую, в одном корпусе. В основной части колонны (кроме верха и низа) установлена непроницаемая стенка, слева и справа от которой расположены массообменные тарелки или слои насадки. Такая колонна позволяет экономить энергию, производственные площади и металл.

### Многокомпонентные системы

Особое внимание, уделяемое последнее десятилетие во всем мире схемам со связанными тепловыми и материальными потоками объясняется тем, что эти схемы позволяют получить значительное снижение энергозатрат при многокомпонентной ректификации.

Идея с промежуточным по высоте колонны отбором жидкости и пара непосредственно в другую колонну и сокращение числа кипятильников и дефлегматоров, в которых происходят наибольшие потери энергии, оказалась необычайно плодотворной применительно к многокомпонентной ректификации. Если для трехкомпонентной смеси число кипятильников и дефлегматоров можно сократить вдвое, то для 5-компонентной смеси уже в четыре раза. Это направление энергосбережения развивается в последние годы в ряде стран, обеспечивая снижение энергозатрат на 30-40%, а также сокращение капитальных затрат. К сожалению, в России эти работы ведутся малыми темпами.

Особые трудности при выборе оптимальной энергосберегающей схемы разделения возникают в случае многокомпонентных смесей. Число возможных вариантов технологических схем с ростом числа компонентов резко растет. Если для разделения трехкомпонентной смеси таких вариантов всего два, то в случае 6-компонентов их уже 42, а для 10 компонентов – 4862 варианта.

Если же в некоторых случаях составляющими технологической схемы разделения является не ректификационная колонна, а иные методы разделения (в случае гибридных процессов), то число возможных вариантов технологических схем будет еще больше.

### Гибридные процессы и кинетические коэффициенты.

Следует признать, что мы до сих пор не имеем надежных методов идентификации энергетически оптимальной технологической схемы в случае, когда наряду с дистилляцией необходимо использовать альтернативные методы разделения для создания гибридных схем, объединяющих два и более различных методов.

В химической промышленности чаще всего каждую технологическую операцию осуществляют в отдельном аппарате. Это основной принцип ПАХТ (Unit Operations), сформулированный еще в 1913 г. И.А. Тищенко. Однако в последние десятилетия все чаще появляются процессы, не укладывающиеся в эту схему. Это гибридные процессы, в которых удается оптимальным образом объединить несколько процессов в одной комбинированной схеме. Гибридные процессы, протекающие одновременно в одном и том же аппарате, называются совмещенными. Для совмещенных процессов характерно снижение как энергетических, так и капитальных затрат.

При создании гибридных и, в особенности, совмещенных процессов значительную роль начинают играть проблемы интенсификации тепло- и массообмена. Это второе направление повышения энергетической эффективности химико-технологических процессов. Оно ставит целью увеличение кинетических коэффициентов, так как снижение движущих сил, о котором говорилось выше, приводит к увеличению размеров колонн, реакционного пространства или к уменьшению степени превращения.

### Каталитическая дистилляция

Оптимальное значение степени превращения, которое уравнивает стоимость реактора, блока разделения и сырья не может быть найдено путем расчета и анализа любой из подсистем реактор – блок разделения в отдельности. Поэтому перспективными являются процессы, в которых в одном аппарате совмещают химические превращения и разделение образовавшейся смеси. В первую очередь это относится к такому реакционно-массообменному процессу как каталитическая дистилляция.

Ярким примером практического применения совмещенного реакционно-ректификационного процесса, каталитической дистилляции, - является пуск установки получения метилацетата компанией «Истмэн Кемикал» в США в 1990 г.

Получение высокочистого метилацетата на основе реакции этерификации уксусной кислоты с метанолом затруднено из-за ограничений химического равновесия системы, сложности разделения уксусной кислоты и воды, а также существования азеотропов между метилацетатом и метанолом и между метилацетатом и водой. Этот процесс требует больших капиталовложений, высоких энергозатрат и большого количества растворителей. Применение совмещенного процесса позволило профессору Агрееда и его коллегам заменить 8 дистилляционных колонн, 1 жидкостной экстрактор, 1 отстойник и связанные с ними теплообменники, насосы, емкости, контрольные системы одной колонной каталитической дистилляции.

Колонна является фактически целым химическим заводом в одной установке, производящим 180 тыс. тонн высокочистого метилацетата в год. Этот процесс исключительно экономичен, требует только одну пятую часть капиталовложений и потребляет только одну пятую часть энергии традиционного процесса. Преимущества каталитической дистилляции заключаются в том, что достигается практически полная конверсия реагентов, увеличивается селективность и обеспечивается снижение энергопотребления в 1,5–2 раза.

#### Каталитическая дистилляция и разделяющая стенка

В январском выпуске 2007 года журнала Chemical Engineering Research and Design появилось сообщение о создании и испытании реакционно-ректификационной колонны с разделяющей стенкой. Работа выполнена совместными усилиями фирм Зульцер и БАСФ АГ Людвигсгафен (бывшая IG Farbenindustrie), а также Штуттгартским университетом.

В качестве модельной системы использовали реакцию гидролиза метилацетата, представляющую интерес в производстве поливинилового спирта. Каталитическая дистилляция была использована потому, что она позволяет для обратимых реакций повысить конверсию путем непрерывного отвода продуктов.

Принцип создания комбинированной колонны таков. Продукты – метанол и уксусная кислота, а также оставшаяся вода удаляются из куба колонны каталитической дистилляции, и для выделения метанола требуется еще одна ректификационная колонна. Объединение двух колонн в одной колонне с разделяющей стенкой позволяет уменьшить общее число колонн и, вследствие кратковременного контакта фаз, минимизировать обратную реакцию с образованием метилацетата и получить чистый продукт, в дополнение к экономии энергии и металла. Фирма Зульцер уже успела построить и испытать колонну промышленного масштаба.

#### От макротехнологии к микротехнологии

Совмещенные процессы, каталитическая дистилляция, колонна с разделяющей стенкой относятся к новым разработкам. Оценка числа действующих колонн с гетерогенно-каталитической дистилляцией показывает, что в 2000 году их насчитывалось в мире всего 100, в 2010 году по оценкам их было уже около 1000. Реакционно-ректификационные колонны с разделяющей стенкой существует пока в нескольких экземпляре.

Я подробно остановился на совмещенных процессах не только потому, что они с успехом нарушают основной принцип классических процессов и аппаратов – каждому процессу свой аппарат. В совмещенных реакционно-массообменных аппаратах создается наиболее широкая возможность для физико-химической интенсификации процессов превращения и разделения. Это определит основные особенности аппаратов следующего поколения, а эти аппараты уже существуют.

Вот характеристики двух газо-жидкостных микрореакторов: аппарат со стекающей пленкой и барботажная колонна. Удельная межфазная поверхность для них составляет соответственно  $27000 \text{ м}^2/\text{м}^3$  для пленочного аппарата и  $15000 \text{ м}^2/\text{м}^3$  для барботажного реактора. Размер рабочих каналов имеет сечение  $100 \times 300 \text{ мкм}$ .

При переходе от макротехнологии к микротехнологии с использованием двухфазных газо(паро)-жидкостных микрореакторов и разделительных систем направление, связанное с повышением энергетической эффективности за счет физико-химической интенсификации, по-видимому, станет основным.

Из-за большой величины отношения поверхности раздела к объему контактирующих фаз в микрореакторах поверхностные силы (такие как поверхностное натяжение) становятся более важными, чем объемные силы (например, инерционные силы, включая гравитацию). Поэтому такие, возникающие на молекулярном уровне явления, как эффект Марангони, химическая турбулентность, приводящие к синергетическим эффектам и не требующие больших затрат энергии, могут быть использованы как мощное средство интенсификации массо- и теплообмена. Физико-химические методы позволяют вторгаться в тончайший слой у границы раздела фаз, где сосредоточено основное сопротивление процессам переноса, интенсифицируя процесс без существенных затрат энергии.

### Заключение

Процессы разделения смесей динамично развиваются во всем мире. В России эта область переживает значительные трудности из-за отсутствия связи науки и производства и подчиненного положения в академических планах. Карл Бош в своей Нобелевской речи в 1932 году подчеркивал, что, отдавая должное химическим превращениям, для достижения желаемого эффекта необходимо принимать во внимание «оптимальный расчет и проектирование всей технологической цепочки в целом». В современных условиях реактор и разделительная колонна объединены и составляют единый комплекс, все чаще один аппарат.

Для повышения энергетической эффективности химико-технологических процессов необходимо уделять значительное внимание ускоренному развитию научных основ и совершенствованию техники разделения смесей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-03-00608.

УДК 677.074

**РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ  
RESOURCES AND ENERGY SAVING IN INDUSTRIAL TECHNOLOGIES****Станислав Павлович Рудобашта  
Stanislav P. Rudobashta**

*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени  
К.А. Тимирязева, Россия, Москва  
Russian state agrarian University – MAA after K. A. Timiryazev, Russia, Moscow  
(e-mail: rudobashta@mail.ru)*

*Аннотация:* Рассмотрено ресурсо- и энергосбережение при создании промышленных технологических процессов, в частности, на примере тепломассообменных процессов. Обсуждена проблема точности кинетического расчета аппаратов, от которой зависит металлоемкость оборудования. Проанализированы пути энергосбережения в процессе сушки.

*Abstract:* Resource and energy saving is considered when creating industrial technological processes, in particular, using the example of heat and mass exchange processes. The problem of the accuracy of the kinetic calculation of devices, on which the metal content of the equipment depends, is discussed. The ways of energy saving during the drying process are analyzed.

*Ключевые слова:* ресурсосбережение, энергосбережение, кинетический расчет, металлоемкость, оборудование, сушка, экстрагирование.

*Keywords:* resource saving, energy saving, kinetic calculation, metal consumption, equipment, drying, extraction.

**Введение.**

При создании промышленных производств необходимо учитывать ряд требований, среди которых одними из основных являются обеспечение условий энерго- и ресурсосбережения. Под ресурсосбережением понимается не только исключение или сведение к минимуму отходов, брака или производство продукции, не в полной мере отвечающей требованиям качества, но и правильный выбор промышленного оборудования, задействованного в производстве, которое должно обеспечить заданную производительность технологической линии (или аппарата) и не обладать излишней металлоемкостью.

При проектировании аппаратов возможны ошибки двоякого рода:

1) выбирается аппарат недостаточный по рабочему объему, что приводит к снижению его производительности, а если он стоит в технологической линии, то он становится узким местом, снижающим производительность всей линии. Это приводит к тому, что надолго затягивается ввод нового производства в эксплуатацию, т.к. требуется длительная отладка линии с тем, чтобы вывести производство на заданную производительность;

2) во избежание этого просчета проектировщики часто берут аппарат с большим запасом по производительности, что имеет следствием завышенную его металлоемкость. В этом случае запроектированный аппарат не удовлетворяет требованию ресурсосбережения.

Габариты аппарата, обеспечивающего заданную производительность, определяются в результате его кинетического расчета. Поэтому разработка уточненных методов кинетического расчета аппаратов представляет собой важную задачу, направленную на выполнение требования ресурсосбережения и повышение надежности проектирования.

Качество промышленного оборудования зависит от трех составляющих: 1) качества выбранного проектного решения, 2) качества выполнения проекта, 3) качества изготовления и монтажа оборудования.

В этой связи уместно упомянуть следующий факт из производственной деятельности А.Н. Косыгина, как председателя Совета Министров СССР, памяти которого посвящен данный форум. Когда в 60-е-70-е годы прошлого столетия осуществлялось поднятие

мукомольного производства страны на более высокий уровень и требовалось, в связи с этим, наладить производство новых более производительных и более энергетически совершенных зерносушилок, то он, понимая производственную ситуацию, поручил их проектирование и производство не предприятиям продовольственного машиностроения, а предприятиям оборонной промышленности, на которых уровень проектирования и изготовления оборудования был более высоким.

Другой, наряду с ресурсосбережением, не менее важной задачей совершенствования технологических процессов является энергосбережение. Оно регламентируется Федеральным законом об энергосбережении [1]. Обе задачи взаимосвязаны и требуется их комплексное решение. Ресурсосбережение за счет экономии перерабатываемых (обрабатываемых) веществ специфично для каждого конкретного производства, поэтому его обсуждать не будем. Ресурсосбережение же за счет более точного расчета аппаратов имеет общий характер, поэтому остановимся на нем подробнее.

#### **Кинетический расчет аппаратов.**

Общим уравнением, определяющим зависимость рабочего объема аппарата от его производительности является следующее [2]

$$V_p = \frac{G \tau}{\rho(1 - \varepsilon)}, \quad (1)$$

где  $V_p$  - рабочий объем аппарата, м<sup>3</sup>;  $G$  - расход вещества, обрабатываемого в аппарате, кг/с;  $\tau$  - необходимое время пребывания вещества в аппарате, с;  $\rho$  - плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  - доля рабочего объема аппарата, занятого веществом. Знание времени  $\tau$  позволяет определить рабочий объем аппарата, поэтому кинетический расчет направлен на его нахождение.

В настоящее время для кинетического расчета аппаратов применяется большое количество разнообразных методов, которые в [3] классифицированы следующим образом: 1) эмпирические; 2) полуэмпирические; 3) математические или теоретические (аналитические и численные). Последние, в частности, при расчете тепломассообменных процессов основаны на решениях дифференциальных уравнений тепломассообмена и гидродинамики и используют данные по теплофизическим характеристикам, являющимся справочными величинами. Сложность математического описания того или иного процесса и отсутствие данных по его физическим характеристикам не позволяет во многих случаях применять чисто математические методы кинетического расчета и заставляет использовать различные упрощения.

Эмпирический метод описания кинетики состоит в том, что в лабораторных или промышленных условиях ставится физический эксперимент по изучению влияния варьируемых технологических и конструктивных параметров на продолжительность процесса, а обработка полученных опытных данных осуществляется на основе регрессионных моделей, никоим образом не связанных с физикой процесса. Этот подход к описанию кинетики не основывается на фундаментальных теоретических положениях, существенных для процесса, протекающего в аппарате, а реализует модель "черного ящика". Главным недостатком эмпирических методов является низкая точность и надежность при переходе от результатов лабораторных исследований к расчету промышленного аппарата, т.к. при этом не учитываются изменения в гидродинамике и конструкции аппарата. Формальное перенесение результатов лабораторного изучения процесса на промышленный объект без должного физически обоснованного учета изменения условий его протекания является одной из причин, порождающих проблему масштабного перехода [4].

К полуэмпирическим методам кинетического расчета в [3] отнесены те методы, в основу которых в целях упрощения задачи при построении математической модели и ее реализации используются не физические характеристики, которые являются справочными величинами, а опытные коэффициенты, находимые путем физического моделирования

процесса, протекающего в аппарате, в лабораторных или промышленных условиях. Отличие от эмпирических методов состоит в том, что в данном случае в основу математического описания закладывается модель, базирующаяся на фундаментальных теоретических положениях, но в которой в силу трудностей ее реализации делаются те или иные упрощения. Процессы сушки, например, достаточно сложны для описания на основе чисто математических моделей, поэтому полуэмпирические методы кинетического расчета сушилок получили большое распространение при ее описании, они рассмотрены в [3].

Математические методы кинетического расчета основаны на решениях дифференциальных уравнений, описывающих процесс, и используют данные по физическим характеристикам, существенным для него. Для решения дифференциальных уравнений используются при этом аналитические или численные методы. Достоинством аналитических методов является их прозрачность для анализа процесса, кроме того, при их применении в кинетическом расчете не требуется «прогонять» весь путь изменения целевой функции в процессе, как при численном расчете. Следует отметить, что в настоящее время повсеместное распространение персональных компьютеров, наличие эффективных программ, которые можно использовать для вычислений по тем или иным математическим моделям позволяет без затруднений реализовать математические методы кинетического расчета даже в случае сложных и громоздких математических описаний. Поэтому роль математических методов кинетического расчета неуклонно возрастает. Необходимым условием для их применения является наличие данных по физическим характеристикам процесса, которые, к сожалению, не всегда имеются.

Проиллюстрируем некоторые математические модели, на основе которых может быть определено необходимое время пребывания материала в аппарате. Рассмотрим в качестве примера математическое описание кинетики массопереноса в системе с твердой фазой на основе уравнения массопроводности (эффективной диффузии)

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \operatorname{div}(k(u) \operatorname{grad} u). \quad (2)$$

Здесь  $u$  – локальное влагосодержание материала, кг/кг;  $\tau$  – время, с;  $k$  – коэффициент массопроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ , зависящий от массосодержания и температуры.

Уравнение (2) нелинейно, его аналитические решения имеются только для некоторых частных случаев. Однако, в инженерной практике применим зональный метод кинетического расчета [5], в соответствии с которым весь диапазон изменения концентрации в твердой фазе в процессе разбивается на ряд интервалов, в каждом из которых используется решение линейного дифференциального уравнения массопроводности. Это позволяет учесть изменение коэффициента массопроводности и других параметров в ходе процесса.

Решение уравнения массопроводности зависит от формы тела, начального и граничного условий и, в частности, для сферического тела при  $k = \text{const}$ , граничном условии массообмена третьего рода и постоянной начальной концентрации имеет вид [5]

$$\bar{E} = \frac{\bar{u}(\tau) - u_p}{u_n - u_p} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{6\text{Bi}_m^2}{\mu_m^2 (\text{Bi}_m^2 + \mu_m^2 - \text{Bi}_m)} \exp(-\mu_m^2 \text{Fo}_m). \quad (3)$$

Здесь  $\text{Bi}_m$  – число Био массообменное;  $\text{Fo}_m = k\tau/R^2$  – число Фурье массообменное, которое содержит искомое время  $\tau$ ;  $\mu_m > 0$  – корень характеристического уравнения решения задачи. Аналогичный вид имеют решения и для тел другой формы.

Решения линейного ( $k = \text{const}$ ) уравнения массопроводности на основе зонального метода используются для инженерного расчета различных процессов массопереноса, методика и примеры расчета приведены в [5,6].

