

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

КАФЕДРА ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ И БЕЗОПАСНОСТИ

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Издается с 2021 года

**ТОМ 3
ВЫПУСК 3(10)
Декабрь 2023**

*Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору
в сфере связи и массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-79039 от 08 сентября 2020 г.
ISSN 2713-0789*

E-mail: info@iptjournal.org
Сайт: www.iptjournal.org

**Москва
2023**

Промышленные процессы и технологии. М.: РГУ им. А. Н. Косыгина. — 2023. — Т. 3. — № 3(10). — 100 с.: ил. — ISSN 2713-0789.

Главный редактор

Константин Иванович Кобраков (РГУ имени А. Н. Косыгина, Москва, Россия)

Заместители главного редактора:

Наталия Рустемовна Кильдеева (РГУ имени А. Н. Косыгина, Москва, Россия)

Олег Иванович Седяров (РГУ имени А. Н. Косыгина, Москва, Россия)

Ответственный ученый секретарь

Мария Константиновна Кошелева (РГУ имени А. Н. Косыгина, Москва, Россия)

Заведующий редакцией

Елена Сергеевна Бородин (РГУ имени А. Н. Косыгина, Москва, Россия)

Корректор

Анна Вячеславовна Алдохина (РГУ имени А. Н. Косыгина, Москва, Россия)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Gong Ke (World Federation of Engineering Organization), Wang Xin (Tianjin University, Tianjin, China), В. С. Белгородский (РГУ им. А. Н. Косыгина, Москва, Россия), С. П. Друкаренко (РосСНИО, Международный Союз НИО, Москва, Россия), В. В. Иванов (Президиум РАН, Москва, Россия), В. Г. Куличихин (ИНХС РАН, Москва, Россия), В. С. Лесовик (БГТУ им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия), С. В. Сысолятин (ИПХЭТ СО РАН, Бийск, Россия), С. В. Федосов (НИУ МГСУ, Москва, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р. Ш. Абиев (СПбГТИ (ТУ), Санкт-Петербург, Россия), В. А. Акатьев (РГУ им. А. Н. Косыгина, Москва, Россия), Ю. М. Атрощенко (ИНЦ ТГПУ им. Л. Н. Толстого, Тула, Россия), В. Н. Грунский (РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия), О. Р. Дорняк (ВГЛТУ, Воронеж, Россия), Н. С. Зубкова (ЗАО «ФПГ Энергоконтракт», Москва, Россия), А. В. Клинов (КНИТУ, Казань, Россия), О. Е. Кондратьева (НИУ «МЭИ», Москва, Россия), М. К. Корсаков (Центр трансфера фармацевтических технологий им. М. В. Дорогова (научное подразделение ЯГПИ), Ярославль, Россия), А. Е. Костаян (ИОНХ РАН, Москва, Россия), В. В. Костылева (РГУ им. А. Н. Косыгина, Москва, Россия), А. Г. Липин (ИГХТУ, Иваново, Россия), А. А. Лысенко (СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия), Д. А. Макаренков (НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА, Московский политех, Москва, Россия), Л. Н. Ольшанская (СГТУ имени Гагарина Ю. А., Саратов, Россия), В. Т. Прохоров (ИСОиП (филиал) ДГТУ в г. Шахты, Шахты, Ростовская обл., Россия), Л. В. Равичев (РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия), И. Р. Татарчук (ЗАО «МОФ «Парижская коммуна», Москва, Россия), М. П. Тюрин (РГУ им. А. Н. Косыгина, Москва, Россия), В. Н. Хмелев (Бийский технологический институт АлтГТУ им. И. И. Ползунова, Бийск, Россия)

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Odilio Alves-Filho (Norwegian University of Science and Technology, Trondheim), Dang Vu Minh (Vietnamunion of science and technology associations, Hanoi, Vietnam), Anthony I. Okoh (University of Fort Hare, Alice, South Africa), А. В. Акулич (БГУТ, Могилёв, Беларусь), Инь Бинь (Центр сотрудничества, образования и науки Университета Цзаочжуан АНО «Центр Русско-Китайского гуманитарного сотрудничества и развития», Китай, Россия), С. П. Левицкий (Shamoon College of Engineering, Beer Sheva, State of Israel), Д. Х. Халиков (Институт химии им. В. И. Никитина АН РТ, Душанбе, Таджикистан)

Адрес редакции: 119071, г. Москва, Малая Калужская ул., д. 1

Телефон: +7 (495) 811-01-01

E-mail: info@iptjournal.org

Сайт: www.iptjournal.org

СОДЕРЖАНИЕ

Н. Т. Кузнецов, В. П. Мешалкин, Р. Ш. Абиев К 120-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР Петра Григорьевича Романкова (17.01.1904 — 01.10.1990)	4
<i>Kuznetsov N. T., Meshalkin V. P., Abiev R. Sh.</i> <i>To the 120th anniversary of the birth of corresponding member of the USSR Academy of Sciences</i> <i>Pyotr Grigorievich Romankov (01/17/1904 — 10/01/1990)</i>	9
Экология / Ecology	
А. В. Артемов, А. В. Переславцев, С. А. Вошинин, М. В. Дюбанов, С. В. Ардамаков, Е. А. Реш Переработка продуктов плазменного пиролиза отходов: получение водорода и гидроксиламинсульфата гидрированием оксида азота (II) в среде серной кислоты.....	10
<i>Artemov A. V., Pereslavitsev A. V., Voshchinin S. A., Dubanov M. V., Ardamakov S. V., Resh E. A.</i> <i>Waste plasma pyrolysis products processing: obtaining hydrogen and hydroxylamine sulfate by</i> <i>hydrogenation of nitrogen oxide (II) in sulfuric acid medium</i>	27
А. Н. Цедилин, Д. А. Макаренков, А. С. Нартов Анализ результатов мониторинга тропосферного озона в городе Москве.....	32
<i>Tsedilin A. N., Makarenkov D. A., Nartov A. S.</i> <i>Analysis of the results of monitoring tropospheric ozone in Moscow</i>	40
Химические технологии, науки о материалах / Chemical technology, materials sciences	
Ю. С. Шустов, Т. В. Зиновьев, В. П. Зиновьев Разработка метода измерений поперечника крученой хлопчатобумажной пряжи	42
<i>Shustov Yu. S., Zinoviev T. V., Zinoviev V. P.</i> <i>Development of a method for measurement of the cross-dimension of twisted cotton yarn</i>	47
Samoylov N. A. Mathematical modeling of the process of hydrotreating diesel fuel from organosulfur impurities	49
<i>H. A. Самойлов</i> <i>Математическое моделирование процесса гидроочистки дизельного топлива от</i> <i>сероорганических примесей</i>	64
В. В. Костылева, А. И. Карасева, О. Б. Коновалова, О. В. Сироткина Исследование свойств обувных материалов с реконфигурируемой структурой.....	65
<i>Kostyleva V. V., Karaseva A. I., Konovalova O. B., Sirotkina O. V.</i> <i>Study of the properties of footwear materials with reconfigurable structure.....</i>	73
Теоретическая и прикладная теплотехника / Theoretical and applied thermal engineering	
Л. И. Жмакин, Н. М. Шарпар, А. Н. Сорокин, И. Н. Власов, А. Д. Васильева Современные теплоаккумулирующие системы горячего водоснабжения.....	76
<i>Zhmakin L. I., Sharpar N. M., Sorokin A. N., Vlasov I. N., Vasilieva A. D.</i> <i>Modern thermal storage hot water systems.....</i>	86
Е. В. Отрубянных, П. А. Пустовойт, Е. М. Маркин Имитационная модель энергобаланса профессионального потребителя	88
<i>Otrubyannikov E. V., Pustovoyt P. A., Markin E. M.</i> <i>Simulation model of the professional consumer's energy balance.....</i>	97

УДК 001.3

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-4-9

К 120-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР
Петра Григорьевича Романкова
(17.01.1904 — 01.10.1990)

Н. Т. Кузнецов^{*}, В. П. Мешалкин^{**}, Р. Ш. Абиев^{***,****,1}

^{}Институт общей и неорганической химии имени Н. С. Курнакова РАН,
Москва, Россия*

*^{**}Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,
Москва, Россия*

*^{***}Санкт-Петербургский государственный Технологический институт (Технический
университет), Санкт-Петербург, Россия*

*^{****}Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова Российской академии наук
(ИХС РАН), Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация

Представлена краткая информация о жизни и научной деятельности одного из известных учёных в области теоретических основ химических технологий, создателя ленинградской школы процессов и аппаратов химической технологии Петра Григорьевича Романкова (к 120-летию со дня рождения).

Ключевые слова

Петр Григорьевич Романков, юбилей.

Семнадцатого января 2024 г. исполняется 120 лет со дня рождения выдающегося химика-технолога, одного из создателей современной научной школы по процессам и аппаратам химической технологии Петра Григорьевича Романкова. Вся его творческая жизнь связана с Ленинградским технологическим институтом им. Ленсовета — сегодня это Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), — который он окончил в 1929 г. Студентом старших курсов П. Г. Романков принимал участие в монтаже и пуске Дорогомиловского химического завода в Москве.

Работая на этом заводе, он начал педагогическую деятельность на химическом факультете МВТУ им. Н. Э. Баумана. В 1933–34 г. также вёл педагогическую работу в МХТИ им. Менделеева и МИХМе. В 1934 г. по приглашению профессора К. Ф. Павлова вернулся в Ленинград в ЛТИ им. Ленсовета на кафедру процессов и аппаратов химической технологии, где проработал до конца своей жизни.

Созданное П. Г. Романковым в соавторстве учебное пособие «Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии» пользовалось и пользуется широкой популярностью и

¹ Для переписки:

Email: abiev.rufat@gmail.com

выдержало 10 изданий в нашей стране. Оно также переведено на 11 иностранных языков.



Фото 1 — П. Г. Романков (1990-е гг.)



Фото 2 — П. Г. Романков со своим коллегой и одним из соавторов вышеназванного пособия профессором А. А. Носковым (1952 г.)

На основе этого пособия позже было издано учебное пособие «Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии», которым сегодня пользуются студенты всех технологических вузов.

Под руководством П. Г. Романкова в ЛТИ им. Ленсовета была создана в то

время образцовая учебная лаборатория по курсу процессов и аппаратов химической технологии, которая была оборудована пилотными установками. Эта лаборатория непрерывно модернизируется с привлечением современных компьютерных технологий. Научные интересы П. Г. Романкова охватывали широкий круг вопросов теории и практики химической технологии.

Его кандидатская диссертация была посвящена сушке фрезерного торфа и положила начало глубоким исследованиям в области процессов сушки.