При сушке материала имеет место взаимосвязанный тепломассоперенос, который описывается дифференциальными уравнениями А.В. Лыкова [7]

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \operatorname{div} [k(u, t)(\operatorname{grad} u + \delta_t(u, t)\operatorname{grad} t)], \quad (4)$$

$$c\rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda(u, t)\operatorname{grad} t) + q\rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (5)$$

где  $t$  – температура, °С;  $\tau$  – время, с;  $\delta_t$  – относительный коэффициент термовлагопроводности, 1/К;  $c$  – массовая теплоемкость, Дж/(кг К);  $\rho_0$  – плотность абсолютно сухого материала, кг/м<sup>3</sup>);  $q = \varepsilon^* r^*$  – действующий внутри тела источник внутренних фазовых превращений, Дж/м<sup>3</sup> К);  $\varepsilon^*$  – локальный критерий внутренних фазовых превращений, кг/кг;  $r^*$  – теплота парообразования, включая теплоту десорбции влаги, Дж/кг.

Для расчета процессов сушки и экстрагирования с использованием коэффициента массопроводности необходимы данные по этому коэффициенту, который является функцией массосодержания и температуры:  $k = f(u, t)$ . Для определения коэффициента массопроводности предложены различные методы [5], из которых наиболее удобным является зональный, основанный на использовании решения линейного дифференциального уравнения массопроводности вида (3) в регулярном режиме процесса, когда он описывается одним членом ряда в решении. Описанный в [5] зональный метод определения этого коэффициента предполагает исключение внешнего диффузионного сопротивления за счет создания большой скорости обтекания тела внешней фазой, что не всегда выполнимо. В [8] предложен метод, который не требует выполнения этого условия, он позволяет одновременно определить из кривой кинетики коэффициент массоотдачи и концентрационную зависимость коэффициента массопроводности. Этим методом в [8,9] впервые удалось определить указанные коэффициенты в процессе промывки тканей водой (табл. 1), что дает возможность рассчитывать кинетику этого процесса математическим методом.

В настоящее время зависимости  $k = f(u, t)$  применительно к процессу сушки получены практически для всех промышленно выпускаемых полимеров (порядка полтора десятка полимеров) [5,6,10], что позволяет применять математический метод кинетического расчета процесса сушки этих материалов на практике. Имеются данные по этим зависимостям также для различных высушиваемых капиллярно-пористых и коллоидных капиллярно-пористых материалов, получены обобщающие зависимости, которые позволяют рассчитать значения этого коэффициента по структурным параметрам материала [5]). Накапливаются данные по коэффициенту массопроводности при сушке для различных видов зерна (например, [11,12]). Это позволяет использовать эти данные в инженерной практике для кинетического расчета и численного моделирования процесса сушки на основе математических моделей.

**Таблица 1. Определение коэффициента массопроводности  $k$  зональным методом при промывке шерстяной и хлопчатобумажной тканей**

Номер конц. зоны	1	2	3
Шерстяная ткань [8]			
$(\bar{u}_{н.и} - \bar{u}_{к.и}) \cdot 10^2$ , кг/кг с. м.	1,09-0,795	0,795-0,34	0,34-0,31
$k_i \cdot 10^9$ , м <sup>2</sup> /с	1,69	1,62	1,39
$Bi_m$	8,19	8,71	2,10
Хлопчатобумажная ткань средней плотности [9]			
$(\bar{u}_{н.и} - \bar{u}_{к.и}) \cdot 10^2$ , кг/кг с. м.	0,0995-0,0765	0,0765-0,0645	0,0645-0,0475
$k_i \cdot 10^9$ , м <sup>2</sup> /с	1,26	0,53	1,55
$Bi_m$	29,7	69,7	76,7

Как видно из уравнений (4), (5), для описания кинетики процесса на основе этих уравнений требуются данные не только по коэффициенту массопроводности, но и по другим теплофизическим характеристикам. Сведения по многим из них для пищевых продуктов и материалов собраны в [13]. Отметим попутно, что при глубокой сушке гранулированных полимеров, которая в обязательном порядке осуществляется перед их переработкой в изделия на литьевых и шприц-машинах, из-за чрезвычайно медленной диффузии молекул воды в полимере нагрев гранул в процессе сушки происходит намного быстрее диффузии и в результате реализуется так называемый «балансовый» режим теплообмена [5], при котором температура гранулы практически равна температуре сушильного агента в ее окрестности. Это исключает необходимость расчета поля температур по уравнению (5), что весьма упрощает расчет.

Аналитический расчет процессов экстрагирования вещества из твердой фазы также осуществляется на основе линейного дифференциального уравнения массопроводности (эффективной диффузии). Для этого используются как зональный метод кинетического расчета на основе решений, полученных при постоянной концентрации распределяемого вещества во внешней фазе [5,6], так и решения, найденные при совместном рассмотрении дифференциального уравнения массопроводности и уравнения материального баланса аппарата – для случаев прямотока, противотока и для периодического процесса [14,15]. Отметим, что зависимость коэффициента массопроводности от концентрации и изменение других характеристик в ходе процесса также вынуждают в большинстве случаев применять зональный метод расчета [15].

Банк работ, в которых получены аналитические решения задач массопроводности для различных случаев массообмена непрерывно пополняется. В последнее время получены аналитические решения для процесса экстрагирования вещества из тел различной формы (пластина, шар, цилиндр) в полунепрерывном процессе (периодическом по твердой фазе и непрерывном по жидкой фазе). В частности, решение для цилиндрических тел, находящихся в экстракторе, имеет вид [16]

$$\bar{W}_2(Fo_m) = 4 \left( \frac{Bi_m}{1 + Bi_m \gamma_p} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-\mu_n^2 Fo_m)}{\left[ \mu_n^2 + \left( \frac{Bi_m}{1 + Bi_m \gamma_p} \right)^2 \right] \mu_n^2}, \quad (6)$$

где  $\bar{W}_2 = \frac{\bar{u}(\tau) - A_p C_{c.вх}}{u_n - A_p C_{c.вх}}$  – относительная концентрация распределяемого вещества в твердой фазе (средняя по объему тела) в момент времени  $\tau$ ;  $A_p = u_p / C_c$  – коэффициент распределения функции концентрационного фазового равновесия, (кг/(кг сухого материала))/(кг/м<sup>3</sup>);  $C_{c.вх}$  – концентрация распределяемого вещества во внешней фазе на входе в аппарат, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_p = (2GA_p k)/(V_\tau R^2)$  – параметр процесса;  $G$  – масса твердых тел, загруженных в аппарат;  $V_\tau$  – расход экстрагента, м<sup>3</sup>/с;  $R$  – радиус цилиндрического тела, м;  $\mu_n > 0$  – корни уравнения:  $\mu_n J_1(\mu_n) - Bi_m^* J_0(\mu_n) = 0$ .

На рис. 1 приведены результаты расчета, выполненного по уравнению (6), которые показывают влияние относительного расхода жидкой фазы на кинетику процесса и иллюстрируют возможности математической модели для анализа процесса.

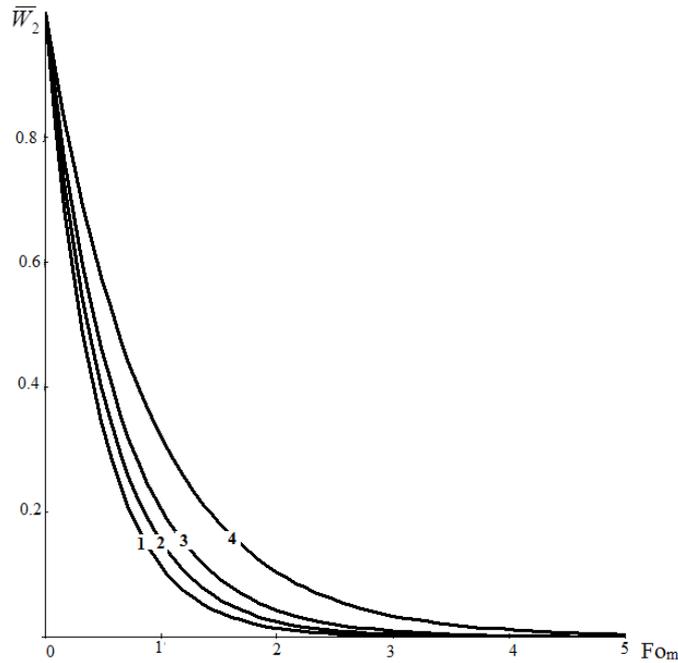


Рис.1. Зависимости  $\bar{W}_2 = f(Fo_m)$ : 1 -  $\gamma_p = 0,15$ ; 2 -  $\gamma_p = 0,3$ ; 3 -  $\gamma_p = 0,5$ ; 4 -  $\gamma_p = 1$ .

Примером новых аналитических решений, полученных в последнее время для совместно протекающих процессов тепло-и массообмена, могут служить уравнения, описывающие динамику нагрева тел различной формы в условиях осциллирующего электромагнитного энергоподвода с учетом испарения из них влаги [17,18]. Так, для тел сферической формы решение имеет вид [18].

$$W(\xi, Fo) = W_1(\xi, Fo) + W_2(\xi, Fo) + W_3(\xi, Fo), \quad (7)$$

$$\bar{W}(Fo) = 3 \int_0^1 y W(y, Fo) dy, \quad (8)$$

где

$$\bar{W}_1(Fo) = \frac{6Bi^2 N_0}{(Bi-1)^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + (Bi-1)^2) \cos^2(\mu_n)}{\mu_n^2 (\mu_n^2 + Bi(Bi-1))} \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (9)$$

$$\bar{W}_2(Fo) = -\frac{6\theta_0 Bi}{(Bi-1)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + (Bi-1)^2) \cos(\mu_n) A_n(\mu^*) \psi_n(Fo)}{\mu_n (\mu_n^2 + Bi(Bi-1))}, \quad (10)$$

$$W_3(Fo) = -\frac{6Bi}{(Bi-1)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + (Bi-1)^2) \cos(\mu_n) A_n(0) D_n}{\mu_n (\mu_n^2 + Bi(Bi-1))} \exp(-\mu_n^2 Fo) \quad (11)$$

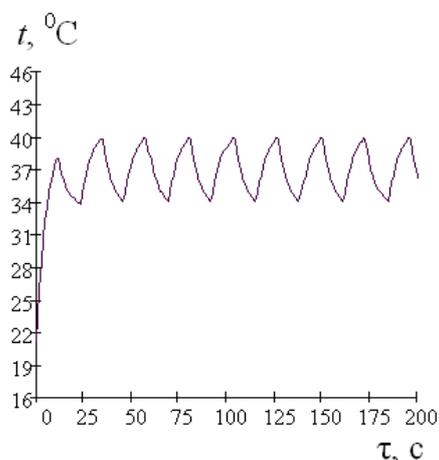
$$\bar{W}(\mu_n, Fo) = \int_0^1 \xi W(\xi, Fo) \sin(\mu_n \xi) d\xi, \quad W(\xi, Fo) = \frac{(t(r, \tau) - t_c) + (r^*/\alpha)i(\tau)}{t_H - t_c}; \quad \xi = \frac{r}{R}; \quad Fo = \frac{a\tau}{R^2};$$

$$\theta_0 = \frac{W_0 R^2}{a(t_H - t_c)}; \quad W_0 = \frac{\mu^* q_0 A}{c\rho}; \quad \mu_n > 0 - \text{корни уравнения: } \text{ctg}\mu = \frac{\mu}{Bi}; \quad N_0 = \frac{(t_H - t_c) + (r^*/\alpha) \cdot i(0)}{t_H - t_c};$$

$$i(\tau) = \frac{\rho_0 Lu a(u_H - u_p)}{3R} \sum_{k=1}^{\infty} B_k^* \exp(-\beta_k^2 Lu Fo) - \text{интенсивность сушки, выраженная из решения}$$

$$\text{задачи массопроводности; } Lu = k/a; \quad B_k = \frac{6Bi_m^2}{\beta_k^2 (Bi_m^2 + \beta_k^2 - Bi_m)}; \quad B_k^* = B_k \beta_k^2 \cdot \beta_k - \text{корни}$$

уравнения  $\operatorname{tg} \beta = \frac{\beta}{1 - \operatorname{Bi}_m}$ ;  $r$  – радиальная координата;  $R$  – радиус сферического тела, м;  $a$  – коэффициент температуропроводности тела,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи поверхности тела,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ ;  $t_n$  – начальная температура тела,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_c$  – температура воздушной среды, обдувающей тело,  $^\circ\text{C}$ ;  $u_n, u_p$  – начальное и равновесное влагосодержание тела,  $\text{кг}/\text{кг}$ .



**Рис. 2. Расчет динамики нагрева семян лука репчатого при их сушке в псевдооживленном слое при комбинированном конвективном и осциллирующем инфракрасном энергоподводе:  $t_{\min} = 34^\circ\text{C}$ ,  $t_{\max} = 40^\circ\text{C}$ ,  $\tau_n = 23$  с;  $t_n = 18^\circ\text{C}$ ;  $t_c = 33^\circ\text{C}$ ;  $q_0 = 2000$   $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $\alpha = 109$   $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ ;  $\beta_c = 0,105$   $\text{м}/\text{с}$ .**

На рис. 2 показана динамика комбинированного (конвективного и осциллирующего инфракрасного) нагрева сферической частицы при ее сушке в псевдооживленном слое. Как видно из рисунка, показанный режим обеспечивает рекомендованный в [19] интервал осцилляций температуры частицы от  $t_{\min} = 34^\circ\text{C}$  до  $t_{\max} = 40^\circ\text{C}$  (этот режим обеспечивает не только сохранение посевных качеств семян, но и их стимуляцию, проявляющуюся в существенном увеличении их энергии прорастания и всхожести).

#### Энергосбережение.

Вопросам энергосбережения, в соответствии с Федеральным законом об энергосбережении [1], в настоящее время уделяется большое внимание в различных промышленных технологиях. Несмотря на это, многие из них по-прежнему весьма энергоемки. Это объясняется многими причинами, в том числе и тем, что при их создании в советское время стоимость энергоносителей была заниженной, экономические отношения были деформированы и не отражали фактического соотношения затрат на различные стороны производства. В эксплуатации все еще продолжает находиться оборудование, созданное в советское время, связанное с перекосом цен при его создании.

Одним из наиболее энергоемких процессов является сушка, поэтому остановимся на ней подробнее. Еще в 1956 г. академик А.В. Лыков писал, что, на сушку тратится более 12% топлива, добываемого в стране [20]. С той поры прошло 60 лет, однако эти данные не устарели. Так, в [21,22] отмечалось (соответственно, 2004 и 2007 гг.), что термическая сушка уже давно признана одной из энергоемких операций в цепочке обработки материалов и что доля энергии, затрачиваемой на этот процесс в промышленном использовании, колеблется от 10 до 25%, хотя в некоторых отраслях промышленности, согласно данным этих источников, она намного выше, достигая 35% в производстве бумаги и даже 50% в технологиях отделки тканей. Прогнозируется дальнейшее увеличение долевых затрат энергии при сушке, это объясняется тем, что почти 99% технических производств связано с удалением воды путем

ее испарения. Такое высокое потребление энергии при сушке обусловлено большой теплотой парообразования воды, равной 2500 кДж/кг при 0°C.

Проводимые в нашей стране процессы сушки различных материалов все еще характеризуются неоправданно большими энергозатратами, что показывает актуальность данного вопроса. Чрезмерность энергозатрат при сушке в нашей стране проистекает от применения устаревших, не отвечающих современным требованиям сушильных установок, отсутствием государственного контроля (или какого-либо другого надзорного органа) за поставками на отечественный рынок импортного сушильного оборудования, часто устаревшего, низким уровнем контроля технологических параметров и средств автоматизации сушилок, упадком отечественной машиностроительной промышленности, занимающейся выпуском сушильного оборудования, резким сокращением в нашей стране в последние годы по известным причинам технологических исследований и конструкторских разработок в области сушильной техники. Технические характеристики сушилок, заявляемые в рекламных проспектах фирм, нередко не соответствуют реальным характеристикам и приводятся единственно с рекламной целью.

Анализ показывает [23], что основная часть теплоты при конвективной сушке теряется с отработанным сушильным агентом (15...40% от общих энергозатрат на сушку), прочие тепловые потери (через корпус сушилки, на нагрев транспортных средств и др.) составляют 8...30%. Однако, в различных отраслях производства долевая часть этих теплопотерь в сушилках существенно отличается, что объясняется не только различным техническим уровнем сушильной техники в отраслях, но и спецификой производств. Поэтому сравнивать по энергетическим показателям можно только сушилки в одной и той же отрасли при высушивании одного и того же материала.

Основными путями снижения теплопотерь в сушильном оборудовании являются [24]: 1) предварительное механическое обезвоживание материала или обезвоживание путем выпаривания (последний процесс, как показывает анализ [22], энергетически более выгоден, чем сушка), 2) улучшение структуры потока твердой фазы, 3) частичная рециркуляция сушильного агента, 4) рекуперации теплоты отработанного сушильного агента или высушенного материала в теплообменниках-рекуператорах, 5) более совершенная теплоизоляция корпуса сушилки, 6) интенсификации процесса сушки, если она не сопровождается дополнительными энергозатратами, 7) применение тепловых насосов, позволяющих использовать даровую низкопотенциальную теплоту грунта, водоемов или атмосферного воздуха.

Ресурсы снижения энергозатрат имеются в различных промышленных технологиях и предстоит еще большая работа по повышению их энергетической эффективности

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», 23 ноября 2009 г.

2. *Плановский А. П., Николаев П. И.* Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1987. 496 с.

3. *Рудобаица С.П.* Математическое моделирование процесса конвективной сушки дисперсных материалов // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2000. № 4. С. 98.

4. Масштабный переход в химической технологии. Разработка промышленных аппаратов ме тодом гидродинамического моделирования / Под ред. Розена А.М. М.: Химия, 1980. 319 с.

5. *Рудобаица С.П.* Массоперенос в системах с твердой фазой / под ред. Плановского А.Н. М.: Химия, 1980. 248 с.

6. *Рудобаица С.П., Карташов Э.М.* Диффузия в химико-технологических процессах. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: КолосС, 2010. 479 с.

7. *Лыков А. В.* Теория сушки. Изд. 2-е. М.: Энергия, 1968. 470 с.

8. Рудобаица С.П., Кошелева М.К. Определение коэффициентов массоотдачи и массопроводности из кривых кинетики // Технология текстильной промышленности. 2015. № 6 (360). С. 175.
9. Рудобаица С.П., Кошелева М.К. Определение кинетических коэффициентов в процессах сушки и термовлажностной обработки материалов // Тез. докл. и сообщ. XVго Минского международного форума по тепло- и массообмену. Т. 3. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова, 2016. С. 195.
10. Рудобаица С.П., Дмитриев В.М. Кинетика и аппаратурно - технологическое оформление конвективной сушки дисперсных полимерных материалов // Инж.- физ. журнал. 2005. Т.78. № 3. С. 51.
11. Рудобаица С.П., Моряков А.А., Дмитриев В.М. Массопроводность семян рапса при сушке // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 8. С.42.
12. Рудобаица С.П., Г.А. Зуева Г.А., Дмитриев В.М., Зув Н.А. Массопроводность при сушке коллоидных капиллярно-пористых материалов. Известия вузов. Химия и хим. технология. 2014. Т.57. С. 103.
13. Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов. Справочное пособие / Под ред. Гинзбурга А.С. М.: Пищевая промышленность, 1975. 224 с.
14. Аксельруд Г. А. Массообмен в системе твердое тело-жидкость. Издательство Львовского университета, 1970. 188 с.
15. Аксельруд Г.А., Лысянский В.М. Экстрагирование. Система твердое тело-жидкость. Л.: Химия, 1974. 255 с.
16. Рудобаица С.П., Кошелева М.К., Карташов Э.М. Математическое моделирование процесса экстрагирования целевого компонента из тел цилиндрической формы в полунепрерывном процессе // Инж.-физ. журнал. 2016. Т. 89. № 3. С. 595.
17. Рудобаица С. П., Карташов Э. М., Зув Н. А. Тепломассоперенос при сушке в осциллирующем электромагнитном поле // Теор. основы хим. технол. 2011. Т. 45. № 5. С.1.
18. Рудобаица С. П., Зуева Г.А., Карташов Э. М. Тепломассоперенос в сферической частице при ее сушке в осциллирующем электромагнитном поле // Теор. основы хим. технол. 2011. Т. 50. № 5. С.539.
19. Рудобаица С.П., Григорьев И.В. Импульсная инфракрасная сушка семян // Промышленная теплотехника. 2011. Т. 33. № 8. С. 85.
20. Лыков А.В. Тепло-и массообмен в процессах сушки. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. 464 с.
21. Kudra, T. Energy aspects in drying // Drying Technology. 2004. V.22. № 5. P. 917.
21. Mujumdar, A. S. Principles, classification and selection of dryers. In: Handbook of Industrial Drying. 3rd edition, A. S. Mujumdar (Ed). USA. CRC Press, Boca Raton. 2007. P. 3.
22. Kudra T. Energy efficiency in industrial drying // Пленарные доклады Международной научно технической конференции «Проблемы ресурсо– и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК». Иваново: ИГХТУ, 2014. С. 44.
23. Данилов О.Л., Леончик Б.И. Экономия энергии при тепловой сушке. М.: Энергоатомиздат. 1986. 186 с.
24. Рудобаица С.П. Актуальные проблемы сушки // Пленарные доклады Международной научно-технической конференции «Проблемы ресурсо– и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК». Иваново: ИГХТУ, 2014. С. 24.

УДК 502/504

**ECOLOGICALLY FRIENDLY TECHNOLOGIES OF THE 21<sup>ST</sup> CENTURY  
(USING THE DRYING PROCESS AS AN EXAMPLE)  
ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 21ГО ВЕКА  
(НА ПРИМЕРЕ ПРОЦЕССОВ СУШКИ)**

**Odilio Alves-Filho  
Одилио Алвес-Фильо**

*Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway  
Норвежский университет науки и технологий, Трондхейм, Норвегия  
(e-mail: odilio.alves@ntnu.no)*

*Abstract:* This paper covers the advances in heat pump drying technologies for the twenty-first century. These dryers operate with high thermal effectiveness for manufacturing superior quality product and features benefits to environment, climate change and process sustainability. Descriptions and layouts are given on design of heat pump dryers operating in single and multi stage vapor compression and drying chambers placed in series. The drying modes covered are atmospheric sublimation and evaporation for improved capacity and superior characteristics of dried materials. The future trend is heat pump drying with natural fluids to comply with regulations to reduce environmental problems such as global warming and climate change. These technologies have been built and extensive R&D have been done at Norwegian University of Science and Technology in Trondheim. The technology has progressed to pilot scale and industrial applications contributing to a better 21<sup>st</sup> Century.

*Аннотация:* В статье рассматриваются достижения в области технологий сушки с тепловыми насосами в XXI веке. Эти сушилки обеспечивают устойчивый процесс производства высококачественных продуктов, работают с высокой тепловой эффективностью и не оказывают негативного влияния на окружающую среду и изменение климата. Описания и компоновки оборудования даны на примере проектирования сушилок, работающих с одно- и многоступенчатыми парокомпрессионными тепловыми насосами и последовательным расположением сушильных камер. Предложенный метод сушки - сублимация и испарение при атмосферном давлении - обеспечивает повышение производительности и отличные характеристики и свойства высушенных материалов. Тенденция развития теплонасосной сушки заключается в использовании натуральных хладагентов в соответствии с нормативными документами, направленными на снижение негативного влияния на экологию, а, следовательно, решение экологических проблем, таких как глобальное потепление и изменение климата. В Норвежском университете науки и технологий в Трондхейме были разработаны технологии сушки с тепловыми насосами и проведены обширные научно-исследовательские работы. Технологии от лабораторных установок продвинулись к полупромышленным образцам и промышленному внедрению, что внесло вклад в развитие технологий 21-го века.

*Keywords:* design, energy efficiency, environment, heat pump drying, layout, sustainability.

*Ключевые слова:* компоновка, окружающая среда, проектирование, сушка с тепловым насосом, устойчивость, энергетическая эффективность.

Cooling and heating processes have been around for several decades but modern heat pump dryers (HPD) incorporating precise instrumentation and controls have only recently advanced from pilot to industrial applications.

The future HPD will operate with natural working fluids to comply with current environmental protection protocols. The focus on HPD has been on capacity, efficiency,

sustainability and design for operation with environmentally friendly fluids. HPD allows processing of heat-sensitive materials and produce high quality powders with tailored properties at competitive cost. In this application, the HPD operates in atmospheric freeze-drying and evaporative drying in a single unit.

This paper covers HPD design with natural fluids and compares dryers based on coefficients of performance, thermal efficiency and specific moisture extraction ratio. Several arrangements of heat pump dryers are illustrated with bench units, pilot and industrial plants.

HPD is an innovative technology for the 21<sup>st</sup> Century and its unique performance leads to social-industrial and cost-efficiency advantages. The conventional dryers, still in common use today, lack these benefits since they were design in a time when environment and energy were unimportant issues [1].

#### ENVIRONMENT AND CLIMATE ASPECTS RELATED TO DRYING

Conventional dryers consume large amounts of energy inducing an equivalent emission of green house gas (GHG) to the atmosphere.

The cause of radiation blockage is the notorious greenhouse gases (GHG) represented mainly by carbon dioxide, chlorofluorocarbons (CFCs), hydrochlorofluorocarbons (HCFCs), hydrofluoro-carbons (HFCs), hydrocarbons, methane and nitrous oxide.

The main process involved in this oxygen, water and carbon dioxide mass balance is photosynthesis that is triggered by those sun's photons that successfully cross the atmosphere and strike green leaves. Here carbon dioxide combines with water producing carbohydrate and oxygen molecules. Photosynthetic plants and organisms are converters of GHG to compounds essential to life and respiration. A disturbance of the oxygen-GHG mass balance results in an over-heating of the biosphere with appalling effects in the hydrological and carbon dioxide-air cycles.

However, GHGs are being released in increased concentration by direct combustion processes, transport, agriculture, wastes, and chemicals-solvents and other industries.

The most extensive initiative to reduce the GHG emission occurs in Europe through proposals and incentives. The artificial emission of GHGs in 2011 was estimated at 33.4 Gt, a number that is difficult to grasp. A better sense of this magnitude is to convert to a familiar geometrical shape. Since the density of carbon dioxide is about 1.98 kg/m<sup>3</sup> the emission is equivalent to a sphere of 32 km in diameter.

There are also chemical substances degrading the living space stratosphere and an indicator is the ozone depletion potential (ODP). The 1920's conception of the CFCs and HCFCs was followed by their widespread use in commercial refrigeration and aerosol agents [2].

Moreover, observations and measurements made at the end of last century indicated that the chlorine molecule in CFCs and HCFCs is highly stable and causes severe damage to the ozone layer. As a consequence CFCs and HCFCs were phased-out and replaced by HFCs that have zero ODP and non-zero global warming potential (GWP).

Fortunately, climate change or environment depletion can be avoided by selecting the best refrigerants and heat pump fluids. These are natural fluids with near zero global warming potential and zero ozone depletion potential.

Briefly, heat pump drying can be designed to operate with natural fluids resulting in a significant drop in green house gas emission. In particular, when electricity is generated in fossil fueled thermal power plants, the heat pump technology provides reduction in energy consumption with an equivalent drop in greenhouse gas emissions. Furthermore, the heat pump dryers operate in closed cycles both in the refrigerant and drying air loops. This means that it is a green technology without environmental pollution by fines or thermal pollution by hot exhaust air.

#### HEAT PUMP DRYING BENEFITS AND WORKING PRINCIPLE

Conventional dryers have limitations such as low quality dried product, negative environmental impact and high energy consumption or high cost. A solution to these problems is to apply heat pump drying that is currently a ready-to-use technology. It operates well at a wide range of temperatures that can be set according to the material thermal sensibility and applications. It can

also combine low and medium temperatures in a single heat pump dryer aiming at energy savings and superior product quality [3].

**Table 1. Energy utilization by the main conventional and by heat pump dryers**

Dryers	SMER, kg/kWh	Specific energy, kJ/kg
Conventional dryers: • rotary, spray, tunnel and fluidized bed	0.5 to 0.75 0.08	7200 to 4800 –
Adiabatic heat pump fluidized bed dryer	2 to 3	1800 to 1200
Polytropic heat pump fluidized bed dryer	3 to 5	1200 to 720
Superheated steam dryer	2.4 to 3.6	1500 to 1000

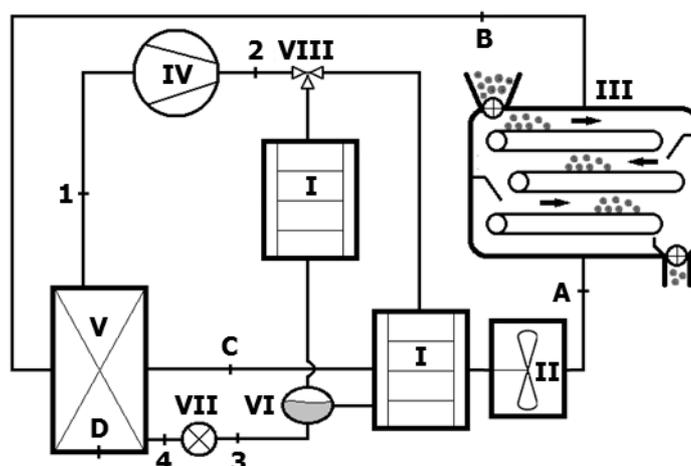
A properly designed heat pump dryer uses less energy than what is required by conventional dryers. Table 1 gives the energy utilization by main conventional and heat pump dryers [4]. It indicates that the HPD is several orders-of-magnitude more energy efficient and less costly than conventional dryers. It also shows that the adiabatic and polytropic heat pump dryers have SMER similar or slightly higher than superheated steam dryer.

The heat pump dryer recovers energy from the drying exhaust vapor, which is lost in open conventional dryers. A properly designed heat pump dryer has a closed loop and fully recovers energy that is re-distributed for heating and cooling as required in a drying process. The refrigerant flows through the evaporator where it absorbs latent heat from the changing phase exhaust vapor and recycles it to the condenser. In a similar way valuable volatiles can be recovered and harmful condensable vapors can be separated and discarded.

#### SINGLE STAGE VAPOR COMPRESSION HEAT PUMP DRYING

The single-stage vapor compression is a commonly applied heat pump cycle. In this case only one evaporator cools the moist air, condenses the water vapor fraction and absorbs (for boiling the refrigerant) the corresponding latent heat of vapor condensation [3].

A single vapor compression system has a throttling valve or similar device separating the low and high pressure sides as illustrated in Fig. 1.



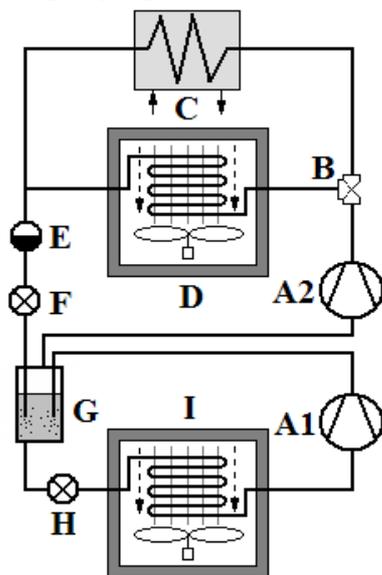
**Fig. 1. Heat pump belt dryer with R134a: I – condensers (heaters), II – blower, III – belt dryer with leek cubes, IV – compressor, V – evaporator, VI – receiver, VII – throttling valve, VIII – three-way valve, 1 – saturated vapor, 2 – superheated vapor, 3 – saturated liquid, 4 – vapor and liquid mixture, A – inlet of drying chamber, B – inlet of evaporator, C – inlet of condenser, D – evaporator surface.**

Heat exchangers particularly called condensers and evaporators are applied to transfer energy between the heat pump system working fluid and surroundings. The working fluid changes phase from vapor to liquid as it flows through the condenser and releases energy to the drying air acting as heat sink. This direction of energy transfer requires a higher temperature in the heat pump fluid than the heat sink. Simultaneously, the working fluid changes phase from a liquid-vapor mixture to vapor by boiling in the evaporator while receiving energy from the moist-air as heat source. This energy transfer also requires a lower temperature in the evaporating fluid than in the heat source. These processes take place in a closed cycle as the working fluid flows through condensers, evaporators, compressors and throttling devices.

The single stage vapor compression heat pump dryer applies with high coefficient of performance (COP) and specific moisture extraction ratio (SMER) for medium temperature drying. The COP and SMER are particularly high for heat pump drying systems with medium or small temperature difference between evaporation and condensation.

#### TWO STAGE VAPOR COMPRESSION HEAT PUMP DRYING

A single stage heat pump drying system is advantageously and widely applied but is unable to provide several streams of drying air with different conditions and to operate with large evaporating and condensing temperature difference [5]. For this case the solution is multistage heat pump drying as illustrated in Fig. 2.



**Fig. 2. Two-stage heat pump dryer:**  
**A1/A2**– low and high stage compressors,  
**B** – three-way valve, **C/D** – external and  
 internal condensers, **E** – receiver,  
**F** – float valve, **G** – flash-tank,  
**H** – throttling valve, **I** – evaporator.

This figure shows a two-stage heat pump dryer that operates with large evaporating and condensing temperature difference and provides two air streams with different conditions. The liquid refrigerant flows from the condenser D and is collected in a receiver E, then, it moves through the float valve F and is collected in the intermediate pressure flash-tank G. At the same time this tank receives intermediate pressurized superheated vapor from the first stage compressor A1. In the tank G the refrigerant is separated into two phases, one is saturated liquid that enters the throttling valve H connected to the evaporator I and changes phase to enter the low stage compressor A1. The other phase is saturated vapor that flows to the suction line of the high stage compressor A2. This compressor discharges superheated vapor to the three-way valve B that directs vapor to the external and internal condensers C and D, respectively.

The second stage drying involves moisture removal by evaporation at higher rates. The two-stage heat pump dryer operates with energy recovery for high efficiency (superior quality dried product) resulting in using less energy and reducing costs [6]. A properly designed two stage vapor compression heat pump dryer has better performance than single stage vapor compression for large temperature and pressure differences between evaporation and condensation. The reason is that the extra components in the dryer allows operation in smaller pressure intervals leading to enhanced coefficients of performance, energy utilization and water removal rate. A major advantage of this dryer is its ability to process heat sensitive wet-solids, liquid and pastes since the evaporator and air inlet temperatures can be set slightly below the material freezing point [7]. The outcome is high quality product while operating with high performance and enhanced water removal rates. The additional benefits of this heat pump dryer are lower pressure ratio, higher cooling capacity, higher isentropic efficiency, lower discharge temperature or compressor overheating protection, lower compression and expansion energy losses.

## SELECTION OF HEAT PUMP FLUIDS

There is an abundance of heat pump fluids, or refrigerants, in the international market today because there is no ideal refrigerant satisfying all required conditions in different applications [8]. A question is: how to select a fluid from this wide variety? What are the criteria for selection? Then, let's gradually answer these questions. The selection procedure involves comparison of fluids based on properties at different state points of the heat pump cycle and at specific operating conditions. The current selection favors fluids with near zero ozone depletion potential and global warming potential, harmless and non-toxic, compatible with materials and lubricating oils, favorable properties and low cost.

### SELECTION BASED ON PERFORMANCE AND CYCLES

The performance determination must be made from cycles with similar operating conditions. A heat pump and refrigerator operates in a cycle with a fluid or refrigerant that flows through the evaporator absorbing energy from the heat source (medium to be cooled) and through the condenser transferring energy to the heat sink (medium to be heated). The processes in a mechanical vapor compression heat pump system cycle are evaporation, condensation, compression and throttling. These processes and energy transport occur as the fluid changes phase and flows through the components leading to exchange of energy with the heat source and sink.