Во время блокады Ленинграда П. Г. Романков принял активное участие в организации производства соевого молока и других пищевых продуктов из сои. При этом подробно исследовал оптимальные условия проведения процесса экстрагирования питательных веществ из соевых бобов. В этот период им был разработан метод сушки плазмы крови и выполнен ряд работ оборонного характера. Совместно с сотрудниками П. Г. Романков разработал газоанализатор для автоматической сигнализации о применении отравляющих веществ (военные годы).

В 1948 г. П. Г. Романков успешно защитил докторскую диссертацию на тему: «Единые кинетические закономерности как основа современного учения о процессах и аппаратах химической технологии».

Одной из ранних работ П. Г. Романкова была книга «Гидравлические процессы химической технологии», изданная в 1948 г. В ней он показал, что главной идеей науки о процессах и аппаратах химической технологии является обобщение и выявление физико-химических аналогий многих процессов. Именно в этом направлении и следует развивать общее учение о процессах и аппаратах химической технологии. Большое внимание Пётр Григорьевич уделял исследованию массообменных процессов в системах «твёрдая фаза–

жидкость» и «твердая фаза–газ или пар» (растворение, экстрагирование, кристаллизация из растворов, адсорбция, термическая сушка, гранулирование), которые имеют много общего в характере межфазного взаимодействия и внутреннего переноса массы в частицах дисперсного материала.

При формулировании задач физико-математического описания конкретных массообменных процессов существенное внимание в работах П. Г. Романкова уделялось вопросам физического анализа, поскольку при широком использовании методов математического моделирования адекватность исходной системы уравнений реальному процессу имеет первостепенное значение. При анализе всех рассматриваемых процессов анализируются вопросы кинетики, а равновесные и балансовые соотношения используются в пределах необходимой их связи с кинетикой процессов в реальных аппаратах.

При анализе каждого массообменного процесса П. Г. Романков всегда рассматривал возможные аналитические решения в упрощённой постановке и использовал общий макрокинетический метод, основанный на экспериментальных данных относительно интегральной кинетики обработки частиц конкретного дисперсного материала.

П. Г. Романков был разносторонним ученым, его труды посвящены исследованию различных процессов химической технологии, но, пожалуй, наибольшее внимание он уделял изучению процессов сушки. Исследованию процесса сушки была посвящена еще его кандидатская диссертация, и он сохранял интерес к исследованиям этого процесса на протяжении всей своей жизни. П. Г. Романков пытался сделать обобщения имевшихся в то время результатов по разработке модельных представлений о конвективной сушке

дисперсных материалов, используемых в химической и смежных с ней отраслях промышленности. Под моделированием он понимал физический анализ тепломассообмена и гидродинамики исследуемых процессов в конкретных условиях работы аппаратов, математическое описание этих процессов и возможные решения сформулированных задач аналитическими или численными методами, в том числе с использованием компьютерной техники. Большое внимание он уделял разработке методов анализа и расчета процессов, основанных на предварительной информации о кинетике сушки и нагрева отдельных частиц материала. Такая информация может быть получена либо из имеющихся модельных представлений, либо из опытных данных, причем в большинстве случаев предпочтение всегда отдавал непосредственным экспериментальным данным, в которых суммарно учитываются возможные эффекты анизотропии тепломассопереносных свойств и неправильная геометрическая форма частиц реальных полидисперсных материалов. За годы своей плодотворной работы П. Г. Романков внес значительный вклад и в развитие аппаратуры для проведения процессов сушки, особенно сушки во взвешенном слое. Сегодня многие из аппаратов, разработанных П. Г. Романковым, успешно используются в различных отраслях промышленности нашей страны.

Результаты своих исследований в этой области П. Г. Романков изложил в книге «Сушка во взвешенном состоянии», которая выдержала уже 3 издания. В ней рассматриваются основы гидродинамики, тепломассообмена и кинетики процесса сушки во взвешенном состоянии, а также современные конструкции аппаратов, используемых в промышленности для сушки сыпучих, жидких и пастообразных материалов.

Большой интерес П. Г. Романков проявлял к изучению процессов гранулирования, как порошкообразных материалов, так и из растворов и суспензий, совмещенных с процессом сушки. Такие процессы стали интенсивно развиваться в последние годы и являются весьма перспективными.

На кафедре, которую он возглавлял многие годы, подготовлено свыше 25 докторов и 160 кандидатов наук в области гидромеханических, тепловых и массообменных процессов и аппаратов химической технологии (перемешивания в жидких средах, фильтрования, центрифугирования, газоочистки, сушки, адсорбции, десорбции, экстрагирования, ионообмена, ректификации и т. д.). Среди его учеников многие были из ближнего и дальнего зарубежья.

Следует также отметить, что под руководством и при непосредственном участии П. Г. Романкова созданы конструкции высокоинтенсивных аппаратов непрерывного действия, например, для сушки мелкодисперсных и пастообразных материалов, адсорбции во взвешенном слое, разделения неоднородных систем и др.

В знак признания его научных заслуг в 1964 г. П. Г. Романков был избран членом-корреспондентом АН СССР. В том же году ему было присвоено звание Заслуженного деятеля науки и техники СССР. П. Г. Романков являлся почетным доктором пяти зарубежных ВУЗов (ГДР, ВНР, ПНР, СФРЮ и ЧССР).

Из его многочисленных научных трудов следует особо выделить своеобразную трилогию: «Гидромеханические процессы химической технологии», «Теплообменные процессы химической технологии» и

«Массообменные процессы химической технологии в системах с твердой фазой».

Необходимо отметить большую научно-организационную работу П. Г. Романкова: наряду с заведованием кафедрой процессов и аппаратов химической технологии в течение 45 лет (1941–1986 гг.), он был проректором по научной работе ЛТИ им. Ленсовета в течение 30 лет (1950–1979 гг.).

Многие годы П. Г. Романков работал в ВАК СССР и ряде Советов промышленных министерств, был председателем Главного Совета по химии и химической технологии МИНВУЗа РСФСР, заместителем главного редактора журнала «Теоретические основы химической технологии» и главным редактором журнала «Прикладная химия».

У Петра Григорьевича была замечательная семья. Из его троих детей выросли очень дружные между собой замечательные люди: старшая дочь — врач-хирург; сын — инженер-радиоэлектроник, вторая дочь — инженер-физик.

За заслуги в развитии химической технологии и подготовке научно-педагогических кадров П. Г. Романков был награжден орденами Ленина, Октябрьской Революции и другими орденами и медалями СССР. Много сил и внимания П. Г. Романков уделял развитию международных отношений с родственными ВУЗами в Германской демократической республике, Чехословакии, Польше, Венгрии, Болгарии и Югославии.

П. Г. Романков ушел из жизни 1 октября 1990 г., но сегодня его имя не забыто, оно живо в его многочисленных трудах и учениках, которые работают как в нашей стране, так и по всему миру.



Фото 4 — П. Г. Романков с супругой и детьми (1939 г.)

Кузнецов Николай Тимофеевич — д-р хим. наук, Академик РАН, заведующий лабораторией химии лёгких элементов и кластеров, Институт общей и неорганической химии имени Н. С. Курнакова РАН (Российская Федерация, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинский просп., д. 31).

Мешалкин Валерий Павлович — д-р техн. наук, Академик РАН, директор, Международный Институт Логистики Ресурсосбережения и Технологической Инноватики (НОЦ), Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Абиев Руфат Шовкетович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой оптимизации химической и биотехнологической аппаратуры, Санкт-Петербургский государственный Технологический институт (Технический университет) (Российская Федерация, 190013, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 24-26/49 литера А), заведующий лабораторией интенсификации процессов синтеза оксидных материалов, Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук (ИХС РАН) (Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 2).

To the 120th anniversary of the birth of corresponding member of the
USSR Academy of Sciences Pyotr Grigorievich Romankov
(01/17/1904 — 10/01/1990)

N. T. Kuznetsov^{*}, V. P. Meshalkin^{**}, R. Sh. Abiev^{***,****,1}

**Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

***Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

****Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Saint Petersburg, Russia*

*****Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg,
Russia*

Abstract

Brief information is presented about the life and scientific activities of one of the famous scientists in the field of theoretical foundations of chemical technologies, the creator of the Leningrad school of processes and apparatus of chemical technology, Pyotr Grigorievich Romankov (on the occasion of his 120th birthday).

Keywords

Petr Grigorievich Romankov, anniversary.

Kuznetsov N. T. — Dr. Sc. (Chem.), Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory of Chemistry of Light Elements and Clusters, Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences (Leninsky Prospekt, 31, Moscow, 119991, Russian Federation).

Meshalkin V. P. — Dr. Sc. (Chem.), Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of the International Institute of Logistics, Resource Saving and Technological Innovation (REC), Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya square, 9, Moscow, 125047, Russian Federation).

Abiev R. Sh. — Dr. Sc.(Eng.), Professor, Head of the Department of Optimization of Chemical and Biotechnological Equipment, Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University) (Moskowskii av., 26, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation), Head of the Process Intensification Laboratory synthesis of oxide materials, Institute of Chemistry of Silicates (Makarov emb., 2, Saint Petersburg, 199034, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

К 120-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР Петра Григорьевича Романкова (17.01.1904 — 01.10.1990) / Н. Т. Кузнецов, В. П. Мешалкин, Р. Ш. Абиев // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 3(10). С. 4 – 9.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-4-9

Please cite this article as:

Kuznetsov N. T., Meshalkin V. P., Abiev R. Sh. To the 120th anniversary of the birth of corresponding member of the USSR Academy of Sciences Pyotr Grigorievich Romankov (01/17/1904 — 10/01/1990). Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 3(10), pp. 4 – 9.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-4-9

¹ Corresponding author:

Email: abiev.rufat@gmail.com

УДК 547.238

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-10-31

Переработка продуктов плазменного пиролиза отходов: получение водорода и гидроксиламинсульфата гидрированием оксида азота (II) в среде серной кислоты

А. В. Артемов^{*,1}, А. В. Переславцев^{*}, С. А. Воцинин^{*}, М. В. Дюбанов^{**},
С. В. Ардамаков^{***}, Е. А. Реш^{****}

**Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

***Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме Российской академии наук, Москва, Россия*

****ООО «Волгатехнол», Тольятти, Россия*

*****Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Москва, Россия*

Аннотация

В статье приведены данные о получении водорода в процессе плазменной переработки отходов и высказано предположение о целесообразности использования водорода в блоке химической переработки регионального Агро-Промышленно-Коммунального Кластера. Одним из возможных направлений использования водорода является синтез гидроксиламинсульфата гидрированием NO в присутствии катализатора Pt/C в растворе серной кислоты. Подробно рассмотрена первая стадия этого синтеза — окисление NH₃ до NO в присутствии платиновых катализаторных сеток. Предложен новый катализатор для этого процесса — Pt, нанесенная на углеродную ткань с использованием переносного метода Ленгмюра — Блджетт. Приведено описание трехфазного каталитического реактора, использующего в качестве катализатора Pt/C-ткань.