### SELECTION BASED ON PERFORMANCE AT TRANSCRITICAL CYCLE

An important factor in selecting a fluid is its ability to properly operate in a transcritical cycle. This cycle has improved performance compared to a subcritical cycle operating close to the critical point. In a conventional subcritical cycle the condensation occurs in the two-phase region and the COP drops sharply as the pressure approaches the critical point. The obvious questions are how to reverse this situation and which fluid to select? The situation is inverted by considering that condensation in a transcritical cycle (above critical point) happens without phase change and, as the condensation pressure approaches the critical point, the COP greatly increases by means of gas cooling. An exceptional fluid choice for the heat pump transcritical cycle is the carbon dioxide (R744). This is because it has critical temperature and pressure of 31.03°C and 7380 kPa, which is suitable for medium temperature drying. The heat pump with carbon dioxide in a transcritical cycle displays better performance characteristics compared to subcritical cycle.

### SELECTION BASED ON OPERATING PRESSURE AND TEMPERATURE

The refrigerant can be selected based on its properties related to evaporating and condensing temperatures. The HP system is usually designed for limiting pressure of 25 bar, which is the typical value for manufacturing commercial compressors. The temperature and pressure are constant in the two-phase region for azeotropic blends and natural fluids, which means a constant saturation temperature at a given pressure. However, the temperature varies with the pressure for zeotropic blends and air. This implies that, for these blends, the temperatures at each pressure are defined by bubble-point temperature ( $t_{\text{bub}}$ ) and dew-point temperature ( $t_{\text{dew}}$ ) rather than saturation temperature ( $t_{\text{sat}}$ ).

The R718 has high saturation temperatures at the typical pressures and is seldom used in vapor compression heat pump systems. In contrast, R729 is a cryogenic fluid with very low saturation temperatures at the given pressures. Natural fluids have a large variation of the saturation temperatures allowing a wide range of applications. The closeness of the bubble-point temperatures of the zeotropic blends indicates their similar purposes and performances.

### SELECTION BASED ON EFFECT ON SAFETY AND ENVIRONMENTAL ISSUES

The selection of the heat pump fluid can be made based on its environmental effects and its potential health risks. In terms of safety the refrigerant selection depends on classes and groups established according to the Standard 34 [9]. Safety classes of refrigerants are expressed by letters: A: nontoxic for concentration below 400 ppm by volume, B: toxic at concentration above 400 ppm.

Climate change and environmental impact are minimized by selecting fluids with low GWP. The GWP is equivalent to the amount of heat trapped as greenhouse gases (GHGs). The GWP value is relative to carbon dioxide, which is a reference value equal to 1.

### INNOVATIVE HEAT PUMP DRYERS WITH NATURAL FLUIDS DESIGNED AT NTNU

The current trend favors zero ODP and zero GWP fluids and the future vision is intensified application of natural fluids in heat pumps and refrigeration systems. Then, R&D is increasing and encouraging the use of natural fluids in combination with today's advanced components, processes, controls, and materials. The reasons are that natural fluids have excellent properties and are permanent solutions concerning safety and impact to environment and climate change. Natural fluids are further sub-divided into safest, such as water and air, and practical which are the hydrocarbons, ammonia, and carbon dioxide.

These R&D efforts are being intensified because the collective advantages of natural fluids have attracted several institutions and industries that are currently engaged in developing these heat pump systems. In choosing the natural fluids alternatives, ammonia and carbon dioxide were considered the best selection due to the benefits of zero ODP, unit GWP, safety, proper temperature and pressure levels, excellent performance and energy utilization. Process performance and impact on environment, climate and health have been the focus of R&D at the Norwegian University of Science and Technology (NTNU). And as a consequence, several heat pump dryers with R717 and R744 have been designed and built. In addition to fluid another choice was a full recirculation of exhaust air and maximum energy recovery by the heat pump dryer components. These parameters are considered in the design of the R717 and R744 heat pump dryers and, in particular, the specifications of the drying chamber, blower, evaporator, compressor, condenser and throttling device. The main vision is to develop sustainable and green heat pump technology to achieve enhanced coefficient of performance and optimum specific moisture extraction ratio.

#### CARBON DIOXIDE HEAT PUMP DRYER

The only pilot scale heat pump dryer working with carbon dioxide in a transcritical cycle for particulate materials in a fluidized or stationary bed has been built at NTNU (Fig. 3).

The R744 heat pump dryer is designed to operate at variable conditions with a cleaning in place system (CIP). The CIP includes spray nozzles that are mounted in the drying loop allowing proper cleaning of the blower, cyclone, heat exchangers, drying chamber and connecting ducts prior and after drying. Air and gases such as nitrogen, helium and steam can be applied for drying or sterilization since drying loop is designed to stand a maximum absolute pressure of 220 kPa.

Potential applications for this dryer are biochemical, chemical, medical, pharmaceutical and food products. The wet material is loaded into the chamber, the gas velocity is adjusted for fluidization or stationary modes and the temperature is set according to the nature, stickiness and thermal sensitivity of the drying material.



**Fig. 3. The pilot scale heat pump dryer operating with R744 in transcritical cycle: 1 – cyclone, 2 – drying chamber, 3 – condenser, 4 – evaporator, 5 – adjustable external condenser, 6 – control panel, 7 – compressor, 8 – cleaning in place system.**

Major benefits of this heat pump dryer are: (a) it is a green technology because it has zero ODP or near zero GWP, (b) it has a high coefficient of performance and (c) it operates with high energy efficiency and lower cost.

#### AMMONIA HEAT PUMP DRYER

Ammonia was selected as the natural fluid and used in the fluidized bed and tunnel drying technologies designed and built at NTNU. The fluidized bed heat pump dryer working with R717 differs from the conventional adiabatic dryers because it is designed to operate close to isothermal or non-adiabatic processes. To achieve this operation the air drying loop side has two drying chambers with immersed heat exchangers connected to the heat pump condensers. The wet material is continuously loaded into the first drying chamber operating in back-mixing fluidized bed, after which the semi-dried product flows through a connecting duct and enters the second drying chamber operating in plug-flow where it is fully dried and discharged.

#### CONCLUSIONS

HPD is a green technology with zero GWP and ODP when operating with natural fluids. A well designed heat pump dryer is several orders-of-magnitude more energy efficient and less costly than conventional dryers. HPD beneficially contribute to a sustainable society while providing superior products at competitive cost. This is an advanced engineered drying technology ready for implementation by modern industries wishing a return of investment while contributing to a sustainable society.

#### REFERENCES

1. IEA (International Energy Agency, France). Energy Efficiency. Market Report. Paris: IEA, 2013.
2. *Dossat R.J.* Principles of refrigeration, 2<sup>nd</sup> ed. New York: Wiley, 1981.
3. *Alves-Filho O.* Heat pump dryers: theory, design and industrial applications. New York: CRC Press, 2015. 335 pp.
4. *Alves-Filho O., Mujumdar A.S.* Novel drying technologies for energy savings and high product quality – model based case studies // Proceedings. 2<sup>nd</sup> International Conference “Energy-Saving Technologies for Drying and Hygrothermal Processing” (DHTP-2005). Moscow, 2005. Vol. 1. Pp. 29-47.
5. *Granryd E., Ekroth I., Lundqvist P., Melinder Å., Palm B., Rohlin P.* Refrigerating Engineering. Stockholm: KTH Energy Technology, 2009.
6. *Alves-Filho O., Eikevik T., Goncharova-Alves S.* Single- and multistage heat pump drying of protein // Drying Technology. 2008. Vol. 26. No. 4. Pp. 470-475.
7. *Alves-Filho O., Roos Y.H.* Advances in multi-purpose drying operations with phase and state transitions // Drying Technology. 2006. Vol. 24. No. 3. Pp. 383-396.
8. *Gosney W.B.* Principles of refrigeration. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
9. *Owen M.S.* ASHRAE Handbook of fundamentals. New York: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineer, 2009.

**КОНЦЕПЦИЯ ХИМИЗАЦИИ СОВРЕМЕННОЙ ЭКОНОМИКИ РОССИИ  
THE CONCEPT OF APPLIED CHEMISTRY OF THE ECONOMY IN MODERN RUSSIA****Валерий Вениаминович Бабкин  
Valery V. Babkin**

*Международный институт проблем химизации современной экономики, Россия, Москва  
International Institute for Applied Chemistry Problems of the Modern Economy, Russia, Moscow  
(e-mail: bvv@amerop.ru)*

*Аннотация:* Проанализировано научное наследие А. Н. Косыгина и Л. А. Костандова, рассмотрены показатели ВВП ведущих экономик мира, раскрыта сущность стратегии химизации российской экономики.

*Abstract:* The scientific legacy of A.N. Kosygin and L.A. Kostandov is analyzed, the GDP figures of several of the world's leading economies are researched, the essence of the applied chemistry strategy is discussed.

*Ключевые слова:* химизация, диверсификация, кластеризация, стратегия, концепция развития, нефтегазовый кластер.

*Keywords:* applied chemistry, diversification, clusterization, strategy, development concept, gasoil cluster.

Сейчас появилось и набирает силу расхожее мнение, что Россия вовсе не сидит на «нефтяной игле», что доля нефтегазовой составляющей в общих доходах текущего бюджета уменьшилась до одной трети против 45% в 2015 году. Однако этому экономическому чуду нет объяснения, поскольку наоборот принимаются меры по увеличению экспорта нефти любой ценой, путем увеличения налогов на переработку (налоговый маневр), путем переноса сроков модернизации устаревших нефтеперерабатывающих заводов, в целом за счет уменьшения квоты на переработку. Эти меры содержатся в «Стратегии развития нефтяной отрасли до 2035 года», выполненной Минэнерго по заданию правительства в 2016 году.

Если говорить о чуде, то оно действительно было в 1965-1980 гг., когда под руководством Косыгина Н.А. и Костандова Л.А. был осуществлен инвестиционный маневр «Проект века», который позволил за 15 лет вывести отрасль химической промышленности на первое место в мире, обогнав при этом все развитые страны, в том числе США. Доля химизации в ВВП тогда достигла 7%, была решена продовольственная проблема, осуществилась модернизация значительной части основных фондов, произошли качественные изменения в ассортименте продукции практически всех отраслей промышленности, построено 400 новых заводов по переработке минерального сырья. Таким образом, у нас имеется серьезный опыт диверсификации экономики, которым, хотя бы из-за его результатов, пренебрегать нельзя.

В настоящее время по уровню химизации Россия занимает последнее место среди развитых стран. Доля химической промышленности в ВВП по итогам 2015 г. снизилась по сравнению с 2012г с 1,6% до 1,2%. Для Китая сейчас этот показатель равен 8,9%. По уровню потребления химической продукции на душу населения Россия также отстает от развитых стран (в частности от Германии в 9 раз). Несмотря на доступность в России базовых видов сырья необходимых для производства пластмасс, по их производству химический комплекс вошёл только во второй десяток развитых стран. В международной торговле Россия удовлетворяет спрос зарубежных партнёров на минеральные удобрения и аммиак, доля которых в структуре экспорта продукции ХК продолжает расти и по итогам 2015 г. приблизилась к 50%. При этом РФ сама остро нуждается в них. Закупается же Россией продукция высоких переделов и основные компоненты для их производства. Россия выделяет в 350 раз меньше, чем США средств на химические НИОКР, хотя ХК является одной из наиболее наукоёмких отраслей экономики во всех странах мира. Как это ни

удивительно, но дело здесь **вовсе не в отсутствии денег** в стране. В 2011 г. расходы на НИОКР в России составили 1,09% от ВВП, в Англии – 1,77% от ВВП, во Франции – 2,24% от ВВП, т.е. по этому показателю Россия с учётом более высокого ВВП по сравнению с Англией и Францией отставала от них не так уж много, просто отставание растёт с каждым годом. Отсюда следует вывод, что, будучи страной, которая всему миру показала, как надо проводить химизацию экономики, Россия попросту пренебрегает и не хочет идти по пути общемирового тренда. В настоящее время некогда мощный и целеустремленный химический комплекс в виде промузлов представляет бессистемно разбросанные и часто конфликтующие между собой разрозненные заводы и заводики (за отдельными исключениями типа Сибур, Фосагро, Еврохим, Акрон и некоторые другие). Поиску эффективных решений данных проблем посвящена Новая стратегия ХИМНЕФТЕГАЗПРОМ, разработанная автором вместе с Д.Д. Успенским.

#### **4 шага на пути к реализации Новой стратегии:**

##### **1. На законодательном уровне установить паритет цен и защитить внутренний рынок минеральных удобрений**

Из-за диспаритета цен отечественные сельскохозяйственные производители не могут себя обеспечить МУ. В результате Россия, производящая около 10% всего мирового объема минеральных удобрений, занимает 99 место в рейтинге по внесению минеральных удобрений на гектар посевной площади. Усиливают диспаритет цен на сельскохозяйственную продукцию и условия кредитования, которые приводят к недоступности кредитных ресурсов из-за высоких процентных ставок. Привлекая заемные средства, сельхозпроизводитель вынужден «переливать» значительную часть дохода в банковский сектор. Диспаритет между ценами на промышленную продукцию и продукцию сельского хозяйства выглядит абсурдно: с одной стороны государство «дает» деньги, а с другой - «забирает» больше, чем дало, то есть при наличии диспаритета цен поддержка государства не даёт эффекта. Через диспаритет цен из сельского хозяйства изымается и поступает в другие отрасли значительно больше средств, чем государство направило на его поддержку. Роль государства в регулировании развития АПК России должна заключаться в разработке эффективной программы защиты внутреннего рынка удобрений на законодательном уровне.

##### **2. Создание инфраструктуры**

Обеспечить переход от хаотичного бессистемного ввода новых мощностей к разработке и внедрению Генерального плана размещения производительных сил, имея в виду создание инфраструктуры как главного условия для возникновения и развития в «точках роста» предусмотренных указанным генеральным планом новых мощных кластеров химических и нефтехимических предприятий, а так же продовольственных, поддерживаемых портовыми и складскими мощностями, базовыми научными и учебными заведениями с перспективными рынками сбыта (удобрений, продовольствия и другой химической продукции). Это должно осуществляться за счёт мощного инвестиционного манёвра с участием государства и реализацией мер налогового стимулирования на законодательном уровне.

##### **3. Пересмотр стратегии регионального развития**

Эта работа должна начаться с разработки Генерального плана размещения производительных сил - исполнители РАН и Минэкономики. Предпочтительной территорией для размещения вновь создаваемых продовольственных и химических кластеров предлагается выбрать Восточные регионы, в частности, Дальневосточный округ, развитие которого объявлено Правительством России приоритетом на весь 21-й век. При их размещении обеспечить, с одной стороны, превращение дальневосточных регионов России в

развитую продовольственную базу для Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР) и Китая, с их неограниченными потребностями и, с другой стороны, задать мощный импульс для развития всего Востока страны. Для этого, в порядке кластерной инициативы, предлагается создать в ДВФО серию кластеров-припортовых заводов, ориентированных на производство аммиака и азотных удобрений. Следует обратить особое внимание на сочетание проектирующегося Селигдарского горно-химического комплекса с действующим Приморским производственным объединением «Бор», которые улучшат обеспечение страны фосфорсодержащим сырьем, которого в России не хватает.

#### **4. Создание механизма реализации стратегии и источников финансирования затрат.**

Химизация, в отличие от других вариантов диверсификации, обладает уникальным свойством самокупаемости, что само по себе является источником финансирования затрат на ее осуществление. Выбирается точка для строительства химического комплекса, где имеется водный путь и природный газ, таких площадок имеется множество в ДВФО. Минэкономразвития, с участием территориальных властей, подготавливает задание для РАН на разработку генерального плана размещения производительных сил в ДВФО. Генеральный план утверждается Правительством и Федеральным собранием. Специализированные институты в соответствии с утверждённым Генпланом разрабатывают инфраструктурные проекты, в том числе: энергетика и связь, транспортная инфраструктура, включая портовые сооружения, жильё и объекты соцкультбыта. Финансирование строительства инфраструктуры осуществляется государством из средств специального фонда химизации, созданного за счёт торговли углеводородным сырьём и теми же удобрениями. Предполагается параллельно с разработкой инфраструктурных проектов для решения задачи по химизации ДВФО распоряжением Правительства создать государственную корпорацию «Восточная Химия». Данная корпорация должна привлечь иностранных инвесторов налоговыми льготами, низкими ценами на углеводородное сырьё, готовой инфраструктурой и другими льготами по схеме ГЧП. Она должна создаваться с известными иностранными компаниями из Японии, Тайваня, Сингапура, Ю. Кореи, Китая и др. на взаимовыгодных условиях и, как один из вариантов, в виде совместных предприятий. Сначала должен появиться первый кластер химических предприятий. Позже создаются продовольственные кластеры. Параллельно с ними создаётся Дальневосточный Нефтехимический кластер. После успешного ввода в эксплуатацию предприятий первого химического кластера начинается обращение акций на бирже (контрольный пакет останется у государства на 10 лет). Здесь должна возрасти роль частного капитала, что даст толчок дальнейшему развитию, возникнет второй кластер химических предприятий, новые продовольственные и нефтехимические кластеры и т.д.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. *Бабкин В.В., Успенский Д.Д.* Новая Стратегия Химнефтегазпром 2030, Москва, 2015 г. 372 С.
2. *Бабкин В.В., Успенский Д.Д.* Новая Стратегия Химия 2030: Высокие переделы сырья. Кластеризация. Химизация индустрии РФ/ Москва, 2015 г. 222 С.
3. *Бабкин В.В., Успенский Д.Д.* Химические кластеры и припортовые заводы: новые взгляд/ Москва, 2013 г. 159 С.

УДК 677.027.625+628.543./.9

**«ЗЕЛЕНАЯ ХИМИЯ» В РАБОТАХ УЧЕНЫХ-ХИМИКОВ  
РГУ ИМ. А. Н. КОСЫГИНА  
“GREEN CHEMISTRY” IN THE RESEARCHES OF THE CHEMISTS OF THE  
KOSYGIN STATE UNIVERSITY OF RUSSIA**

**Константин Иванович Кобраков.  
Konstantin I. Kobrakov**

*Российский государственный университет им. А.Н Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство), Россия, Москва  
The Kosygin State University of Russia, Russia, Moscow  
(e-mail: kobrakovk@mail.ru)*

*Аннотация:* В работе приведены некоторые данные о роли А.Н. Косыгина в создании и развитии промышленности искусственных и синтетических волокон. Также кратко рассмотрены результаты, полученные на кафедрах факультета химической технологии и промышленной экологии в ходе выполнения работ, направленных на снижение экологической нагрузки на человека и окружающую среду от производств текстильной, легкой, химической промышленности.

*Abstract.* The paper includes some information on the role of A.N. Kosygin in creation and development of the industry of artificial and synthetic fibers. The results obtained at the departments of the faculty of chemical and industrial ecology in the course of the researches directed on decrease in an environmental pressure on the person and environment from productions of textile, light, and chemical industry are also briefly considered.

*Ключевые слова:* химические волокна, хемосорбционные волокна, биосорбенты, хитозан, тяжелые металлы, радионуклиды, коллаген, композиционные материалы, промывка и сушка тканей, ультразвуковое воздействие.

*Keywords:* chemical fibers; chemisorbtional fibers; bioorents; heavy metals; radionuclides; collagen; composite materials; washing and drying of fabrics; ultrasonic treatment.

В XX веке ряд стран (Советская Россия и СССР, Германия, Япония, США и др.) выделившие в качестве приоритетного направления развитие химической науки и технологии, добились впечатляющих успехов в создании эффективной индустрии.

Можно вспомнить, что на определенном этапе развития СССР руководством страны было заявлено, что одними из условий достижения поставленных целей социалистического строительства является «химизация народного хозяйства». История подтвердила правильность выбранного вектора развития.

Роль А. Н. Косыгина в процессе создания химической отрасли в стране и, в частности, в производстве химических волокон трудно переоценить.

Формирование и развитие промышленности химических волокон происходило под личным руководством А. Н. Косыгина. Его трудовой путь, начавшийся на текстильных фабриках Ленинграда и, конечно, его деятельность народного комиссара текстильной промышленности, затем министра легкой промышленности СССР позволила оценить перспективность этого нового для того времени вида полимерных материалов как сырья для текстильной промышленности. Именно поэтому в 1946 году было принято решение о переводе отрасли в Министерство текстильной промышленности. С этой датой связан и перевод по личному предложению А. Н. Косыгина, хорошо знавшего по работе в Государственном Комитете обороны заведующего кафедрой искусственного волокна проф. З. А. Роговина, кафедры из МХТИ им. Д. И. Менделеева в Московский текстильный институт.

Строительство заводов химического волокна началось в первые послевоенные годы. Уже 6 ноября 1948 г. на Клинском заводе искусственного волокна была выпущена первая в стране промышленная партия капроновых нитей. Мощным импульсом развитию химической промышленности послужили решения майского 1958 г. пленума ЦК КПСС и последовавшее за ним постановление Правительства СССР, после которых было развернуто небывалое по своим масштабам строительство заводов искусственного и синтетического волокна. Эту работу по-прежнему курировал А. Н. Косыгин.

В результате реализации сформулированной амбициозной программы были построены и введены в строй оснащенные передовой техникой и технологиями заводы, размещенные в разных регионах страны: в городах Российской Федерации - Курске, Саратове, Энгельсе, Балаково, Красноярске, Барнауле, Кемерово, а несколько позднее Щекино, Украины - Черкассах, Житомире, Сокале, Белоруссии - Могилеве, Новополоцке, Светлогорске, Гродно, Армении - Ленинакане (ныне - Гюмри), Грузии - Рустави, Узбекистане - Навои и Фергане, Латвии - Даугавпилсе, Эстонии - Каунасе. Это позволило стране войти в число ведущих мировых производителей химических волокон.

Личное участие А. Н. Косыгина в решении возникавших проблем иллюстрирует один пример. В 1958 г. предстоял пуск Красноярского шинного завода, поставку кордной ткани для которого должно было обеспечить строившееся кордное производство Красноярского завода искусственного волокна (завода №522). По воспоминаниям главного инженера строительного треста Владимира Петровича Абовского, благодаря решениям, которые были приняты на совещании у А. Н. Косыгина на основании предложений, представленных им и директором завода Иваном Георгиевичем Зеленцовым, было обеспечено выполнение поставленного А. Н. Косыгиным жесткого срока - строительство было завершено к 9 мая 1958 г.

Постановление Правительства дало также импульс развитию научных исследований в области химии и технологии полимеров. Была предусмотрена организация в ведущих вузах страны проблемных лабораторий по этой проблематике. Одной из таких лабораторий стала лаборатория при кафедре технологии химических волокон Московского текстильного института, которую возглавил проф. З. А. Роговин. С первых лет своего существования основным направлением научных исследований стало направленное изменение (модифицирование) полимеров с целью создания материалов с новыми свойствами, обеспечивающими возможность их применения в различных областях: при изготовлении текстильных материалов для обычной и специальной одежды, предметов интерьера, материалов технического назначения и медицины. С первыми результатами работы лаборатории ознакомился А. Н. Косыгин во время посещения Московского текстильного института. Данная им положительная оценка этих работ фактически определила сохранение этого направления на долгие годы и до наших дней.

И в последующие десятилетия в университете проводились и продолжают исследования по разработке функционально-активных материалов для медицины и биотехнологии, материалов с антиадгезионными, огнезащитными и сорбционными свойствами, что позволяет сделать вывод, что тематика, получившая в свое время одобрение А. Н. Косыгина, сохраняет свою актуальность и тенденции развития.

Одновременно бурное развитие химической отрасли промышленности, как в нашей стране, так и за рубежом внесло существенный вклад в новую, угрожающе быстро развивающуюся проблему - необходимость защиты окружающей среды и человека от техногенного воздействия.

В лабораториях и на производствах многих стран мира разрабатываются многочисленные пути и способы решения обозначенной проблемы.

В последние годы в мире становится популярным подход к производству химических веществ, получивший обобщенное название - «зеленая химия» или «химия в интересах устойчивого развития».

Химики, руководствующиеся этим подходом, работают над заменой опасных растворителей на экологически приемлемые или вообще стараются обойтись без растворителей при реализации процесса; заранее оценивают возможную токсичность химических продуктов для природы и человека; на стадии планирования синтеза предусматривают снижение количества образующих отходов, использование каталитических реакций вместо стехиометрических и т.д. важно также учесть затраты на производство энергии, необходимой для химического производства, иначе даже самый чистый химический процесс станет опасным из-за образования отходов при производстве энергии.

Ученые, работающие на факультете химических технологий и промышленной экологии РГУ им. А.Н. Косыгина, также активно проводят исследования в рамках научного направления «Зеленая химия».

Ниже будут коротко рассмотрены результаты некоторых из работ.

В условиях растущего техногенного воздействия на окружающую среду ее защита становится необходимым условием экологической безопасности. Значимость этой проблемы обусловлена влиянием загрязняющих веществ на здоровье и жизнь человека, причем особенную опасность представляют радионуклиды и тяжелые металлы, которые могут поступать в организм человека различными путями, в том числе с питьевой водой. Наиболее перспективным методом очистки промышленных сточных вод от ионов металлов является хемосорбция с использованием полимерных хемосорбентов, которые могут иметь различную физическую форму и содержать функционально-активные группы, обеспечивающие связывание ионов по механизму ионного обмена или комплексообразования.

Для очистки питьевой воды, в особенности воды, предназначенной для приготовления детского питания, а также биологических жидкостей, таких как кровь или плазма крови от ионов тяжелых металлов и радионуклидов могут использоваться только биосорбенты – сорбционно-активные материалы на основе биосовместимых полимеров. Полимеры, предназначенные для создания биосорбентов, должны быть не только биосовместимыми, но и функционально-активными. Создание полифункциональных сорбентов, обеспечивающих концентрирование, извлечение и выделение тяжелых металлов и радионуклидов из растворов сложного химического состава, является актуальной и перманентно усложняющейся задачей, для решения которой одним из перспективных природных полимеров является хитозан, содержащий доступные для модифицирования сорбционно-активные аминогруппы.

На кафедре химии и технологии полимерных материалов и нанокompозитов разработаны биополимерные сорбенты на основе аминополисахарида хитозана, способы их получения и модификации, обеспечивающие способность к специфической сорбции целого спектра элементов, загрязняющих биосферу. Теоретические и экспериментальные исследования (Кильдеева Н.Р., Вихорева Г.А., Гальбрайт Л.С.) послужили основой для разработки нескольких способов получения на основе аминоксодержащих полимеров сорбционно-активных материалов с высокоразвитой поверхностью.

С использованием разработанных методов был получен ряд сорбентов:

- высокоэффективные волокнистые сорбенты солей меди на основе аминоксодержащих сополиакрилметакрилатов Eudragit, которые также использовались как эффективные носители лекарственных соединений;
- нановолокнистые сорбенты на основе полимерных смесей хитозана и поливинилового спирта (ПВС-хитозан);
- широкопористые гидрогелевые гранулированные криогели на основе химически сшитого хитозана, модифицированного природным соединением пиридоксальфосфатом (КХТЗ-ПФ).

Бездефектное нановолокно получено на установке Nanospider™ (Elmarco, Чехия) из 17 – 22 % растворов Eudragit E в бинарном растворителе этанол-хлороформ (60:40). Показано, что разработанная форма волокнистого сорбента может быть эффективно использована в качестве сорбента для удаления ионов меди из питьевой и сточных вод. Впервые показана

возможность стабильного электроформования нановолокон из эквимассовой смеси хитозана и ПВС из растворов в низкоконцентрированной уксусной кислоте бескапиллярным методом со свободной поверхности. Исследование сорбционных свойств ПВС-хитозан по отношению к  $UO$  в статических и динамических условиях в модельных растворах уранилнитрата ( $UO_2(NO_3)_2$ ) показало, что  $^{233}UO$  количественно выделяются после пропускания 300 колоночных объемов при расходе сорбента 0.6 г/л.

Экспериментальные исследования закономерностей процесса сорбции радионуклидов широкопористым криогелем хитозана (КХТЗ) и хитозана, модифицированного фосфорсодержащим реагентом (КХТЗ-ПФ), показали возможность их применения для выделения и концентрирования из низкосолевых техногенных растворов U-233, а КХТЗ-ПФ – для Sr-90 и Eu-152 в аналогичных условиях. Найденные условия выделения урана и стронция в динамическом режиме позволят количественно выделять их из природных вод и низкоактивных радиоактивных отходов с низким содержанием солей с использованием КХТЗ-ПФ.

Состав и количество радионуклидов в водоемах может варьироваться в довольно широких пределах, тем не менее, основными наиболее опасными остаются – U, Pu, Am, Co, Eu, Cs, и Sr. Пройдя различные миграционные процессы, искусственные радионуклиды попадают в окружающую среду и через пищевые цепочки встраиваются в организм человека, распространяясь по нему кровотоком.

Для очистки плазмы крови от радионуклидов проведены пилотные исследования сорбционной способности сорбентов: ПВС-хитозана и КХТЗ-ПФ в растворах, моделирующих плазму крови (альбуминовый и физиологический растворы). Эксперименты по изучению кинетики сорбции U и Am показали высокую эффективность ПВС-хитозан по отношению к америцию в физиологическом растворе и КХТЗ-ПФ для урана в альбумине. Высокие коэффициенты распределения, полученные для этих элементов, позволяют рекомендовать разработанные материалы для дальнейших этапов клинических испытаний (химических, физических, биологических, микробиологических, фармакологических, токсикологических и др. исследований) на тканях (*in vitro*) или на лабораторных животных.

Многолетний опыт в области исследований и переработки коллагенсодержащих отходов кожевенно-обувного, мехового производства позволил творческому коллективу сотрудников кафедр «Технология кожи и меха» (проф. Есина Г.Ф.), «Органическая химия» (доц. Бычкова И.Н.), «Промышленная экология и безопасность» (доц. Моисеева Л.В.) разработать блок способов и линейку материалов, обеспечивающих рациональное использование природных ресурсов и защиту окружающей среды.

К основным результатам исследований следует отнести разработку методик получения дисперсий восполняемого и биоразлагаемого материала- коллагена в различных средах, создание целевых композиций на основе этих дисперсий и волокнисто- пористых материалов.

Предложены методики использования композиций на основе коллагенсодержащих дисперсий в качестве активных наполнителей, разработаны параметры сочетания дисперсий с волокнистой основой и методики структурирования, позволяющие получать волокнисто-пористые композиционные материалы. Разработаны рекомендации по использованию полученных волокнисто-пористых композитов в качестве тепло- и звукоизолирующих, фильтрующих и хемосорбирующих материалов.

Химическая технология отделки текстильных материалов включает в себя сложный комплекс химических и массообменных процессов, термовлажностных обработок. Многочисленные мокрые обработки, в том числе пропитки тканей химическими реагентами или красителями требуют последующего экстрагирования (промывки) и сушки. При промывке удаляется технологическое «загрязнение» из текстильного материала путем его экстрагирования с помощью растворителя, чаще всего воды, с добавлением моющих средств. Основные технологические «загрязнения», удаляемые при промывке - это щелочь (промывка

после мерсеризации), незафиксированные красители (промывка после крашения и печати), жировые вещества (промывка шерстяных тканей после валки) и др.

По затратам рабочего времени, размерам занимаемых площадей, количеству потребляемой энергии, воды и химических реагентов промывка является одним из самых энерго- и ресурсоёмких процессов, что видно из таблицы.

**Таблица 1. Расход энергии и воды на промывку тканей.**

Электроэнергия	Тепловая энергия	Вода		
		На кг ткани	На одну промывную машину	Стоки
до 40% от потребляемой отделочным производством	До 20% от потребляемой отделочным производством	0,3 50м <sup>3</sup>	5 м <sup>3</sup> /час	80% воды

На кафедре ПАХТ и БЖД Московского государственного текстильного университета имени А.Н. Косыгина - ныне кафедра ПЭБ РГУ многие годы проводились системные исследования по повышению экологической и производственной безопасности процесса экстрагирования технологических загрязнений из тканей после различных отделочных операций при использовании для интенсификации процессов ультразвукового воздействия (проф. Кошелева М.К., проф. Реутский В.А.), которые продолжаются на кафедре ПЭБ РГУ им. А.Н. Косыгина.

Выявлена зависимость степени интенсификации различных процессов от параметров ультразвукового воздействия, таких как частота и амплитуда колебаний, удельная мощность, от поверхностной плотности ткани, модуля промывной ванны, расстояния от источника ультразвука. Установлено, что при ультразвуковых воздействиях продолжительность процесса промывки сокращается в среднем на 40 %, при этом существенно снижаются затраты на электроэнергию, расход чистой воды, расход моющих средств, фактическая масса сброса сточной воды и её загрязнённость химическими реагентами.

При ультразвуковом воздействии процесс омыления шерстяного жира идёт интенсивнее, что позволяет вести промывку шерстяных тканей в нейтральных или слабощелочных растворах при сохранении волокон шерсти от повреждений, имеет положительное значение и бактерицидное действие ультразвука, т.к. уничтожается микрофлора в промывной ванне и одновременно обеззараживаются промывные сточные воды.

Продолжительность периодического процесса промывки плотных тонкосуконных шерстяных тканей в результате ультразвукового воздействия сокращается для тканей с различной поверхностной плотностью, в среднем на 40 минут, при этом значительно снижается расход промывной воды и электроэнергии, а совместное использование смеси ПАВ и ультразвука позволяет устранить из рецептуры промывного раствора кальцинированную соду, не использовать для её нейтрализации уксусную кислоту. При этом уменьшается не только количество сточных вод, но и их загрязнённость. Устранение кальцинированной соды предотвращает загрязнение трубопроводов и продлевает срок их службы, позволяет отказаться от использования выпарных установок.

Внедрение ресурсосберегающей технологии экстрагирования технологических загрязнений из текстильных материалов позволяет, одновременно с существенной экономией электроэнергии, воды и химических реагентов, повысить производственную и экологическую безопасность процессов химической технологии отделочного производства текстильной промышленности.

Одним из интенсивно развиваемых направлений «Зеленой химии» является использование в химической технологии возобновляемых исходных реагентов, т.е. получаемых не из компонентов нефти и продуктов нефтепереработки.

Таким возобновляемым сырьем в первую очередь являются химические соединения выделяемые из растительных источников.

Одной из областей исследований в указанном направлении является поиск и внедрение в производственную практику колорирования текстильных материалов окрашенных соединений (красителей), выделенных из возобновляемого природного сырья, как альтернативы синтетическим красителям.

Однако современный уровень развития текстильной промышленности, ассортимент химических волокон, используемых для производства тканей не позволяет использовать за редким исключением «технологии», которые применялись в XVII-XIX веках для крашения текстильных материалов так называемыми природными красителями. Одним из недостатков этих технологий является необходимость использования для закрепления красителей на волокне так называемых «протрав» - солей тяжелых металлов ( $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{SnCl}_2$ ,  $\text{Fe}(\text{NH}_4)(\text{SO}_4)_2$  и т.п.), что по сути сводит на нет экологические преимущества природных красителей.

С целью отказа от использования протрав при колорировании текстильных материалов «растительными» красителями на кафедре органической химии РГУ им А.Н. Косыгина (проф. Кобраков К.И., доц. Станкевич Г.С.) был предложен способ химической модификации окрашенных соединений растительного происхождения. С учетом того, что основными компонентами экстрактов, содержащих окрашенные соединения, являются конденсированные антрохиноны, флавоноиды, фенолкарбоновые кислоты, производные флороглюцина и подобные соединения в качестве «модифицирующей» реакции была выбрана реакция азосочетания.