Ключевые слова

Плазменная переработка отходов, водород, гидроксиламинсульфат, синтез, окисление аммиака, катализаторы.

Введение

В процессе плазменной газификации отходов производства и потребления (ОПП) образуются два основных продукта: базальтоподобный шлак и пирогаз. Базальтоподобный шлак может быть переработан в базальтовое волокно [1, 2] —

исходное сырье для получения утеплителей в строительстве, композиционных материалов для получения различных термостойких изделий и материалов и др. Из пирогаза после его очистки может быть выделен с помощью коротко-цикловой адсорбции (КЦА) водород в количестве

¹ Для переписки:

Email: arsenyart@icloud.com

около 80 кг/час (при производительности Комплекса высокотемпературного плазменного конвертера (ВТПК) 25000 т/год). Полученный водород может быть реализован как товарный продукт, что связано с рядом проблем, прежде всего транспортировкой и хранением водорода. Другим путем реализации водорода является его непосредственное использование в Агро-Промышленно-Коммунальном Кластере (АПКК), имеющем в своем составе Комплекс ВТПК и блок алга-технологий (БАТ) [3].

АПКК, схема которого приведена на рисунке 1, содержит блок химической переработки (БХП), в котором реализуются различные химические процессы с участием продуктов плазменной газификации ОПП (в том числе и водорода) и в котором может быть осуществлен процесс получения гидроксиламинсульфата (ГАС) гидрированием оксида азота (II) водородом в среде серной кислоты.

Непосредственная переработка водорода, образующегося в процессе

плазменной переработки отходов, является одной из наиболее продвинутых концепций переработки отходов — Waste to Chemicals (WtC, W2C) [4]. При этом предполагается, что сам процесс плазменной переработки отходов и выделения водорода из пирогаза должен быть расположен на территории или в непосредственной близости от крупного химического (нефтехимического) или нефтеперерабатывающего завода [4]. В нашем случае при использовании водорода в процессе получения ГАС таким крупным заводом является производство капролактама [5]. Выделяемый из пирогаза водород может быть использован в БХП на установке получения ГАС.

Гидроксиламинсульфат (ГАС) — $(\text{NH}_2\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$, один из основных реагентов в производстве капролактама. Синтез ГАС основан на каталитическом восстановлении NO водородом в серной кислоте:

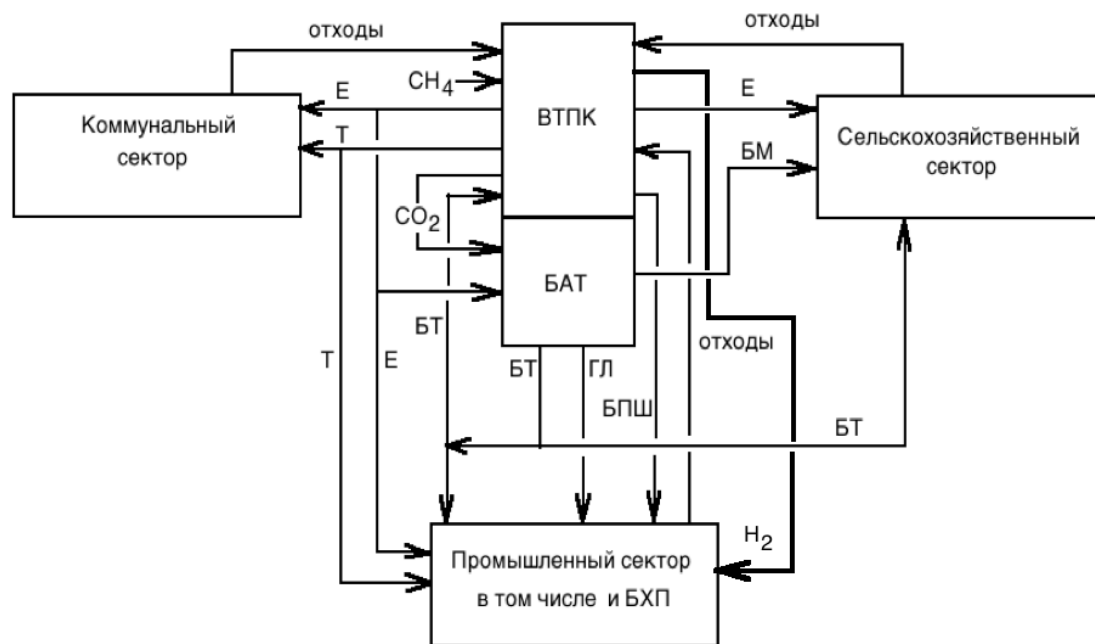
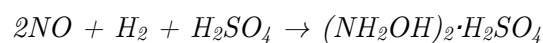


Рисунок 1 — Принципиальная схема варианта регионального АПКК — Агро-Промышленно-Коммунального Кластера, БАТ — блок алга-технологий; БТ — биодизельное топливо; ГЛ — глицерин; БПШ — базальтоподобный шлак; БМ — биомасса; Е — электроэнергия; Т — тепловая энергия (пар); БХП — блок химической переработки

В промышленности процесс обычно проводят при температуре 35–45 °С, избыточном давлении 0.45–0.60 атм. и объемном соотношении $H_2 : NO$ равном (1.7–1.8) : 1. В качестве катализатора используют платину, нанесенную на мелкодисперсный графит («платина на электрографите»). Процесс проводят в каскаде трёхфазных реакторов смешения (обычно 4–6 реакторов в каскаде). Синтез-газ ($NO + H_2$) получают смешиванием NO и H_2 в смесителе при указанных соотношениях и давлении и направляют в реакторы каскада [7]. Водный 18–25% раствор серной кислоты и суспензию катализатора в этом растворе вводят в каждый реактор каскада таким образом, чтобы стабилизировать концентрацию катализатора в каждом реакторе на уровне 30–50 г/л [8]. Такая организация процесса позволяет получать ГАС с максимальным содержанием 275 г/л в конечном продукте.

При получении ГАС первой стадией является получение нитрозных газов, содержащих NO , окислением аммиака. На

рисунке 2 приведена принципиальная технологическая схема получения ГАС, включающая получение NO . В соответствии с этой технологической схемой процесс в условиях промышленного производства проводят следующим образом. В смесителе (1) готовят реакцию смесь аммиака, кислорода и водяного пара при мольном отношении аммиак : кислород равном 1.36:1 и содержанием аммиака в смеси 9 %. Общая нагрузка по аммиаку на стадии окисления составляет 5700 кг/час. Смесь направляют в реактор (2), где аммиак окисляют кислородом на платинородиевом катализаторе при температуре 900 °С с получением нитрозного газа. Образовавшийся нитрозный газ охлаждают в нижней части реактора (2) и в теплообменнике (3) до температуры 270 °С, смешивают в смесителе (4) с водородом и направляют в реактор (5) для стабилизации состава. В реакторе (5) избыточный кислород на $Ag-Mn$ катализаторе при температуре 425 °С гидрируют до воды. Степень гидрирования кислорода составляет 90 %.

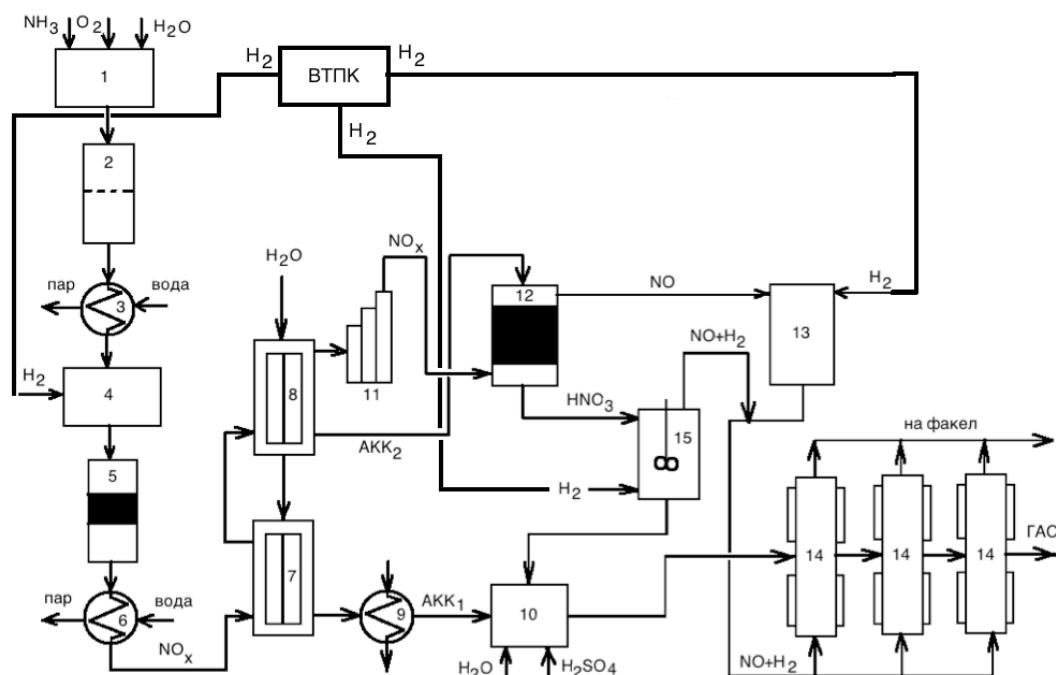


Рисунок 2 — Принципиальная технологическая схема установки получения ГАС.

Обозначения — см. в тексте

Помимо Ag–Mn катализатора может быть использован катализатор $\text{Pd-Co}_3\text{O}_4\text{-La}_2\text{O}_3$ /кордиерит, который по активности и селективности в процессе восстановления кислорода в присутствии NO и термической стабильности превосходит промышленный Ag–Mn катализатор [9].

Тепло реакций окисления аммиака и гидрирования кислорода с помощью теплообменников (3) и (6) используют для производства пара. Не содержащий кислорода нитрозный газ, охлажденный до температуры 150 °C, направляют в конденсатор (7) первой ступени конденсации, где при температуре 92 °C выделяют 72 % конденсата (азотнокислый конденсат 1-й ступени — АКК₁) с содержанием азотной кислоты 0.42 % масс. АКК₁ с содержанием азотной кислоты 0.42 % масс. направляют через холодильник (9) в смеситель (10) для производства 20 % раствора серной кислоты, необходимой для синтеза ГАС. Нитрозный газ после первой ступени конденсации подают в конденсатор (8) второй ступени, где выделяют 28 % конденсата (азотнокислого конденсата 2-й ступени — АКК₂) с содержанием азотной кислоты 2.0 % масс., и концентрированную смесь оксидов азота с помощью компрессора (11) направляют в абсорбер (12). В абсорбере (12) смесь оксидов азота освобождается от оставшегося количества оксида азота (IV) путем его абсорбции. АКК₂ и полученный оксид азота (II) направляют в смеситель (13) для смешивания с водородом. Полученную в смесителе (13) смесь газов направляют в каскад 6 реакторов (на рисунке 2 — три реактора каскада), где синтезируют ГАС в среде разбавленной серной кислоты гидрированием оксида азота (II) водородом при температуре 45 °C, давлении 2 атм., объемном соотношении оксид азота (II) : водород равном 1:1.4 в присутствии мелкодисперсного катализатора

«платина на графите». АКК₂, содержащий азотную кислоту после абсорбера (12), направляют в реактор (15), где под давлением 3.6 атм., температуре 90 °C и концентрации катализатора 50 г/л гидрируют водородом при объемной скорости по водороду 46.7 час⁻¹. Водород подают в реактор (15) в таком количестве, что мольное отношение оксид азота (II) : водород на выходе из реактора (15) равно 1:1.4 и в точности соответствует соотношению оксид азота (II) : водород, используемому на стадии синтеза ГАС. Жидкую фазу после гидрирования в реакторе (15) с содержанием азотной кислоты 0.5 % масс. в количестве 15.1 м³/час направляют в смеситель (10) для производства 20 %-го раствора серной кислоты, необходимой для синтеза ГАС. Получают ГАС в количестве около 18000 кг/час.

Как видно из приведенной на рисунке 2 принципиальной технологической схемы установки получения ГАС, водород используется в нескольких реакционных узлах:

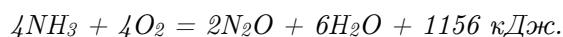
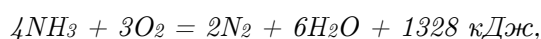
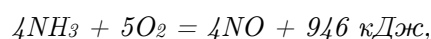
- в смесителе (4);
- в реакторе (5) для гидрирования остаточного кислорода на Ag–Mn катализаторе после стадии окисления аммиака;
- для гидрирования АКК₂ в реакторе (15) при повышенном давлении, температуре около 90 °C в присутствии мелкодисперсного катализатора Pt/C (50 г/л) и объемной скорости по водороду около 50 час⁻¹;
- в смесителе (13) для получения смеси газов (NO+H₂) и последующего использования этой смеси газов для получения ГАС в каскаде N-х фазных реакторов смешения (14).

Стадия получения NO окислением NH₃ в процессе синтеза ГАС

В предыдущих наших работах [16, 17] были подробно описаны условия взрывобезопасного каталитического синтеза

ГАС [16] и катализаторы, применяемые для синтеза ГАС гидрированием NO водородом в серной кислоте [17]. В настоящей статье рассматривается первая стадия технологической цепочки синтеза ГАС — получения нитрозных газов высокотемпературным окислением аммиака на Pt–Rh катализаторе. Эта стадия процесса подробно описана в монографии [10]. В качестве катализатора обычно используют Pt, содержащую металлическую сетку [11–15].

В основе современного производства оксида азота (II) лежит каталитическое окисление аммиака, осуществляемое при давлениях 3–15 атм. [18]. При окислении протекают следующие реакции:



Целевой является первая реакция. Процесс проводят при температуре около 900 °С на сетках, состоящих из платиноидных сплавов, типичный состав которых (% масс.): Pt — 92; Rh — 3.5; Pd — 4. Диаметр проволоки в сетке 0.06–0.09 мм; число проволок на 1 см 30–60; число отверстий на 1 см² 1000 – 3000; активная поверхность сеток 20–30 м²/г.

В России наибольшее распространение получили следующие системы:

- 1) УКЛ-7 — давление на стадии окисления и на стадии абсорбции 7.3 атм.;
- 2) АК-72 — давление на стадии окисления 3.5–4.0 атм., на стадии абсорбции 7–7.5 атм.;
- 3) комбинированная система — атмосферное давление на стадии окисления и 2.5 атм. на стадии абсорбции.

На рисунке 3 приведена схема контактного реактора для окисления аммиака при атмосферном давлении. Обычно на входе в контактный аппарат поддерживают концентрацию аммиака 10–11.5 % об. при соотношении $\text{O}_2 : \text{NH}_3$ 1.65–1.8

(т.к. область взрываемости аммиачно-воздушных смесей находится в интервале от 12–14 до 26–28 % об. по аммиаку). В контактном аппарате происходит очистка аммиачно-воздушной смеси от механических примесей на фильтрах (1). Затем за счет распределительной решетки (2) происходит выравнивание газового потока по сечению реактора. Далее поток пропускают через слой сеток (3), где происходит окисление аммиака до оксидов азота. При этом происходит увеличение температуры до 700–750 °С, поэтому низ реактора футерован. Платиновые сетки уложены в реакторе на опорные металлические кольца (4) для предохранения от механических разрушений.

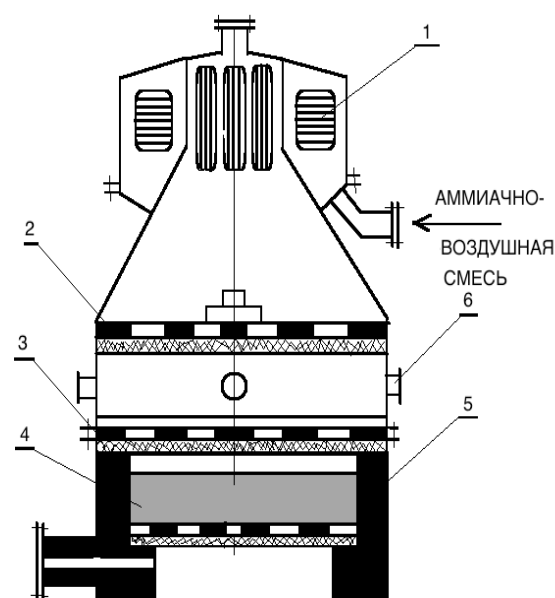


Рисунок 3 — Принципиальная схема комбинированного контактного аппарата для окисления аммиака (атмосферное давление).
1 — пакеты фильтра; 2 — распределительная решетка; 3 — платиноидный катализатор;
4 — металлические кольца Рашига;
5 — футеровка; 6 — смотровое окно

Особенностью процесса окисления аммиака является унос платины с сеток в ходе процесса. В частности, для УКЛ-7 унос достигает величины 0.15–0.16 г на тонну целевого продукта. Срок

эксплуатации сеток обычно составляет 3–6 месяцев. В последнее время в системах УКЛ-7 для снижения потерь платины широко используют сотовые блочные катализаторы. Применение этих катализаторов в комплексе с платиновыми сетками позволяет существенно (~ в 2 раза) снизить удельную загрузку платины. Кинетические закономерности окисления NH_3 в NO на оксидном блочном катализаторе подробно описаны в работе [19]. Для агрегатов УКЛ-7 при переходе от системы с двенадцатью платиноидными сетками на двухступенчатую систему с восемью-девятью платиноидными сетками и слоем оксидного блочного катализатора уменьшение числа сеток составляет 25–33 %. При этом обеспечиваются высокие значения выхода NO — 93.9–95.3 % (таблица 1). Кроме того, применение блочного катализатора сотовой структуры уменьшает неоднородность распределения потока по сечению реактора, т. е. улучшает газодинамические условия процесса в катализаторном слое.

Таблица 1 — Экспериментальные (числитель) и расчетные (знаменатель) данные испытания в режиме агрегата УКЛ-7 двухступенчатой каталитической системы с блочным катализатором на второй ступени [19]

Число сеток, шт.	Выход NO , %
1-я ступень — 6–9 тканых платиноидных сеток	
2-я ступень — блочный катализатор сотовой структуры	
6	90.4/91.3
7	92.2/92.5
8	93.8/93.9
9	95.0/95.3
1-я ступень — 9–11 вязанных платиноидных сеток	
2-я ступень — блочный катализатор сотовой структуры	
9	93.7/93.7
11	94.1/94.2

Особенности каталитического окисления аммиака в оксид азота (II) подробно описаны в работах [20–22]. Обычно каталитическая система состоит из двух слоев (пакетов) сеток: слой платиноидных сеток и уловитель платиноидов из газовой фазы, выполненный в виде пакета проволочных улавливающих сеток из сплава на основе палладия (% масс.): Pd — 90, Au — 10; Pd — 91.5, Au — 8.5; Pd — 95, Ni — 5; Pd — 95, W — 5, разделенных жаростойкими сетками, установленный на поддерживающем устройстве непосредственно под слоем платиноидных сеток [23]. Для изготовления платиноидных сеток используется шесть базовых сплавов: Pt/Rh — 95/5, Pt/Rh — 92/8, Pt/Rh — 90/10, Pt/Rh/Pd — 90/5/5, Pt/Pd/Rh — 81/16/3, Pt/Pd/Rh/Ru — 81/15/3.5/0.5. Катализаторный пакет, устанавливаемый в аппарат, может состоять из сеток, изготовленных из проволоки различного диаметра и различного сплава. В одном пакете могут находиться сетки различных видов плетения. Диаметр проволоки, из которой производится сетка, может быть от 60 до 92 микрон.

Известно [26], что окисление аммиака на платиноидных катализаторах сопровождается значительными потерями драгметаллов. Эти потери связаны с испарением оксидов платины, образовавшихся на поверхности катализатора под воздействием кислорода продуваемой газовой смеси. Кроме того, потери катализатора происходят непосредственно в процессе каталитического окисления аммиака при воздействии на катализатор реакционной среды и содержащихся в ней примесей (солей легкоплавких металлов), что может приводить к образованию летучих соединений. При каталитической эрозии появляются каналы травления, возрастает удельная площадь поверхности, происходит перерождение поверхностного слоя и

разрушение структуры платиноидных сеток. Продукты разрушения катализатора уносятся газовым потоком. Количество теряемого катализатора зависит от интенсивности окисления аммиака на катализаторе и пропорционально количеству окисленного за период работы катализатора аммиака. Потери катализатора в виде оксидов платиноидов происходят при воздействии любой кислородосодержащей газовой смеси и усиливаются при температурах, сопоставимых с температурой окисления аммиака (840–920 °С). Именно поэтому поиск эффективных уловителей платиноидов представляет важную технологическую задачу.