Сравнительный анализ результатов крашения текстильных материалов экстрактами использованных растений и продуктами их химической модификации показал, что при использовании самих экстрактов только применение протрав ( $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{SnCl}_2$ ,  $\text{ALK}(\text{SO}_4)_2$ ,  $\text{Fe}(\text{NH}_4)(\text{SO}_4)_2$ ) в концентрациях 2% от массы волокна позволяет получать глубокие цвета и высокую устойчивость окраски к физико-химическим воздействиям. Использование продуктов химической модификации позволяет отказаться от применения протрав. При этом один и тот же продукт может использоваться для эффективного колорирования полиамидной и полиэфирной ткани по технологии крашения дисперсными красителями, обеспечивая показатели устойчивости окраски к стирке, сухому и мокрому трению, поту не ниже 4-5 баллов по пятибалльной шкале серых эталонов, а также повышенную устойчивость окраски к действию света.

Таким образом, проведенный комплекс исследований позволил сформулировать новый подход к использованию окрашенных соединений растительного происхождения в качестве полупродуктов для получения красителей для колорирования текстильных материалов, позволяющий использовать положительные стороны «растительных» красителей (экологичность, естественная возобновляемость и широкий выбор сырья) и избежать применение экологически «жестких» солей тяжелых металлов.

Еще одним перспективным направлением «Зеленой химии», развиваемым на кафедре органической химии (проф. Третьяков В.Ф.) является переработка биомассы в этиловый спирт и последующее получение моторных топлив из биоэтанола, а также получение из него водорода для топливных элементов автомобилей нового поколения.

Следует учитывать, что по существующим оценкам ежегодно в процессе фотосинтеза образуются столько биомассы, что из нее можно выработать энергии в восемь раз больше, чем настоящее время дает все топливо на основе ископаемого сырья, а также, что отходы и побочные продукты переработки биосырья также могут быть подвергнуты биологической конверсии, что позволяет создавать практически безотходные технологии.

В настоящее время разработан процесс конверсии биоэтанола на цеолитных катализаторах с получением синтетического бензина или его высокооктановых компонентов.

Показана возможность осуществления конверсии биоэтанола на цеолитных катализаторах с высоким выходом углеводородов бензинового ряда или ароматических углеводородов и варьирования состава образующихся продуктов в зависимости от введенных оксидных добавок и способов активации цеолита.

Параллельно разработана и реализована схема окислительной конверсии биоэтанола в водородосодержащий газ. В результате приведенных исследований разработаны катализаторы на основе оксидов церия, обеспечивающие высокую конверсию биоэтанола и селективность по водороду.

Полученный водородосодержащий газ перспективен для использования в топливных элементах автомобилей нового поколения или электростанций.

К сожалению, объем статьи не позволяет представить целый ряд перспективных работ, которые проводятся в рамках обозначенного направления. В тоже время считаем нужным отметить следующие моменты, отражающие уровень и востребованность проведенных и проводимых исследований.

Результаты ряда представленных выше исследований, нашедших практическую реализацию, были удостоены премии Правительства РФ в области науки и техники:

- «Разработка научных основ, создание и внедрение в производство высокоэффективных технологий получения комплекса экологически ориентированных конкурентоспособных текстильных материалов для защиты среды обитания человека. (Гальбрайт Л.С., Дружинина Т.В., Зубкова Н.С., Кобраков К.И. и др.).
- «Разработка и реализация комплекса научных основ и технических мероприятий по повышению эффективности и безопасности текстильных производств в современных условиях». (Сажин Б.С., Гудим Л.И., Кошелева М.К., Кочетов О.С., Тюрин М.П.).

По материалам разработок только в период 2000-2015 годов получены десятки патентов РФ, продана лицензия на использование патента РФ №2100501 «Способ жидкостной обработки шерстяных тканей после крашения» (Кошелева М.К., Реутский В.А.), опубликованы сотни статей в научно-технических изданиях и представлены доклады на Международных, Всероссийских и др. конференциях и симпозиумах.

УДК 66.011

**СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ И ОПТИМИЗАЦИИ  
ЭНЕРГОРЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВ И ЦЕПЕЙ ПОСТАВОК  
НЕФТЕГАЗОХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА  
MODERN CONCEPTS OF INTENSIFICATION AND OPTIMIZATION OF ENERGY  
AND RESOURCE EFFICIENCY OF MANUFACTURES AND SUPPLY CHAINS OF OIL  
AND GAS COMPLEX**

**Валерий Павлович Мешалкин  
Valery P. Meshalkin,**

*Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Россия, Москва  
Mendeleev Russian University of Chemical Engineering, Russia, Moscow  
(e-mail: vpmeshalkin@gmail.com)*

*Аннотация:* В современных условиях глобальной конкуренции интенсификация является основным научно-технологическим направлением развития производств и цепей поставок нефтегазохимического комплекса (НГХК). В работе изложены понятие химизации экономики, сущность и основные виды инжиниринга, а также способы энергоресурсосбережения в НГХК. Дана классификация математических задач оптимизации энергоресурсоэффективности химико-технологических систем и логистического планирования цепей поставок промышленных предприятий НГХК.

*Abstract:* In modern conditions of global competition, intensification is the main scientific and technological direction of development of production and supply chains of the oil and gas complex (OGC). The paper describes the concept of economy chemization, the essence and the main types of engineering as well as ways of energy and resource saving in OGC. The classification of mathematical problems of optimization of energy and resource efficiency of chemical technological systems and logistic planning of supply chains of industrial enterprises of OGC are given.

*Ключевые слова:* интенсификация, оптимизация, энергоресурсоэффективность, инжиниринг, предприятие, цепи поставок, нефтегазохимический комплекс

*Keywords:* intensification, optimization, energy and resource efficiency, engineering, enterprise, supply chain, oil and gas complex

Производства нефтегазохимического комплекса (НГХК) представляют собой сложные химико-технологические системы (ХТС), которые выпускают разнообразную крупно- и малотоннажную продукцию [1, 2].

В условиях перехода к устойчивому социально-экономическому развитию государств в экономике используются два основных принципа развития производств НГХК — экстенсивный и интенсивный. Экстенсивный принцип развития предусматривает только количественный рост материально-технических ресурсов производства на прежнем техническом уровне, что приводит к неизменной или растущей величине ресурсоемкости производства и удельных затрат.

Интенсивный принцип развития производств НГХК предусматривает использование наиболее совершенных и эффективных средств производства, технологических процессов (ХТП), способов организации производства и труда, разработанных на основе новейших достижений научно-технологического прогресса.

В современных условиях глобальной конкуренции интенсификация — основное научно-технологическое направление развития производств НГХК.

Интенсификация ХТС и ХТП обеспечивает экономию удельных расходов сырья и топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) при увеличении выпуска высококачественной

продукции с выполнением требований охраны окружающей среды (ОС) от загрязнений [3, 4].

**Интенсификация** ХТС и отдельных химико-технологических процессов (ХТП), входящих в технологические схемы ХТС, – это результат комплексной научно-исследовательской, инжиниринговой, финансово-экономической и организационно-управленческой деятельности по разработке, практической реализации и использованию при эксплуатации ХТП и ХТС эффективных способов, приёмов, методов, устройств и инструментов для выпуска высококачественной химической продукции и обеспечения устойчивого развития производства за счёт целенаправленного использования различных внутренних и внешних качественных факторов для изменения и комбинирования физико-химических явлений в ХТП; оптимизации режимов функционирования ХТП и стратегий управления техническим обслуживанием ХТС; применения новых типо-конструкций оборудования и организации рациональной структуры систем, которые позволяют существенно повысить скорость протекания ХТП, увеличить производительность, надёжность и безопасность ХТС, уменьшить размеры оборудования и рационально использовать все виды ресурсов производства, что позволяет сокращать удельные расходы материальных, финансово-экономических и трудовых ресурсов и снижать затраты времени (длительность технологического цикла производства) на выпуск конкурентоспособной продукции с высокой добавленной стоимостью.

В настоящее время в соответствии с достижениями современного научно-технологического прогресса для интенсификации ХТС и ХТП широко применяют различные способы и приемы ресурсоэнергосбережения, методы логистики ресурсосбережения, принципы «зеленой» химии, а также интеллектуально-вычислительные методы и информационно-коммуникационные инструменты компьютеризированного инжиниринга, автоматизированного управления эксплуатацией сложных ХТС, предприятий и информационные системы логистического управления цепями поставок НГХК [2, 4-9].

Для количественной оценки результатов интенсификации ХТС и ХТП используют различные виды критериев эффективности – технологические, технико-экономические, финансовые и экономические критерии, а также оценки из сбалансированной системы показателей эффективности (Balanced Score-Card – BSC) [1, 4-6, 10].

Интенсификация и повышение энергоресурсоэффективности ХТС принципиально позволяет осуществить всестороннюю химизацию экономики [1, 6, 10].

Химизации экономики представляет собой комплексную научно-исследовательскую, образовательную, инжиниринговую, финансово-экономическую и организационно-управленческую деятельность по всестороннему целенаправленному применению в различных областях и средах деятельности экономики новейших видов химической продукции (веществ и материалов), химических методов обработки. С развитием техники и технологий все методы обработки совершенствуются, однако в их соотношении можно проследить знаменательную тенденцию. Механические методы в большинстве случаев заменяются более эффективными - химическими и физико-химическими. Химические методы обработки применяются в различных отраслях производства. Эти методы играют решающую роль в металлургии (например, применение кислородного дутья), энергетике (химические процессы в топливных элементах и ядерной энергетике), машиностроении (обработка и придание формы твёрдым материалам). Химизация посредством новых методов и новых синтетических материалов обеспечивает принципиально новый научно-технологический уровень развития машиностроения, авиакосмической техники, радиоэлектроники и информационно-коммуникационных инструментов.

Для обеспечения высоких показателей интенсификации, энергоресурсоэффективности, надёжности и экологической безопасности различных химико-технологических систем (ХТС) [1-4] производства конкурентоспособных высококачественных материалов и химических веществ в соответствии с требованиями, спецификациями, руководящими принципами и характеристиками производственных систем, технических устройств, бизнес-

процессов, продукции и услуг, устанавливаемыми Национальными стандартами России и Международной организации по стандартизации, ИСО (International Organization for Standardization, ISO) в области ресурсосбережения, энергосбережения и экологического менеджмента, а также характеристиками нормативно-правовых актов по наилучшим доступным технологиям (Best Available Techniques REFerences – «BAT-BREF») [3, 11, 12] различным специалистам необходимо выполнять при проектировании, строительстве и эксплуатации энергоресурсосберегающих ХТС разнообразные виды инжиниринга.

**Инжиниринг** – это комплексная техническая, расчетно-графическая, организационно-техническая, технико-экономическая и консультативно-техническая деятельность, которая реализует выполнение разнообразной научно-исследовательской, проектно-конструкторской, расчетно-аналитической, организационно-управленческой и технико-экономической работы на всех этапах жизненного цикла (предпроектные исследования, технико-экономическое обоснование; бизнес-планирование; управление проектированием; разработка проектов; строительство и пуск в эксплуатацию; управление эксплуатацией и техническим обслуживанием) любых производственных систем, в том числе ХТС, технических и социально-экономических систем. Сложным ХТС соответствуют производства, входящие в структуру предприятий и цепей поставок (ЦП) нефтегазохимического комплекса (НГХК), теплоэнергетического и металлургического комплекса [1-5].

Для получения научно-обоснованных результатов инжиниринга оптимальных энергоресурсоэффективных высоконадежных ХТС и цепей поставок (ЦП) НГХК необходимо широко использовать методы и алгоритмы теории анализа, оптимизации и синтеза ХТС; методы логистики ресурсосбережения и оптимального организационно-функционального проектирования энергоресурсоэффективных ЦП [1-5, 7-9].

**Инжиниринг**, с учетом одного из современных определений **логистики** как вида организационно-технической и управленческой деятельности (в широком понимании), – это «**подробное планирование любой сложной операции**» (см. A Dictionary of Business and Management, 4-th Edition, Oxford University Press, 339 p.), которое безусловно включает разнообразную логистическую деятельность и логистическое управление ЦП не только материальных потоков разнообразной промышленной продукции, товаров и услуг, но и интеллектуальных потоков различных знаний, навыков и умений, т.е. компетентностей, представляющих собой важнейшую интеллектуальную продукцию современной **электронной экономики и экономики знаний** [3, 7-9].

В настоящее время выделяют следующие **основные виды инжиниринга: функционально-производственный, комплексный технический, строительный, эксплуатационный, международный и компьютеризированный** [13, 14].

**Виды функционально-производственного инжиниринга по отраслям и сферам деятельности экономики, а также по отраслям техники:**

– **Системотехника (System Engineering)** (профессор, д.т.н. Темников Ф.Е. – профессор кафедры Автоматики и телемеханики МЭИ впервые в 1961 году ввел этот термин в России);  
– **Химическая техника (химический инжиниринг, химическая инженерия)**, или в русскоязычной научно-технической литературе – «**процессы и аппараты химической технологии**» (*Chemical Engineering*); – **Инжиниринг (инженерия, техника) химико-технологических систем (Chemical Process Engineering)**, или в русскоязычной научно-технической литературе – «**разработка химико-технологических систем**»; – **Энергетическая техника (Power Engineering)**; – **Теплотехника (Heat Engineering)**; – **Машиностроение (Mechanical Engineering)**; – **Логистическая техника, или «инженерная логистика» (Logistics Engineering)**; – **Инжиниринг (инженерия) знаний (Knowledge Engineering)**.

**Компьютеризированный (автоматизированный) инжиниринг (Computer-Aided Engineering)** – мультидисциплинарные, многомасштабные (многоуровневые) и многоэтапные разработки и исследования проектов с широким применением ЭВМ,

обеспечивающие автоматизированное выполнение всех видов инженерно-технических разработок по созданию технических систем и промышленных объектов на основе широкого использования средств и оборудования вычислительной техники, а также наукоемких информационно-коммуникационных технологий (ИКТ), включая инструментальные комплексы технических и программных средств автоматизированного проектирования изделий (*Computer-Aided Design – CAD-технологий*); инструментальные комплексы компьютеризированной интегрированной логистической поддержки (*Computer-Aided Logistics Support – CALS-технологий*), по мере совершенствования которых существенно расширился спектр охватываемых ими функций. **В настоящее время оставшаяся неизменной аббревиатура CALS получила новую расшифровку – Continuous Acquisition (Information) and Life-cycle Support** – непрерывная интегрированная информационная поддержка всего **жизненного цикла (ЖЦ)** изделия, или непрерывное накопление информации и поддержка ЖЦ [3, 5, 15, 16].

Для оптимального управления эксплуатацией энергоресурсоэффективных промышленных производств и ЦП предприятий НГХК осуществляется инжиниринг систем компьютеризированного логистического управления ресурсами предприятий (*Enterprise Resource Planning – ERP-систем*), систем управления ЦП (*Supply Chain Management – SCM-систем*), систем управления отношениями с потребителями (*Customer Relation Management – CRM-систем*), а также систем компьютеризированного управления ЖЦ продукции (*Product Life-cycle Management – PLM-систем*) и систем управления данными о продукции (*Product Data Management – PDM-систем*).

Разработка научно-обоснованных технологических, инженерно-технических, организационно-технических, экономических и организационно-хозяйственных мероприятий по интенсификации в НГХК и по созданию энергоресурсосберегающих ХТС методологически базируется на применении следующих основных способов обеспечения энергоресурсосбережения: наилучшего использования движущей силы (ДС) ХТП; наиболее полной переработки сырья; рационального использования топливно-энергетических ресурсов; наилучшего функционально-структурного использования аппаратов и машин; способа замкнутого водоснабжения; обеспечения и повышения надежности производства; рациональной пространственной компоновки производства [1-4].

Для практической реализации различных способов энергоресурсосбережения в НГХК применяются разнообразные режимно-параметрические, технологические, аппаратурно-конструкционные и организационно-технические приемы и операции.

Режимно-параметрические и технологические приемы и операции обеспечивают энергоресурсосбережение для каждого ХТП, входящего в структуру ресурсосберегающих химических производств (РХП) за счет микро - и макроскопических воздействий на движущую силу, на кинетику и на механизм протекания химических, тепло - и массообменных явлений, а также на гидродинамическую структуру потоков в аппаратах химической технологии. Для эффективного использования любого из режимно-параметрических и технологических приемов или операций с целью повышения показателей ресурсосбережения каждого ХТП как сложной физико-химической системы необходимо, прежде всего, выявить лимитирующую стадию ХТП.

Технологические приемы и операции обеспечивают энергоресурсосбережение для каждого ХТП и для ХТС в целом за счет рационального совмещения различных ХТП в одном аппарате; дискретно-периодической подачи вещества в аппарат; использования внешних энергетических воздействий на перерабатываемые вещества; создания рациональной структуры технологических потоков между аппаратами ХТС; исключения нерациональных промежуточных технологических стадий производств.

Аппаратурно-конструкционные приемы и операции обеспечивают энергоресурсосбережение для отдельных ХТП и для ХТС в целом за счет микро- и макрокинетических воздействий на физико-химические явления, протекающие в аппаратах;

за счет изменения инженерно-аппаратурного оформления ХТП, влияющего на механизм протекания ХТП, на гидро - и аэродинамические характеристики отдельных узлов и аппаратов в целом; использования энергии контактирующих фаз и создания многократного взаимодействия, перерабатываемых веществ в аппаратах.

Организационно-технические приемы и операции обеспечивают энергоресурсосбережение для отдельных ХТС и территориально-промышленных комплексов путем рационального использования природных ресурсов, наиболее полной регенерации и рекуперации вторичных материальных ресурсов и сокращения отходов производства [1-4].

Кратко рассмотрим общую характеристику основных приемов, операций и средств, направленных на обеспечение ресурсосбережения в НГХК.

**1. Важнейшими режимно-параметрическими приемами и операциями ресурсосбережения являются:** 1.1) оптимизация значений концентраций перерабатываемых веществ; 1.2) оптимизация значений параметров технологических режимов ХТП — температуры и давления; 1.3) смещение состояния равновесия обратимых ХТП в желаемом направлении; 1.4) изменение механизма химических превращений; 1.5) использование одного из реагентов в избытке; 1.6) применение высокоактивных и селективных катализаторов; 1.7) изменение скоростей движения фаз перерабатываемых веществ; 1.8) увеличение поверхности соприкосновения перерабатываемых веществ; 1.9) изменение направления движения потоков взаимодействующих веществ; 1.10) ввод дополнительных веществ (инициаторов, промежуточных теплоносителей, поверхностно-активных веществ, растворителей, разделяющих агентов); 1.11) изменение числа фаз перерабатываемых веществ (ввод инертных газов или твердых тел, изменение агрегатного состояния одного из перерабатываемых веществ путем конденсации или испарения, кристаллизация одного из продуктов реакции).

**2. Основными технологическими приемами и операциями энергоресурсосбережения являются:** 2.1) совмещение различных процессов химической технологии в одном аппарате (различных химических процессов, химических и массообменных процессов; химических и теплообменных процессов); 2.2) дискретно-периодическая подача потоков перерабатываемых веществ в аппарат (периодическая подача потоков веществ, наложение внешней пульсации на фазы и потоки веществ, использование турбулентных пульсаций.); 2.3) создание внешних энергетических воздействий на ХТП (электрических и магнитных полей, радиационного и лазерного излучения); 2.4) применение внешних перемешивающих устройств; 2.5) регенерация и рекуперация вторичных материальных ресурсов; 2.6) создание рациональных технологических связей между аппаратами ХТС (байпасные, параллельные и обратные технологические потоки вещества и энергии); 2.7) исключение промежуточных технологических стадий и операций; 2.8) согласование режимов функционирования ХТП.

**3. К важнейшим аппаратурно-конструкционным приемам и операциям энергоресурсосбережения относятся:** 3.1) создание рациональных конструкций аппаратов (выбор геометрической формы узлов и деталей аппарата, в частности, единиц массопереноса, выбор материала конструкций); 3.2) определение оптимальных размеров аппарата; 3.3) изменение схем движения перерабатываемых веществ; создание многократного воздействия на фазы перерабатываемых веществ (продольное и поперечное секционирование, распределение фаз по высоте аппарата, многократная инверсия фаз и др.); 3.4) использование энергии контактирующих фаз (турбулизация и соударение потоков, закручивание фаз, транспортирование одной фазы другой фазой, взаимное эжектирование и др.); 3.5) совмещение дельных узлов и аппаратов (комбинирование однотипных аппаратов и узлов, агрегирование функций аппаратов и узлов); 3.6. модульное конструирование многофункциональных аппаратов.

**4. Главными организационно-техническими приемами ресурсосбережения в химической индустрии являются:** 4.1) обогащение и выбор наилучших видов

природного сырья; 4.2) комплексная переработка минерального сырья; 4.3) комбинирование ХТП; 4.4) комбинирование ХТС.

Необходимо отметить, что большинство режимно-параметрических, технологических и аппаратурно-конструкционных приемов энергоресурсосбережения диалектически взаимосвязаны.

Рассмотрим классификацию математических задач оптимизации энергоресурсоэффективности ХТС и логистического планирования ЦП промышленных предприятий НГХК:

**1. Типовые задачи дискретной оптимизации ЦП:** 1.1. Задача Целочисленного Линейного Программирования (ЦЛП). 1.2. Классическая транспортная задача. 1.3. Транспортная задача с промежуточными пунктами. 1.4. Задача о назначениях. 1.5. Задача выбора критического (минимального) пути. 1.6. Задача коммивояжера. 1.7. Методы ограниченного упорядоченного перебора на дереве вариантов логистических решений.

**2. Задачи смешенного целочисленного линейного программирования (СЦЛП-МЛР):** 2.1. Транспортно-складская задача. 2.2. Производственно-транспортная складская задача. 2.3. Задача имитационно-систематического моделирования. 2.4. Задача оптимизации ЦП в условиях неопределённости (нечеткости) информации. Решение указанных задач ЦЛП и СЦЛП осуществляют с применением инструментальных комплексов программ: «MS Excel», «Extend», «Oracle Strategic Network Optimisation (SNO)», «BP Win» стандарт «IDEF 0», «MS Access», «AMPL».

При оптимизации ХТС учет рыночных механизмов, организационно-функциональной структуры и режимов многопериодного функционирования ЦП нефтегазохимических предприятий, а также эколого-экономических показателей, приобретает особую актуальность и требует разработки специальных математических моделей и алгоритмов стохастической многокритериальной оптимизации [17-19].

В последние годы появилось огромное количество научно-технической литературы по оптимизации ЦП и сложных ХТС в нефтегазохимическом комплексе (НГХК), топливно-энергетическом комплексе, пищевой и фармацевтической промышленности с использованием различных математических моделей, учитывающих специфику и перспективы развития различных отраслей реального сектора экономики.

Проблемы охраны ОС и обеспечения экологической безопасности в последнее время породили бурный рост публикаций по «зеленым» цепям поставок НГХК, включающим добычу природного газа (ПГ), транспортировку, распределение и переработку ПГ с получением продуктов с высокой добавленной стоимостью [1, 17-19].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Анализ и синтез химико-технологических систем. – М.: Химия, 1991. – 432 с.

2. Meshalkin V.P. Energy-saving technology performance and efficiency indexes //Chem. Eng. Transactions. – 2009. – Т. 18. – С. 953-958.

3. Мешалкин В. П. Ресурсоэнергоэффективные методы энергообеспечения и минимизации отходов нефтеперерабатывающих производств: основы теории и наилучшие практические результаты. – М.; Генуя: Химия, 2010. – 393 с.

4. Мешалкин В.П., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А. Основы энергоресурсоэффективных экологически безопасных технологий нефтепереработки. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – 616 с.

5. Мешалкин В.П., Ходченко С.М. Сущность и виды инжиниринга энергоресурсоэффективных химико-технологических систем // Все материалы. Энциклопедический справочник. Приложение «Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам». – 2017. – №6. – С. 2-10.

6. D.K. Babi, M.S.Cruz, R. Gani Fundamentals of Process Intensification: A Process System Engineering View. «Springer». – 2015. – 537 p.

7. Мешалкин В.П. Логистика ресурсоэнергосбережения – важнейший организационно-управленческий фактор повышения конкурентоспособности нефтегазохимического комплекса // Стратегия объединения: Решение актуальных проблем нефтегазового и нефтехимического комплексов на современном этапе: Тез. докл. 3 Междунар. пром.-эконом. Форума. – М., 2010. – С. 45-47.
8. Мешалкин В.П. Методы логистики ресурсосбережения как организационно-управленческие инструменты модернизации нефтегазохимического комплекса // Менеджмент в России и за рубежом. – 2011. - Вып. 5. – С. 37 – 51.
9. Мешалкин В.П. Логистика и электронная экономика в условиях перехода к устойчивому развитию. – М.: АНО «Изд-во физ.-мат. лит.», 2004. - 408 с.
10. Бабкин В.В. Успенский Д.Д. Новая стратегия: Химия 2030. Высокие переделы. Кластеризация. Химизация индустрии РФ. – М.: Лика – 2015. – 222с.
11. [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/ Best Available Techniques REFErences «BAT-BREF»](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/Best%20Available%20Techniques%20References%20(BAT-BREF)).
12. Боравский Б.В., Скобелев Д.О., Венчикова В.Р., Боравская Т.В. Наилучшие доступные технологии. Аспекты практического применения. – М.: «Перо», 2014. – 184с.
13. Л. Осика. Современный инжиниринг: определение и предметная область // ЭнергоРынок. – апрель 2010. – № 04 (76) (<http://www.e-m.ru/er/2010-04/29516/>).
14. Стровский Л.Е. и др. Инжиниринг // Международные экономические отношения / Под редакцией профессора Л.Е. Стровского – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – С. 102-104. – 461 с.
15. Мешалкин В.П. Экспертные системы в химической технологии. – М.: Химия, 1993
16. Мешалкин В.П., Мошев Е.Р. Комплекс программ поддержки жизненного цикла трубопроводных систем нефтехимических предприятий // Прикладная информатика. 2016. Т. 11. № 4 (64) С. 57-75.
17. Мешалкин В.П., Дови' Макс-Себастьян, Ходченко С.М., Кантюков Р.Р. Оптимизация энергоресурсоэффективности и экологической безопасности систем газоснабжения // Датчики и системы. – 2017. – №4. – С. 3-15.
18. Дови М.С., Мешалкин В.П., Кантюков Р.Р. Математическая формализация задач экономической оптимизации газотранспортных сетей. // Менеджмент в России и за рубежом. – 2017. – № 2. – С.23-33.
19. Мешалкин В.П., Дови' В., Марсанич А. Стратегия управления логистическими цепями химической продукции и устойчивое развитие. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2003. – 542 с.

УДК 66.021.3:691.32:624.012.4

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ДЛЯ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕСТРУКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ  
СТРОИТЕЛЬСТВА**

**FEATURES OF APPLICATION OF THE THEORY OF THE HEAT AND MASS  
TRANSFER FOR THE MODELLING OF DESTRUCTIVE PROCESSES IN  
CONSTRUCTION OBJECTS**

**Сергей Викторович Федосов  
Sergey V. Fedosov**

*Ивановский государственный политехнический университет, Россия, Иваново  
Ivanovo State Polytechnic University, Russia, Ivanovo  
(e-mail: prezident@ivgpu.com)*

*Аннотация:* Приведены предпосылки возникновения теории тепломассопереноса, аспекты и проблемы ее создания. Представлены основные уравнения теории тепломассопереноса, полученные академиком А.В. Лыковым. Описаны современные проблемы, с которыми сталкиваются инженеры-строители при проектировании и возведении зданий и сооружений. На примере жидкостной коррозии цементного бетона первого вида в системе «бетонный резервуар – жидкость» рассмотрена физическая картина процессов массопереноса.

*Abstract:* Prerequisites of emergence of the theory of a heat and mass transfer, aspects and problems of her creation are given. The basic equations of the theory of heat and mass transfer obtained by the academicians A.V. Lykov are presented. Modern problems which civil engineers face at design and construction of buildings and constructions are described. On the example of liquid corrosion of cement concrete of the first type in the system «concrete tank-liquid» the physical picture of mass transfer processes is considered.

*Ключевые слова:* тепломассоперенос, коррозионный массоперенос, математическое моделирование, коррозия бетона.

*Keywords:* heat and mass transfer, corrosion mass transfer, mathematical modeling, corrosion of concrete.

Теория тепломассопереноса [1] изначально «явилась» мировому научному сообществу как наука, описывающая и объясняющая явления переноса субстанции (количества движения, теплоты и массы вещества) в неподвижных и движущихся средах. Впоследствии, в связи с бурным развитием основных отраслей отечественной промышленности (химической [2], текстильной [3], строительной [4], пищевой [5], медицинской [6]), изменился и подход к теории взаимосвязанного тепломассопереноса. От нее исследователи, проектировщики и инженеры-эксплуатационщики стали «требовать» не только объединение явлений с позиций «что?», «как?» и «почему?», но и ответов на самые главные вопросы: «как интенсифицировать технологический процесс?», «что надо предпринять, чтобы интенсивность технологического процесса выростала, чтобы как можно больше продукции производить при сокращении затрат энергетических и материальных ресурсов на единицу продукции?».

При этом все большее значение приобретают технологические процессы в системах с дисперсной твердой фазой [7, 8], поскольку с увеличением дисперсности (уменьшение размеров частиц твердой среды) не только возрастает межсредная поверхность контакта фаз, но и, соответственно, интенсивность протекания процессов переноса теплоты и массы вещества. При уменьшении размеров частиц до наноструктур существенное влияние на

процессы переноса начинают оказывать эффекты микроуровня: физико-химия поверхности и их межфазных взаимодействий [9].

«Знаменитая» система дифференциальных уравнений взаимосвязанного тепломассопереноса, полученная академиком А.В. Лыковым, традиционно записывается в виде:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_q \nabla^2 t + \varepsilon r \frac{c_m}{c_q} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{c_p k}{c_q \gamma_0} \nabla P \nabla t, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 \theta + a_m \delta' \nabla^2 t + a_m \delta'' \nabla^2 P, \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = a_p \nabla^2 P - \varepsilon \frac{c_m}{c_p} \frac{\partial \theta}{\partial \tau}. \quad (3)$$

Краевые условия:

- начальные:

$$t(x, y, z, \tau) \Big|_{\tau=0} = t_0(x, y, z), \quad (4)$$

$$\theta(x, y, z, \tau) \Big|_{\tau=0} = \theta_0(x, y, z), \quad (5)$$

$$P(x, y, z, \tau) \Big|_{\tau=0} = P_0(x, y, z), \quad (6)$$

- граничные:

$$-\lambda_q (\nabla t)_n + q_q(\tau) - (1 - \varepsilon) r q_m(\tau) = 0, \quad (7)$$

$$\lambda_m (\nabla \theta)_n + \lambda_m \delta' (\nabla t)_n + \lambda_p (\nabla P)_n + q_m(\tau) = 0, \quad (8)$$

$$P_n = p = const. \quad (9)$$

Здесь:  $t$ ,  $\theta$ ,  $p$  – функции, определяющие значения потенциалов переноса (теплоты, массы, давления), в пространстве координат твердого тела в произвольные моменты времени;  $a_q$ ,  $a_m$ ,  $a_p$  – коэффициенты переноса, соответственно, температуро-, массо- и баропроводности;  $C_q$ ,  $C_m$  – коэффициенты тепло- и массоемкости;  $r$  – скрытая теплота парообразования (теплота фазового перехода);  $\varepsilon$  – степень фазового перехода;  $\delta_\tau$  – коэффициент термодиффузии (термоградиентный коэффициент);  $C_p$ ,  $C_v$  – удельные теплоемкости;  $\lambda_q$ ,  $\lambda_m$  – коэффициенты тепло- и массопроводности;  $q_q$ ,  $q_m$  – плотности потоков теплоты и массы вещества, определяющие межфазный перенос между более плотной (твердой) и менее плотной (жидкой, газовой) фазами.

Даже в достаточно упрощенной постановке задачи взаимосвязанного тепломассопереноса в форме системы уравнений (1)-(9) (а под упрощенностью в данном случае будем понимать линейную запись уравнений (1)-(3) при постоянстве коэффициентов переноса) исследователю приходится иметь дело с весьма непростой проблемой определения динамики и кинетики процессов для трех потенциалов переноса при учете порядка двадцати коэффициентов переноса.

На современном этапе развития науки решению этих проблем способствует развитие методов математической физики и численных методов решения с помощью современных компьютерных технологий.

Безусловно, этому развитию способствует и обмен мнениями исследователей в рамках интеграции и общение на международных форумах [10-12].

Прогресс в данном направлении достигнут колоссальный.

Вместе с тем, менее удостоенным внимания научного сообщества считает проблема сохранения имеющегося культурного природного и рукотворного наследия. Созданные руками человеческого гения уникальные античные и современные архитектурные сооружения под воздействием временных, природных и антропогенных явлений разрушаются. Увы, иногда этот процесс приводит к полной потере уникальных сооружений.

Предотвратить разрушения, понять физико-химические аспекты, приводящие к деструктивным процессам, и на основе определенного переосмысления теории

тепломассопереноса предложить пути, методологию, методы и инструментарий для замедления деструкционных процессов, а еще лучше – «залечить» раны, нанесенные деятельностью человека (или природой под воздействием этой деятельности) – вот одна из благороднейших задач нашего и последующих поколений.

Задача эта комплексная и многокомпонентная. В соответствии с этим она требует комплексного подхода к своему решению.

Рассмотрим лишь одну из множества проблем: проблему коррозии бетона гидротехнического сооружения.

Бетон – строительный материал, известный человеку еще из глубины веков на рубеже третьего-четвертого тысячелетий до нашей эры, стремительно ворвался в 19-е столетие, а затем современниками был назван строительным материалом 20-го века. И в начавшемся 21-м веке он остается наиболее популярным материалом для возведения уникальных сооружений и типовых зданий промышленного и гражданского назначения [13].

Вместе с тем, как синтетический композит, созданный руками человека, бетон (железобетон) остается предметом пристального внимания исследователей. И наравне с вопросами решения технологических проблем создания и жизненного цикла эксплуатации железобетонных конструкций внимание исследователей сохраняется к проблеме долговечности бетонов. И не только для целей сохранения уникальных сооружений для потомков, но и в плане безопасности жизнедеятельности человека.

И фраза: «история строительной науки написана кровью» не только не потеряла своей актуальности, но наоборот приобретает все более новые черты, «благодаря» последствиям техногенных катастроф.

Вот лишь некоторые тому свидетельства. В июне 2002 года в районе Ясенево на юго-западе Москвы открывается спортивно-развлекательный комплекс «Трансвааль-парк», представляющий собой многоуровневые пятиэтажные здания, в плане имеющие форму хвоста кита. 14 февраля (день Святого Валентина) 2004 года купол здания рухнул на всю водную часть комплекса, кроме бассейна для взрослых. Погибло 28 человек. В официальном заключении было отмечено, что причиной обрушения явился комплекс проектных ошибок, обусловленный грубыми просчетами при разработке проекта. Однако, по мнению некоторых ученых, входящих в состав комиссии по расследованию, одной из причин явилась коррозия бетонного купола, в результате которой и произошло неконтролируемое снижение прочности конструкции.