Совершенствование процесса окисления аммиака на платиноидном катализаторе идет по пути использования (наряду с катализаторными сетками) улавливающих сеток, изготовленных из сплавов на основе палладия. Каталитическую систему такого рода можно рассматривать как бифункциональную, обладающую не только каталитическими, но и сорбционными свойствами по отношению к частицам металлов платиновой группы и их оксидам. Обычно на промышленных предприятиях эксплуатируют бифункциональную каталитическую систему, состоящую из 7–9 катализаторных и 3–5 улавливающих сеток. Опыт работы агрегатов УКЛ-7 показывает снижение удельных потерь платиноидов на 10–28 % при общем сокращении первоначальных вложений на драгметаллы до 35 % по сравнению с агрегатами, использующими традиционную каталитическую систему из 12 катализаторных сеток [27].

Математическая модель процесса окисления аммиака на платиноидных сетках подробно описана в [28] и в настоящей статье не рассматривается.

В последнее время в качестве улавливающего пакета каталитическая система содержит слой «катализаторов сеточных

нанесенных» (КСН), обладающих одновременно и каталитическим и улавливающим действием, выполненных из жаропрочной стали, на поверхность которой нанесен нанокристаллический слой платины в количестве 0.05–0.40 % от массы компонентов стали [24, 25]. Использование КСН позволяет более чем в 10 раз увеличить степень улавливания платиноидов при одновременном увеличении каталитической активности. Существенным недостатком сеток КСН является сложность технологии их изготовления, которая состоит из трех основных этапов.

На первом этапе готовят золь гидроксида алюминия из раствора нитрата алюминия при постепенном прибавлении к нему 5% раствора аммиака до уровня $\text{pH} = 7\text{--}8$. Полученный гель оставляют «дозревать» в течение 18–20 часов при комнатной температуре, после чего отделяют осадок гидроксида алюминия от раствора нитрата аммония центрифугированием. Полученный осадок гидроксида алюминия два раза промывают дистиллированной водой и выделяют осадок декантацией. Золь гидроксида алюминия готовят смешиванием осадка гидроксида алюминия с дистиллированной водой (1:5-6) с добавлением ПАВ (смачиватель ОП-10) при тщательном перемешивании и обработки ультразвуком в течение 10–15 мин.

На втором этапе подготавливают поверхность сетки жаропрочной стали (например, фехраль Х23Ю5Т): проводят отмывку от технологической смазки и загрязнений с использованием аппарата высокого давления (АВД) и пенного раствора средства для отмывки от масел и жировых отложений при температуре 50–60 °С с выдержкой в моющем растворе в течение 10–15 мин.; высушивают сетку с использованием сжатого воздуха; термообработывают в электропечи с выдержкой при 1050–1100 °С в течение 2 часов.

На третьем этапе обрабатывают поверхность сетки-основы для создания слоя носителя катализатора (оксида алюминия) и пропитки его золей частиц платины или платинового сплава:

1) обрабатывают сетку окунанием в золь гидроксида алюминия, содержащий ПАВ, с последующей ручной обработкой сухих участков сетки с помощью кисти или валика и удалением с поверхности сетки пены;

2) высушивают сетку с нанесенным золем при комнатной температуре;

3) после высыхания проводят термообработку сетки при нагреве до 700 °С;

4) проводят повторно операции, указанные в п. п. 1, 2 и 3;

5) с помощью кисти вручную наносят на сетку золь платины или платинового сплава (концентрация частиц платины или платинового сплава в золе 0.05–0.40 %). Расход золь при однократном нанесении 250–270 мг/м² сетки.

Диаметр КСН для аппаратов окисления аммиака УКЛ-7 равен 1650–1700 мм. Диаметр проволоки — 0.25 мм, размер ячейки — 0.50 мм. Золи платины, как это указано в патенте [29], получают в водном растворе (и наносят из этого же водного раствора) платиновой соли состава (% масс.):

платиновая соль	6.0-6.5
аммиак водный (25 % концентрации)	1.4-1.8
гелеобразующая добавка на основе целлюлозы	0.25-0.35
ПАВ	0.1-0.15
вода	до 100

Катализатор КСН выполняет двойную функцию: каталитическую и улавливающую. Так, при использовании трех сеток с общим количеством нанесенной платины 17.75 г, что по отношению к общей массе КСН (5546.8 г) составляет 0.40 %, после пробега катализаторного пакета в течение

8574 часов масса сеток КНС увеличилась до 5712.9 г. После проведенного аффинажа на содержание платиноидов получены результаты: Pt=135.4 г; Pd=19.4 г; Rh=11.3 г. Содержание платины в катализаторе КНС за счет улавливания платиноидов, теряющихся с первыми по ходу аммиачно-воздушной смеси (АВС) катализаторных платиноидных сеток за время указанного периода пробега, увеличилось в 7.6 раза, а в сумме всех платиноидов уловлено 166.1 г, что в 9.3 раза выше по отношению к количеству платины, нанесенной на поверхность КНС (16.6 г против 17.75 г). Эти данные подтверждают каталитические и улавливающие свойства катализаторных сеток КНС, позволяющие снизить безвозвратные потери платиноидов и уменьшить их использование в процессе.

К числу недостатков КНС необходимо отнести следующее:

1) высокая доля ручного труда (обмазывание вручную кистью или валиком металллической сетки золями гидроксида алюминия и платины; сворачивание готовой сетки в трубу для термообработки; многократная промежуточная рихтовка катализаторной сетки между операциями и др.), что не позволяет автоматизировать производственный процесс и получать КНС стабильного состава;

2) многократное сворачивание катализаторной сетки в трубу диаметром не менее 300 мм приводит к возникновению напряжений в месте соприкосновения оксида алюминия и металла, деформации сетки и к частичной потере катализаторного (улавливающего) слоя [30];

3) наличие в отработанном КНС оксида алюминия усложняет выделение платиноидов в процессе аффинажа.

Похожий технический прием известен из патента [31] при изготовлении катализатора на носителе с сотовой структурой

из оксида алюминия. Нанесение оксида алюминия проводят из соли $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}$ с последующей термической обработкой образца при температуре от 300 до 400 °С. На подготовленный носитель с сотовой структурой из оксида алюминия наносят платину из раствора $\text{H}_2[\text{PtCl}_6]$, содержащего 1 % эфира целлюлозы для увеличения вязкости раствора.

В другом патенте [32] катализатор готовят следующим образом. Тщательно перемешивают смесь 400 г оксида алюминия, 100 г гидроксида алюминия, используемого в качестве неорганического связующего, 1500 г воды, $\text{H}_2[\text{PtCl}_6]$, содержащей 30 г платины, хлорида палладия, содержащего 15 г палладия, и подходящее количество соляной кислоты в шаровой мельнице с получением суспензии. Суспензию наносят распылением на внешнюю поверхность, обжигают при 500 °С в течение часа для термического разложения гидроксида алюминия и солей металлов платиновой группы с образованием слоя каталитического покрытия, содержащего оксид алюминия и катализаторы на основе металлов платиновой группы.

Катализатор СКУ для получения NO окислением NH_3

Для исключения перечисленных выше недостатков катализатора КНС предлагается вместо этого катализатора использовать сетчатый катализатор/улавнитель на основе угленовой ткани (СКУ). Золь платины или платинового сплава для приготовления этого катализатора готовят электро-конденсационным методом (ЭКМ) [33–40], суть которого заключается в пропускании с помощью искрового генератора высокочастотного электрического тока (800–1000 кГц, 600–900 В) между электродами и крупными частицами диспергируемого металла, помещёнными в жидкую фазу в межэлектродное пространство. Специальная конструкция

высокочастотного искрового генератора, питающегося от сети переменного тока (220 В, 50 Гц) обеспечивает получение вышеуказанных параметров, которые могут быть строго заданы или плавно регулироваться в ходе работы генератора.

В процессе работы генератора в жидкой фазе между электродами и частицами металла, помещёнными на дно реактора, создается незатухающий «тлеющий» искровой разряд. В искровом канале возникает высокая температура (до 10000 °С), что приводит к испарению металла в ограниченном объеме (образование «газового пузыря»). Последующее резкое понижение температуры «газового пузыря» в результате его контакта с жидкой фазой приводит к конденсации металлического пара с образованием высокодисперсных частиц металла, имеющих субмикронный размер (до 30 нм) и высокую удельную поверхность — до 300 м²/г.

Незатухающий «тлеющий» искровой разряд создается за счет использования элементов автоматического управления. Для получения СКУ в качестве жидкой фазы используют несмешивающиеся с водой органические жидкости, например, тетралин (1,2,3,4-тетрагидронафталин). В этом случае получают органозоли металлов. Концентрация металлов в органозолях не превышает 3–5 % масс., что хорошо согласуется с заданным содержанием платиноидов в СКУ (0.05–0.40 %).

Органозоли металлов получают в специально сконструированном трёхфазном реакторе смешения в присутствии диспергированных пузырьков газа (азот), ускоряющих процесс искрового разряда [37, 39, 40]. Реактор имеет циркуляционный контур, обеспечивающий получение органозоля с заданной концентрацией металла. Для стабилизации органозоля в него вводят ПАВ, например, полиэтиленгликоль. На физико-химические характеристики

органозолей платины, полученных ЭКМ, оказывают влияние многие факторы, основные из которых приведены в таблице 2.

Носитель для катализатора СКУ, угленовую ткань, готовят в три стадии термическим пиролизом волокнистого целлюлозного материала при высоких температурах без доступа воздуха в инертной атмосфере в соответствии с [41]. На первой стадии (сушка, терморелаксация) процесс ведут в интервале температур 150-200 °С. На второй стадии (карбонизация) процесс заканчивают при температуре 700 °С. На третьей стадии (графитация) обработку ведут при температуре до 2500 °С. Каждая из этих температурных стадий характеризуется определенной продолжительностью и скоростью изменения (подъема) температуры. Изменение температуры в каждой стадии может иметь непрерывный или дискретный характер. Перед первой стадией процесса (изредка — перед второй стадией) целлюлозный материал обрабатывают различными химическими

соединениями (катализаторами, антипиренами и др.).

Для приготовления носителя для катализатора СКУ используют устройство, описанное в патенте [42]. Для фиксации катализатора СКУ в реакторе может быть использован пакет разделительных сеток из сплава Х23Ю5Т. Подобное техническое решение было использовано в работе [43] — при использовании слоя платиноидных сеток под слоем сеток размещают сотовую регулярную структуру — блочный катализатор или насадку.

Катализатор СКУ готовят переносным методом с использованием технологии Ленгмюра–Блоджетт — одним из наиболее перспективных инструментальных методов, позволяющим формировать молекулярные монослои на поверхности жидкости и производить на их основе сборку пленочных структур на твердых поверхностях [44-46]. Графитизированную ткань с помощью специальных валков погружают в ванну с водой (или водным раствором), как это показано на рисунке 4.

Таблица 2 — Физико-химические характеристики органозолей платины, полученных ЭКМ. Жидкая фаза — тетралин (1,2,3,4-тетрагидронафталин)

Напряжение, В	Частота, кГц	Продолжительность работы искрового генератора, мин	Концентрация Pt в органозоле, % масс	$S_{уд}$, м ² /г	Средний диаметр частиц Pt, нм
700	850	10	0.03	165	18.5
700	900	20	0.06	138	20.1
600	800	30	0.15	140	17.9
900	900	50	0.38	142	18.6
700	850	90	0.43	127	20.2
850	700	110	0.52	128	21.0
700	850	70	0.35	121	18.5
800	850	80	0.42	123	19.6
850	850	85	0.56	158	20.1
600	850	95	0.55	144	20.2
900	850	100	0.61	156	21.4
700	850	75	0.48	157	19.6

На водную поверхность ванны помещают из специального дозирующего устройства тонкий слой (монослой) органической жидкой фазы, не смешивающейся с водой и содержащей нанодисперсные частицы платины. С помощью приемного валика перемещают слой графитизированной ткани с такой скоростью, чтобы обеспечить нанесение монослоя на ее поверхность. Скорость вращения приемного валика связана со специальным дозирующим устройством, обеспечивающим нанесение равномерного покрытия графитизированной ткани. После нанесения покрытия углеродная ткань с нанесенными наночастицами платины проходит отжим и термофиксацию. При необходимости процесс может быть повторен. Пары органической фазы со стадии термофиксации улавливают, конденсируют и повторно используют в процессе (на рисунке 4 не показано).

Приготовление катализатора СКУ имеет ряд технологических преимуществ перед катализатором КНС:

1. минимизировано число операций, предусматривающих использование ручного труда;
2. процесс может быть легко автоматизирован за счет регулирования скорости движения углеродной ткани в ванне (рисунок 4) и концентрации металла в золе металла;
3. отсутствует промежуточный носитель активного компонента катализатора (оксид алюминия в случае катализатора КНС), что исключает частичную потерю катализаторного/улавливающего слоя;
4. процесс аффинажа может быть значительно упрощен из-за отсутствия в отработанном катализаторе металлической сетки и промежуточного носителя катализатора — оксида алюминия.

По-видимому, процесс аффинажа может быть замещен процессом регенерации катализатора «Pt на электрографите», который используется в процессе получения ГАС гидрированием NO в среде серной кислоты [47].

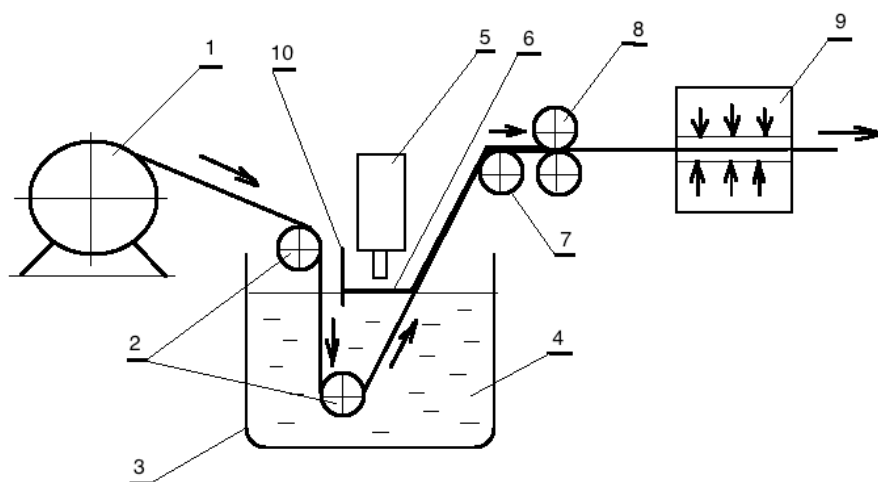


Рисунок 4 — Принципиальная технологическая схема получения катализатора СКУ переносным методом. 1 — углеродная ткань после стадии графитизации; 2 — специальные валки; 3 — ванна; 4 — вода (водный раствор); 5 — дозирующее устройство; 6 — органическая жидкая фаза; 7 — приемный валик; 8 — стадия отжима; 9 — стадия термофиксации; 10 — перегородка

Помимо использования катализатора Pt/угленовая ткань в процессе окисления NH_3 до NO перспективным также может быть его применение в трехфазном каталитическом реакторе смешения (рисунок 5), состоящим из:

- цилиндрического корпуса, эллиптической крышки и эллиптического днища;
- перемешивающего устройства с приводом, размещенным на эллиптической крышке (на рисунке 5 привод не показан), и внутренней мешалкой, закрепленной на валу, представляющим собой трубу большого диаметра с жёстко закреплённой на поверхности трубы мешалкой и с опорой трубы на подшипник, обеспечивающий свободное вращение трубы большого диаметра с мешалкой относительно остальных конструктивных элементов реактора;

- устройства для ввода газообразных реагентов, представляющего собой полую тарелку, расположенную между эллиптическим днищем и цилиндрическим корпусом и жёстко фиксируемую с помощью фланцевого соединения, соединяющего эллиптическое днище и цилиндрический корпус, причём полая тарелка имеет в верхней части отверстия, равномерно распределенные по верхней части тарелки и предназначенные для ввода газообразных реагентов в реакционный объём и имеет сквозные отверстия, обеспечивающие изолированный ввод жидкой фазы через полую тарелку без соприкосновения жидкой фазы с газообразными реагентами в реакционный объём, расположенный выше полую тарелки;

- штуцеров для ввода в реакционный объём жидкой фазы, для вывода газообразных продуктов реакции, для вывода из реакционного объёма жидкой фазы;

- теплообменной рубашки, расположенной с внешней стороны эллиптического днища и цилиндрического корпуса (на рисунке 5 не показано);

- системы циркуляции, расположенной снаружи реактора, включающей трубопровод, насос и теплообменное устройство и обеспечивающей циркуляцию продуктов реакции и исходных реагентов (на рисунке 5 не показано);

- тарельчатого пеногасителя, расположенного в нижней части эллиптической крышки.

Подвод газообразных реагентов к полую тарелку осуществляют с низа реактора по трубе большого диаметра, расположенной вертикально в центре реактора в нижней его части, причём труба большого диаметра конструктивно объединена с полую тарелкой и эллиптическим днищем, и они представляют собой единое целое.

Вертикально в центре реактора над полую тарелкой с опорой на полую тарелку установлен патрубок, в верхней части которого расположена опора для подшипника, причём вертикальное положение патрубка фиксируется трубой малого диаметра, расположенной соосно с трубой большого диаметра и жёстко с ней связанной.

При использовании двух несмешивающихся газообразных реагентов патрубок имеет дополнительные отверстия для ввода в реакционный объём по трубе малого диаметра одного из газообразных реагентов.

Катализатор используют в виде кольцевого каталитического блока, расположенного между цилиндрическим корпусом и мешалкой и опирающегося на полую тарелку.

Кольцевой каталитический блок представляет собой кольцевой цилиндр, с внешней стороны имеющий металлическую сетку или перфорированный металл с отверстиями, обеспечивающими свободное прохождение газовой и жидкой фаз.

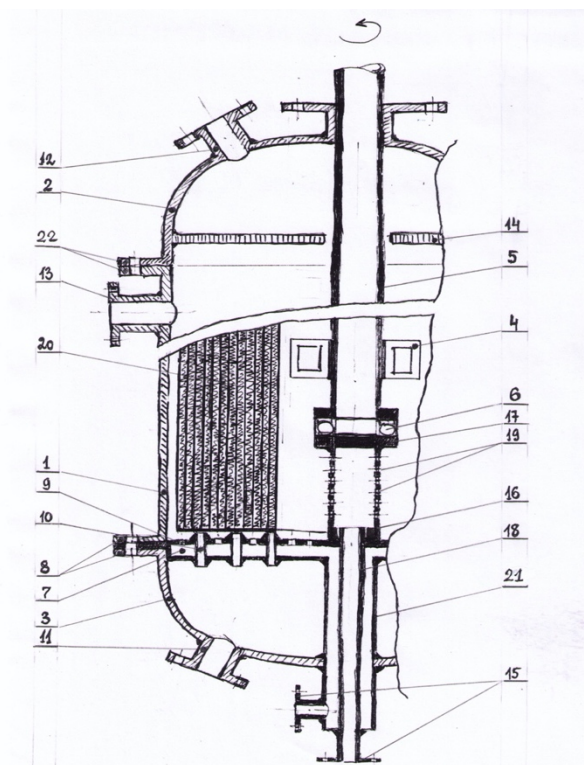


Рисунок 5 — Трёхфазный каталитический реактор смешения. 1 — цилиндрический корпус; 2 — эллиптическая крышка;

3 — эллиптическое днище; 4 — внутренняя мешалка; 5 — вал внутренней мешалки;

6 — подшипник; 7 — полая тарелка;

8 — нижнее фланцевое соединение;

9 — отверстия для ввода газообразных реагентов; 10 — сквозные отверстия для ввода жидкой фазы; 11 — штуцер для ввода жидкой фазы; 12 — штуцер для вывода газообразных продуктов; 13 — штуцер для вывода жидкой фазы; 14 — пеногаситель;

15 — штуцеры для подвода газообразных реагентов; 16 — патрубок; 17 — опора для подшипника; 18 — труба малого диаметра; 19 — дополнительные отверстия для ввода газообразных реагентов; 20 — кольцевой каталитический блок; 21 — труба большого диаметра; 22 — верхнее фланцевое соединение

Внутри кольцевого цилиндра располагается гетерогенный катализатор в виде ткани из углеродных волокон с нанесенными на ткань активными компонентами катализатора.