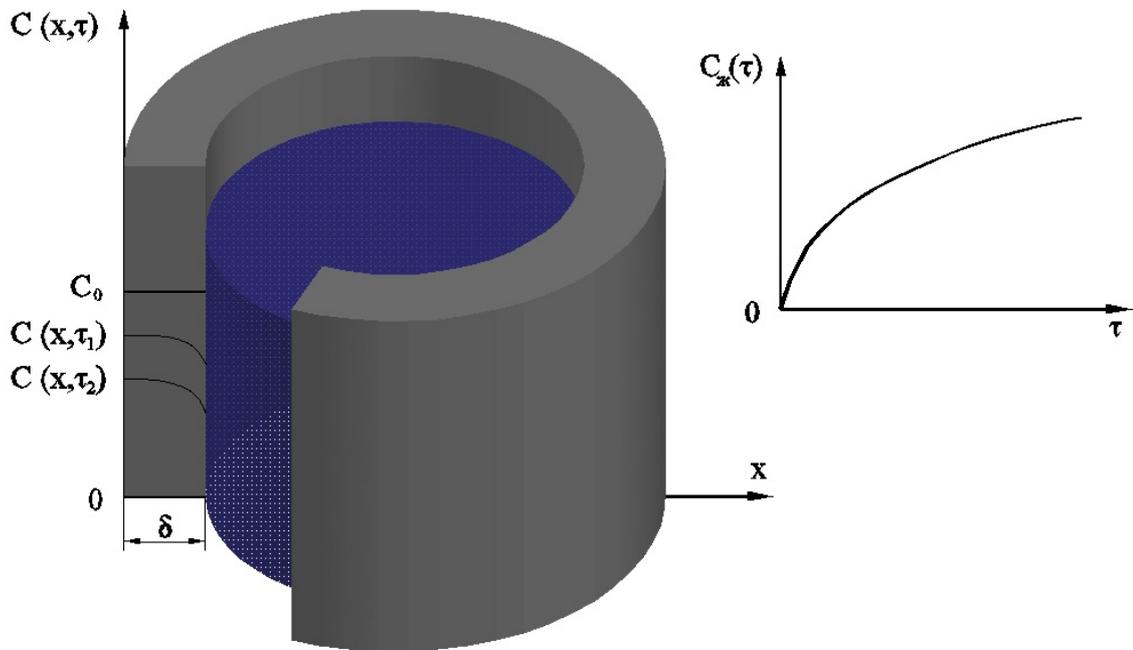
Еще один пример: обрушение кровельной части здания Басманного рынка, построенного в Москве в 1974 году. Здание имело округлую форму диаметром 90 м. Крыша здания представляла собой железобетонную висячую оболочку без опор в форме выгнутого купола на системе тросов. 23 февраля 2006 года (день Защитников Отечества) произошло обрушение крыши. Погибло 68 человек. Слабым утешением явилось то, что трагедия произошла в 5:45 утра, когда еще рынок не был заполнен людьми. Иначе масштабы трагедии были бы неизмеримо больше. Комитетом по расследованию было установлено, что обрушение произошло вследствие обрыва одного из вантовых тросов, на которых держалась крыша. А сам обрыв стал следствием нескольких причин, одной из которых была коррозия материала ванты.

Определить условия, при которых строительное сооружение достигает критических значений прочностных характеристик элементов конструкции, не допустить спонтанного высокоскоростного процесса обрушения должен помочь тщательный анализ использования возможностей теории тепломассопереноса [14].

Рассмотрим один из простых примеров: жидкостная коррозия первого вида цементного бетона [15-17] в замкнутом объеме «жидкость-резервуар».

Рисунок 1 [17] иллюстрирует физическую картину процессов массопереноса в рассматриваемой системе. Основным компонентом, который определяет устойчивость системы с точки зрения физико-химических особенностей процессов, является гидроксид кальция. Он входит в состав основных компонентов бетонной матрицы и, кроме того,

находится в насыщенном (или перенасыщенном) состоянии в поровой жидкости бетона. При этом эксплуатационные прочностные показатели железобетонных сооружений в определяющей мере зависят от состояния гидроксида кальция в порах бетона: находится он в насыщенном (или пересыщенном) состоянии. Когда равновесие в системе сдвинулось, гидроксид кальция начнет «вымываться» («выщелачиваться») из твердой фазы в жидкую, и тогда начнется процесс разрушения высокоосновных соединений бетона, приводящий к неизменной потере прочности конструкций.



**Рис. 1. Схема резервуара для хранения жидкости с характерными профилями концентраций переносимого компонента в бетоне и в жидкой**

На характер процесса массопереноса практически не влияют явления баропереноса. В принципе, конструкции находятся в определенных температурно-влажностных условиях эксплуатации, но, в большинстве практических случаев влияние температуры на характер массопереноса весьма незначительно.

Учитывая изложенное, при формулировании общей задачи из системы уравнений взаимосвязанного тепло-массопереноса можно оставить лишь уравнение (2).

Вместе с тем, в работах [16, 17] показано, что в порах бетона гидроксид кальция может находиться в состоянии в 4-5 раз превышающем значения концентрации предельной растворимости насыщения. И это превышение может рассматриваться как источник массы вещества, оказывающий существенное влияние на физико-химические особенности процесса.

Таким образом, задача диффузии «свободного гидроксида кальция» в системе «бетонный резервуар – жидкость» может быть представлена следующим образом:

$$\frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2}, \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1, \quad Fo_m > 0, \quad (10)$$

$$Z(\bar{x}, Fo_m) \Big|_{Fo_m=0} = \frac{C_0 - C(x, \tau)}{C_0} \Big|_{\tau=0} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{1}{Bi_m} \cdot \frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = \left[ Z_p(Fo_m) - Z(\bar{x}, Fo_m) \right]_{\bar{x}=1}, \quad (13)$$

$$-\frac{\partial Z_{жс}(Fo_m)}{\partial Fo_m} = K_m \cdot \left. \frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \right|_{\bar{x}=1}, \quad (14)$$

$$K_m = \frac{m \cdot S \cdot \delta}{V_{жс}} \cdot \frac{\rho_{бет}}{\rho_{жс}} = \frac{m \cdot G_{бет}}{G_{жс}}, \quad (15)$$

здесь:  $Fo_m = k\tau/\delta^2$  - массообменный критерий Фурье;  $Bi_m = \beta^* \cdot \delta/k$  - массообменный критерий Био;  $Po_m^* = q_v \cdot \delta^2 / k \cdot C_0 \cdot \rho_{бет}$  - модифицированный массообменный критерий Померанцева;  $Z(\bar{x}, Fo_m)$  - безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине бетона;  $Z_p(Fo_m) = (C_0 - C_p)/C_0$  - безразмерная равновесная концентрация на поверхности твердого тела;  $Z_{жс}(Fo_m) = (C_0 - mC_{жс})/C_0$  - безразмерная концентрация переносимого компонента в жидкой фазе;  $C(x, \tau)$  - концентрация «свободного гидроксида кальция» в бетоне в момент времени  $\tau$  в произвольной точке с координатой  $x$ , кг СаО/кг бетона;  $C_p(\tau)$  - равновесная концентрация на поверхности твердого тела, кг СаО/кг бетона;  $C_{жс}(\tau)$  - концентрация гидроксида кальция в жидкости, кг СаО/кг жидкости;  $k$  - коэффициент массопроводности в твердой фазе, м<sup>2</sup>/с;  $\beta^*$  - модифицированный коэффициент массоотдачи в жидкой среде, м/с;  $\delta$  - толщина стенки конструкции, м;  $x$  - координата, м;  $\tau$  - время, с;  $\rho_{бет}, \rho_{жс}$  - плотности бетона и жидкости, соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $m$  - константа Генри, кг жидкости/кг бетона;  $K_m$  - коэффициент, учитывающий характеристики фаз;  $G_{бет}, G_{жс}$  - массы бетонного резервуара и жидкости, кг.

Решение системы уравнений велось методом интегрального преобразования Лапласа, т.е. исходная система уравнений отображалась в область комплексных чисел, в которых было получено решение системы, а затем произведен перевод решения в область оригиналов. В результате было получено общее решение задачи массопроводности, описывающее динамику полей концентраций:

$$Z(\bar{x}, Fo_m) = \frac{Z_p(0)}{K_m + 1} - 2Bi_m \cdot Z_p(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\mu_m \cdot \cos(\mu_m \bar{x})}{\psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \cdot \exp(-\mu_m^2 Fo_m) + 2Po_m^* \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos(\mu_m \bar{x}) \cdot \varphi(Bi_m, K_m, \mu_m)}{\mu_m^2 \cdot \psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \cdot \exp(-\mu_m^2 Fo_m), \quad (16)$$

$$\text{где: } \varphi(Bi_m, K_m, \mu_m) = (\mu_m^2 - Bi_m \cdot K_m) \cdot \sin \mu_m - \mu_m \cdot Bi_m \cdot (\cos \mu_m - 1), \quad (17)$$

$$\psi'(Bi_m, K_m, \mu_m) = [\mu_m^2(3 + Bi_m) - Bi_m \cdot K_m] \cdot \sin \mu_m + \mu_m [\mu_m^2 - Bi_m(K_m + 2)] \cdot \cos \mu_m, \quad (18)$$

$$tg \mu_m = \frac{\mu_m \cdot Bi_m}{\mu_m^2 - Bi_m \cdot K_m} - \text{характеристическое уравнение.} \quad (19)$$

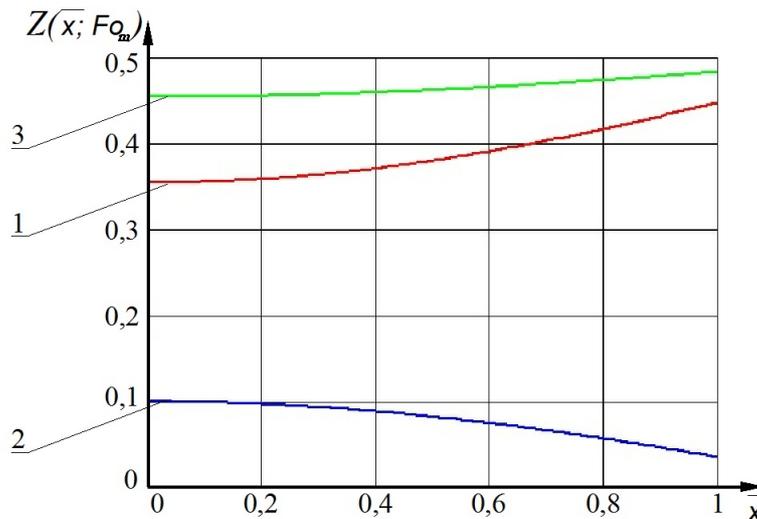
Чтобы получить выражение для расчета кинетики массопереноса в жидкой фазе необходимо возвратится к выражению (5). Для этого проводятся следующие математические процедуры: сначала решение (7) дифференцируется по  $\bar{x}$ , и находится его выражение при  $\bar{x} = 1$ , а затем интегрируется по  $Fo_m$  в пределах от 0 до  $Fo_m$ , в результате чего получается выражение, описывающее кинетику процесса в жидкой фазе:

$$Z_{жс}(Fo_m) = Z_{жс}(0) + 2Bi_m \cdot K_m \cdot Z_p(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_m}{\psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \cdot [\exp(-\mu_m^2 Fo_m) - 1] - 2Po_m^* \cdot K_m \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_m \cdot \varphi(Bi_m, K_m, \mu_m)}{\mu_m^3 \cdot \psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \cdot [\exp(-\mu_m^2 Fo_m) - 1], \quad (20)$$

Таким образом, выражения (16) и (20) позволяют в совокупности производить расчеты динамики массопереноса целевого компонента из внутренних слоев конструкции к границе раздела фаз; а также кинетику перехода этого компонента через границу раздела фаз и переход от границы раздела в объем жидкости в резервуаре.

На рисунках 2 и 3, в качестве примера, приведены некоторые результаты расчетов по полученным выражениям. Кривая 1 рисунка 1 иллюстрирует динамику безразмерных концентраций переносимого компонента в отсутствие источника, т.е. построена по 1 и 2 слагаемым выражения (16). Кривая 2 этого же рисунка показывает вклад в профиль концентраций внутреннего источника массы, т.е. построена по 3 слагаемому выражения (16), а кривая 3 показывает фактический профиль концентраций, т.е. является суммой кривых 1 и 2.

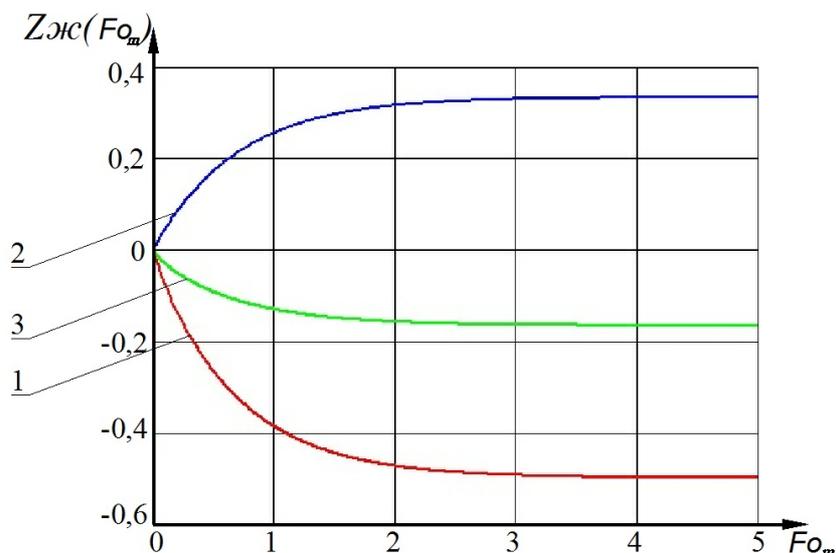
Кривые рисунка 3 отражают кинетику изменения содержания компонента в объеме жидкой фазы в зависимости от массообменного критерия Фурье. Кривая 1 рисунка 2 иллюстрирует кинетику безразмерных концентраций переносимого компонента в отсутствие источника, т.е. построена по 1 и 2 слагаемым выражения (20). Кривая 2 этого же рисунка показывает влияние внутреннего источника массы на кинетику процесса, т.е. построена по 3 слагаемому выражения (20), а кривая 3 - это общий результат расчета по выражению (20).



**Рис. 2. Профиль безразмерных концентраций гидроксида кальция по толщине стенки резервуара при  $Bi_m=1$ ,  $K_m=1$ ,  $Po_m=1$ ,  $Fo_m=1$ ,  $Z_p(0)=1$**

1 - при отсутствии источника; 2 - влияние источника на распределение массы;

3 - результирующий профиль концентраций



**Рис. 3. Профиль безразмерных концентраций гидроксидов кальция в жидкой фазе при  $Bi_m=1$ ,  $K_m=1$ ,  $Po_m=1$ ,  $Z_p(0)=1$**

1- при отсутствии источника; 2- влияние источника на распределение массы;  
3- результирующий профиль концентраций

Накопление опыта теоретических и экспериментальных исследований в данном направлении в дальнейшем позволит создать банк данных условий негативных природных и техногенных воздействий на структуру материалов строительных конструкций и выработать пути, методы, методологии и инструментарий для мониторинга состояния уникальных зданий и сооружений, методов их реконструкции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.
2. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1973. – 754 с.
3. Сажин, Б.С. Научные основы техники сушки / Б.С. Сажин, В.Б. Сажин. – М.: Наука, 1997. – 448 с.
4. Федосов, С.В. Теплообмен в технологических процессах строительной индустрии / С.В. Федосов. – Иваново: ИПК «ПресСто», 2010. – 364 с.
5. Гинзбург, А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности / А.С. Гинзбург. – М.: Агропромиздат, 1985. – 336 с.
6. Голубев, Л.Г. Сушка в химико-фармацевтической промышленности / Л.Г. Голубев, Б.С. Сажин, Е.Р. Валашек. – М.: Медицина, 1978. – 272 с.
7. Рудобашта, С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С.П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
8. Рудобашта, С.П. Диффузия в химико-технологических процессах / С.П. Рудобашта, Э.М. Карташов. М.: Колосс, 2010. – 478 с.
9. Федосов, С.В. Сульфатная коррозия бетона / С.В. Федосов, С.М. Базанов. – М.: Издательство АСВ, 2003. – 192 с.
10. Федосов, С.В. Теоретические исследования влияния особенностей динамики и кинетики массопереноса на процессы жидкостной коррозии 1 вида цементных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений. РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, ЗАО «Университетская книга», Курск. – 2015. – С. 275-277.

11. Федосов, С.В. Математическое моделирование массопереноса в процессах коррозии бетона для обеспечения безопасности и долговечности зданий и сооружений / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.А. Хрунов // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений. РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, ЗАО «Университетская книга», Курск. – 2015. – С. 260-262.

12. Федосов, С.В. Теория тепломассопереноса как основа создания методологических принципов ингибирования деструкционных процессов в строительной индустрии / С.В. Федосов // Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения А.Н. Плановского. ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет дизайна и технологии», Москва. – 2016. – С. 49-55.

13. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 500 с.

14. Федосов, С.В. Применение методов математической физики для моделирования массо- и энергопереноса в технологических процессах строительной индустрии / С.В. Федосов, А.М. Ибрагимов, А.В. Гущин // Строительные материалы. – 2008. – №4. – С. 65-67.

15. Москвин, В.М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гузеев. - М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.

16. Румянцева, В.Е. Научные основы закономерностей массопереноса в процессах жидкостной коррозии строительных материалов: дисс. д-ра техн. наук (05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы (строительство)). / В.Е. Румянцева; науч. консультант работы С.В. Федосов. [Место защиты: Иван. гос. архитектурн.-строит. ун-т.]. – Иваново, 2011. – 444 с.

17. Красильников, И.В. Исследование процессов массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов с учетом действия внутренних источников массы: дисс. к-та техн. наук (05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы (строительство)»). / И.В. Красильников; науч. рук. работы С.В. Федосов. [Место защиты: Иван. гос. политехн. ун-т] – Иваново, 2016. – 162 с.: ил.

Научное издание

Международный научно-технический Форум  
ПЕРВЫЕ МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОСЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ  
(МНТФ КОСЫГИН- 2017)

**Тематика чтений**  
**«СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК»**

Сборник пленарных докладов

11 - 12 октября 2017 года

Технический редактор Бородина Е. С.  
Компьютерная верстка и макет Бородина Е. С.

**Материалы публикуются в авторской редакции.**