Реактор работает следующим образом (рисунок 5). В реактор через штуцер (11)

вводят жидкую фазу. Жидкая фаза через сквозные отверстия (10) в полую тарелку (7) поступает в реакционную зону, расположенную выше полую тарелку (7). В эту же реакционную зону через отверстия (9), расположенные в верхней части полую тарелку (7), поступает более лёгкий газообразный реагент (водород), а через отверстия (19), расположенные в патрубке (16), поступает более тяжёлый газовый реагент (оксид азота (II)). Жидкая фаза вместе с двумя газообразными реагентами интенсивно перемешивается с помощью внутренней мешалки (4) и реагирует с газообразными реагентами в кольцевом каталитическом блоке (20). Пенно-газовый слой разрушается с помощью пеногасителя (14) и газообразные продукты выводятся из реактора через штуцер (12). Жидкие продукты реакции выводятся из реактора через штуцер (13) и направляются в циркуляционную систему (на рисунке 5 не показана), в которой поддерживается заданная температура жидкой фазы с помощью дополнительного теплообменного устройства (на рисунке 5 не показано). Часть жидкой фазы рециркулируют через штуцер (11) в реактор, а оставшуюся часть либо направляют в другой реактор, либо выводят в качестве продукта реакции.

Использование катализатора в виде кольцевого каталитического блока позволяет полностью исключить флотационный режим процесса и более полно использовать реакционный объём реактора. Другими преимуществами данного реактора являются:

а) отдельная подача в реакционный объём двух газов, что исключает образование взрывоопасной смеси;

б) проведение процесса в кинетической области за счёт интенсивного перемешивания;

в) высокая надёжность конструкции реактора обеспечивается наличием

фиксирующих и опорных элементов внутренних устройств реактора.

Заключение

По результатам проведенного в работе исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. проанализированы источники получения водорода в процессе переработки отходов в сопряженном Комплексе ВТПК+БАТ и возможность использования водорода при получении ГАС;

2. подробно рассмотрена первая стадия получения ГАС — получение нитрозных газов высокотемпературным окислением аммиака и Pt-содержащие катализаторы, используемые в этом процессе; проанализированы недостатки процесса, связанные с использованием известных КНС-катализаторов этого процесса;

3. предложен новый сетчатый катализатор на основе угленовой ткани (СКУ) и описаны основные стадии получения этого катализатора; приведены экспериментальные физико-химические характеристики прекурсора катализатора;

4. сравнением катализаторов КНС и СКУ показаны преимущества последнего;

5. высказано предположение о целесообразности использования получаемого в сопряженном Комплексе ВТПК+БАТ водорода непосредственно в АПКК в БХП на установке получения ГАС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Артемов А. В., Вошинин С. А., Переславцев А. В., Кулыгин В. М. Перспективные аспекты плазменной переработки стеклосодержащих отходов. *Твердые бытовые отходы*, 2018, №3, с. 39–43.

[2]. Артемов А. В., Переславцев А. В., Вошинин С. А. и др. Получение базальтовых волокон из базальтоподобного шлака плазменной переработки отходов. *Химическая технология*, 2021, т. 22, № 7, с. 294–298.

[3]. Артемов А. В., Переславцев А. В., Вошинин С. А. и др. Декарбонизация в совмещенном процессе получения биодизельного топлива (техико-экономический анализ). *Энергия: экономика, техника, экология*, 2022, № 7, с. 55–69.

[4]. Bando exploration Regione Toscana. Incontro di approfondimento su Tecnologia Waste to Chemicals (W2C). *Waste to Chemicals a new concept of biorefinery, 14th Concaawe Symposium*, 2022, Firenze, 8 giugno, p. 1–9.

[5]. Огарков А. А. Производство капролактама. *Российский химический журнал*, 2006, т. 50, № 3, с. 25–30.

[6]. Бобровская А. Н., Симонов П. А., Квон Р. И. и др. Получение сульфата гидроксилamina гидрированием NO на катализаторе Pt/Графит: II. Влияние условий осуществления реакции и физико-химического состояния катализатора на выход продуктов. *Катализ в промышленности*, 2019, т. 19, № 4, с. 275–288.

[7]. Герасименко В. И., Огарков А. А., Ардамаков С. В. и др. Технологические аспекты синтеза гидроксиламинсульфата. *Российский химический журнал*, 2006, т. 50, № 3, с. 64–71.

[8]. Патент РФ 2305657. Способ управления процессом получения гидроксиламин-сульфата. МПК C01B 21/14. Герасименко В. И., Огарков А. А., Ардамаков С. В. и др. Оpubл. 10.09.2007, БИ 3 25.

[9]. Соловьев С. А., Кириенко П. И. Разработка структурированного катализатора для селективного восстановления O₂ водородом в присутствии NO. *Катализ в промышленности*, 2010, № 4, с. 13–20.

[10]. Караваев М. М., Засорин А. П., Клещев Н. П. Каталитическое окисление аммиака. М., Химия, 1983, 232 с.

[11]. Патент РФ 982777. Конвертер аммиака. МПК B01J 8/04.

Астановский Л. З., Гохгут А. Ф., Сявриков А. Я. и др. Оpubл. 23.12.1982, БИ № 47.

[12]. Патент РФ 1509109. Конвертер аммиака. МПК В01J 8/04. Астановский Л. З., Сявриков А. Я., Круглянский В. Я. и др. Оpubл. 23.09.1989, БИ № 35.

[13]. Патент РФ 1813557. Аппарат окисления аммиака. МПК В01J 8/02. Орел Г. В., Гайворонский А. Н. Оpubл. 07.05.1993, БИ № 17.

[14]. Патент РФ 2632685. Реактор для окисления аммиака с внутренним фильтровальным элементом. МПК В01J 8/02. Фокс Р. А. Оpubл. 27.04.2016, БИ № 12.

[15]. Патент РФ 2717801. Реактор для каталитической парокислородной конверсии аммиака. МПК В01J 8/02, МПК В01J 19/24. Ардамаков С. В., Герасименко А. В., Лукьянов И. В. Оpubл. 25.03.2020, БИ № 9.

[16]. Артемов А. В., Дюбанов М. В., Ардамаков С. В. Взрывобезопасный каталитический синтез гидроксиламинсульфата. *Промышленные процессы и технологии*, 2022, т. 2, № 2(4), с. 38–49.

[17]. Артемов А. В., Дюбанов М. В., Ардамаков С. В. Катализаторы синтеза гидроксиламинсульфата гидрированием оксида азота (II) водородом в серной кислоте. *Промышленные процессы и технологии*, 2022, т. 2, № 3(5), с. 57–75.

[18]. Носков А. С. Промышленные каталитические реакторы и их особенности. *Промышленный катализ в лекциях*, 2006, № 4, с. 57–59.

[19]. Бесков В. С., Бурштейн Е. А., Ванчурин В. И. и др. Моделирование окисления аммиака на оксидном блочном катализаторе. *Катализ в промышленности*, 2010, № 3, с. 45–48.

[20]. Бесков В. С., Флок В. К. Моделирование каталитических процессов и реакторов. М., Химия, 1991, 256 с.

[21]. Сеттерфилд Ч. Практический курс гетерогенного катализа. М., Мир, 1984, 520 с.

[22]. Носков А. С. Новая крупнотоннажная технология получения закиси азота. *Катализ в промышленности*, 2004, № 1, с. 5–11.

[23]. Патент РФ 2392048. Уловитель платиноидов из газовой смеси. МПК В01J 23/44. Чернышев В. И. Оpubл. 20.06.2010, БИ № 17.

[24]. Патент РФ 2638927. Каталитическая система для конверсии аммиака. МПК В01J 23/42. Хальзов П. И., Звягин В. Н., Тушканов И. М. Оpubл. 19.12.2017, БИ № 35.

[25]. Бокий В. А. Катализаторы на сетчатых носителях. Сб. тезисов Российского конгресса по катализу «Роскатализ», Новосибирск, 2011, т. 1, с. 180.

[26]. Бурштейн Е. А., Ванчурин В. И., Яценко А. В. Промышленный мониторинг потерь платиноидов при окислении аммиака в агрегатах УКЛ-7. *Катализ в промышленности*, 2014, № 3, с. 59–65.

[27]. Ванчурин В. И., Головня Е. В., Бурштейн Е. А., Яценко А. В. Исследование каталитических систем для окисления аммиака в опытно-промышленных условиях. *Катализ в промышленности*, 2007, № 3, с. 38–42.

[28]. Бесков В. С., Бурштейн Е. А., Головня Е. В., Ванчурин В. И. Моделирование процесса окисления аммиака на платиновых сетках. *Катализ в промышленности*, 2008, № 2, с. 31–36.

[29]. Патент РФ 2703560. Способ приготовления катализатора. МПК В01J 37/025. Лобко С. В., Сандалов И. П., Лавров А. А. Оpubл. 21.10.2019, БИ № 30.

[30]. Ильгамов М. А. Влияние поверхностных эффектов на изгиб и устойчивость нанопроволок. *Доклады Академии наук*, 2019, т. 488, № 2, с. 137–149.

- [31]. Патент Великобритании 1517122. Honey Comb Structured Catalysts Containing Noble Metals. МПК B01J 35/04. J. Stenzel, W. Wendler. Оpubл. 21.01.1976.
- [32]. Патент США 5278113. Catalytic Body and Process for Producing the Same. МПК B01J 37/02. Y.O. Hirakata, K. K Tsuzuki, H. W. Yawata, et al. Оpubл. 11.01.1994.
- [33]. Патент РФ 750821. Способ получения металлических высокодисперсных катализаторов. МПК B01J 37/34. Артемов А. В., Писаренко О. И., 1977.
- [34]. Артемов А. В., Лунина М. А., Хачатурян А. А. Высокодисперсные металлы – эффективные катализаторы жидкофазных процессов. *Журнал прикладной химии*, 1985, № 3, с. 591–595.
- [35]. Артемов А. В. Новые высокоэффективные катализаторы жидкофазных окислительных процессов. *Катализ в промышленности*, 2001, № 2, с. 18–23.
- [36]. Артемов А. В., Жильцов В. А., Крутяков Ю. А. и др. Получение наноразмерных металлов электрическим разрядом в жидкостях. *Вопросы атомной науки и техники*, 2008, № 4, с. 150–154.
- [37]. Артемов А. В., Кулыгин В. М., Переславцев А. В. и др. Многофазный катализ с использованием наночастиц металлов, полученных электрическим разрядом в жидкости. *Катализ в промышленности*, 2011, № 5, с. 34–44.
- [38]. Artemov A. V., Kulygin V. M., Pereslavitsev A. V., et al. Multiphase Catalysis Using Metal Nanoparticles Prepared via an Electric Discharge in a Liquid. *Catalysis in Industry*, 2012, v. 4, N 1, p. 51–58.
- [39]. Патент РФ 2437741. Способ получения нанодисперсных металлов в жидкой фазе. МПК B22F 9/14. Артемов А. В., Жильцов В. А., Крутяков Ю. А. и др. Оpubл. 27.12.2011, БИ № 36.
- [40]. Патент РФ 2430999. Устройство для получения высокодисперсных металлов в жидкой фазе. МПК B82B 3/00. Артемов А. В., Жильцов В. А., Крутяков Ю. А. и др. Оpubл. 10.10.2011, БИ № 28.
- [41]. Патент РФ 2596752. Способ получения углеродных волокнистых материалов. МПК D01F 9/16. Живетин В. В., Зайцев М. В., Артемов А. В. Оpubл. 10.09.2016, БИ № 25.
- [42]. Патент РФ 2645208. Устройство для получения углеродных волокнистых материалов. МПК D01F 9/16. Живетин В. В., Зайцев М. В., Артемов А. В. Оpubл. 04.05.2017, БИ № 13.
- [43]. Ванчурин В. И., Головня Е. В., Яценко А. В. Окисление аммиака на тканых и вязаных платиноидных сетках. *Катализ в промышленности*, 2011, № 6, с. 28–33.
- [44]. Lehn J. M. Supramolecular Chemistry: Concepts and Perspectives. Weinheim, VCH Verlagsgesellschaft GmbH, 1995, p. 125–158.
- [45]. Becher J., Schamburg K. Molecular Engineering for Advanced Materials. *NATO ASI Series, Series C: Math. and Phys. Sci.*, 1995, p. 68–92.
- [46]. Блинов Л. М. Ленгмюровские пленки. *Успехи физических наук*, 1988, т. 155, № 3, с. 443–480.
- [47]. Артемов А. В., Дюбанов М. В., Ардамаков С. В. Катализаторы синтеза гидроксиламинсульфата гидрированием оксида азота (II) водородом в серной кислоте. *Промышленные процессы и технологии*, 2022, т. 2, № 3(5), с. 57–75.

Артемов Арсений Валерьевич — д-р хим. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (Российская Федерация, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1).

Переславцев Александр Васильевич — канд. техн. наук, начальник лаборатории технологических применений низкотемпературной плазмы, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (Российская Федерация, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1).

Воцинин Сергей Александрович — главный специалист, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (Российская Федерация, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1).

Дюбанов Михаил Викторович — начальник отдела материалов, Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме Российской академии наук (Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, стр. 6).

Ардамаков Сергей Витальевич — директор, ООО «Волгатехноол» (Российская Федерация, 445007, Тольятти, ул. Новозаводская, д. 6).

Реш Елизавета Алексеевна — Консультант отдела анализа, статистики и планирования Департамента государственной политики и регулирования в сфере обращения с отходами производства и потребления, Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Российская Федерация, 125993, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 4/6).

Waste plasma pyrolysis products processing: obtaining hydrogen and hydroxylamine sulfate by hydrogenation of nitrogen oxide (II) in sulfuric acid medium

A. V. Artemov^{*,1}, A. V. Pereslavl'tsev^{*}, S. A. Voshchinin^{*}, M. V. Dubanov^{**},
S. V. Ardamakov^{***}, E. A. Resh^{****}

^{*}National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

^{**}Interdepartmental Center for Analytical Research in Physics, Chemistry and Biology at the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^{***}LLC «Volgatekhnool», Togliatti, Russia

^{****}Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation, Moscow, Russia

Abstract

The data on obtaining hydrogen in the process of waste plasma processing are presented, and the feasibility of using hydrogen in the chemical processing block of the Regional Agro-Industrial-Communal Cluster is suggested. One of the possible directions for using hydrogen is the synthesis of hydroxylamine sulfate by hydrogenation of NO in the presence of a Pt/C catalyst in a sulfuric acid solution. The first stage of this synthesis, namely the oxidation of NH₃ to NO in the presence of platinum catalyst grids, is considered in detail. A new catalyst for this process is proposed — Pt, applied to carbon fabric using the Langmuir-Blodgett transfer method. A description of a three-phase catalytic reactor using Pt/C-fabric as a catalyst is provided.

Keywords

Plasma waste processing, hydrogen, hydroxylamine sulfate, synthesis, ammonia oxidation, catalysts.

REFERENCES

- | | |
|---|---|
| <p>[1]. Artemov A. V., Voshchinin S. A., Pereslavl'tsev A. V., Kulygin V. M. Perspektivnye aspekty plazmennoy pererabotki steklosoderzhashchikh otkhodov [Prospective aspects of plasma processing of glass-containing waste]. <i>Tverdye bytovye otkhody [Solid household waste]</i>, 2018, no. 3, pp. 39–43. (In Russ.)</p> | <p>[2]. Artemov A. V., Pereslavl'tsev A. V., Voshchinin S. A. i dr. Poluchenie bazal'tovykh volokon iz bazal'topodobnogo shlaka plazmennoy pererabotki otkhodov [Production of basalt fibers from basalt-like slag of plasma processing of waste]. <i>Khimicheskaya tekhnologiya [Chemical technology]</i>, 2021, vol. 22, no. 7, pp. 294–298. (In Russ.)</p> |
|---|---|

¹ Corresponding author:

Email: arsenyart@icloud.com

- [3]. Artemov A. V., Pereslavl'tsev A. V., Voshchinin S. A. i dr. Dekarbonizatsiya v sovmeshchennom protsesse polucheniya biodizel'nogo topliva (tekhniko-ekonomicheskii analiz) [Decarbonization in the combined process of producing biodiesel fuel (technical and economic analysis)]. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya* [Energy: economics, technology, ecology], 2022, no. 7, pp. 55–69. (In Russ.)
- [4]. Bando exploration Regione Toscana. Incontro di approfondimento su Tecnologia Waste to Chemicals (W2C)/ Waste to Chemicals a new concept of biorefinery, *14th Concauwe Symposium*, 2022, Florence, June 8, p. 1-9.
- [5]. Ogarkov A. A. Proizvodstvo kaprolaktama [Production of caprolactam]. *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal* [Russian Chemical Journal], 2006, vol. 50, no. 3, pp. 25–30. (In Russ.)
- [6]. Bobrovskaya A. N., Simonov P. A., Kwon R. I. et al. Polucheniye sulfata gidroksilamina gidrirovaniyem NO na katalizatore Pt/Grafit: II. Vliyaniye usloviy osushchestvleniya reaktsii i fiziko-khimicheskogo sostoyaniya katalizatora na vykhod produktov [Preparation of hydroxylamine sulfate by NO reduction on Pt/Graphite catalyst: II. Effect of reaction conditions and catalyst physicochemical state on product yield]. *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in industry], 2019, vol. 19, no. 4, pp. 275–288. (In Russ.)
- [7]. Gerasimenko V. I., Ogarkov A. A., Ardamanov S. V. et al. Tekhnologicheskiye aspekty sinteza gidroksilamin-sulfata [Technological aspects of hydroxylamine sulfate synthesis]. *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal* [Russian Chemical Journal], 2006, vol. 50, no. 3, pp. 64-71. (In Russ.)
- [8]. Patent RF 2305657. Sposob upravleniya protsessom polucheniya gidroksilamin-sulfata [Method for controlling the process of obtaining hydroxylamine sulfate]. Gerasimenko V. I., Ogarkov A. A., Ardamanov S. V. et al. Publ. 10.09.2007, BI 3 25. (In Russ.)
- [9]. Solovyev S. A., Kirienko P. I. Razrabotka strukturirovannogo katalizatora dlya selektivnogo vosstanovleniya O₂ vodorodom v prisutstvii NO [Development of a structured catalyst for selective reduction of O₂ by hydrogen in the presence of NO]. *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in industry], 2010, no. 4, pp. 13–20. (In Russ.)
- [10]. Karavaev M. M., Zasorin A. P., Kleshchev N. P. Kataliticheskoye okisleniye ammoniaka [Catalytic oxidation of ammonia]. Moscow: Khimiya Publ., 1983, 232 p. (In Russ.)
- [11]. Patent RF 982777. Konverter ammiaka [Ammonia converter]. MPC B01J 8/04. Astanovskii L. Z., Gokhgut A. F., Syavrikov A. Ya. et al. Publ. 23.12.1982, Bull. No. 47. (In Russ.)
- [12]. Patent RF 1509109. Konverter ammiaka [Ammonia converter]. MPC B01J 8/04. Astanovskii L. Z., Syavrikov A. Ya., Kruglyanskii V. Ya. et al. Publ. 23.09.1989, Bull. No. 35. (In Russ.)
- [13]. Patent RF 1813557. Apparat okisleniya ammiaka [Ammonia oxidation apparatus]. MPC B01J 8/02. Orel G. V., Gaivoronskii A. N. Publ. 07.05.1993, Bull. No. 17. (In Russ.)
- [14]. Patent RF 2632685. Reaktor dlya okisleniya ammiaka s vnutrennim fil'trovatelnym elementom [Reactor for ammonia oxidation with internal filtering element]. MPC B01J 8/02. Fox R. A. Publ. 27.04.2016, Bull. No. 12. (In Russ.)
- [15]. Patent RF 2717801. Reaktor dlya kataliticheskoi parokislorodnoi koverstii ammiaka [Reactor for catalytic steam-oxygen conversion of ammonia]. MPC B01J 8/02, MPC B01J 19/24. Ardamakov S. V., Gerasimenko A. V., Luk'yanov I. V. Publ. 25.03.2020, Bull. No. 9. (In Russ.)

- [16]. Artemov A. V., Dyubanov M. V., Ardamakov S. V. Vzryvobezopasnyi kataliticheskii sintez gidroksilaminsulfata [Explosion-proof catalytic synthesis of hydroxylamine sulfate]. *Promyshlennyye protsessy i tekhnologii [Industrial Processes and Technologies]*, 2022, vol. 2, no. 2(4), pp. 38–49. (In Russ.)
- [17]. Artemov A. V., Dyubanov M. V., Ardamakov S. V. Katalizatory sinteza gidroksilaminsulfata gidrirovaniem oksida azota (II) vodorodom v sernoi kislot [Catalysts for the synthesis of hydroxylamine sulfate by hydrogenation of nitrogen oxide (II) in sulfuric acid]. *Promyshlennyye protsessy i tekhnologii [Industrial Processes and Technologies]*, 2022, vol. 2, no. 3(5), pp. 57–75. (In Russ.)
- [18]. Noskov A. S. Promyshlennyye kataliticheskie reaktory i ikh osobennosti [Industrial catalytic reactors and their features]. *Promyshlennyyi kataliz v lektsiyakh [Industrial Catalysis in Lectures]*, 2006, no. 4, pp. 57–59. (In Russ.)
- [19]. Beskov V. S., Burstein E. A., Vanchurin V. I. et al. Modelirovanie okisleniya ammiaka na oksidnom blochnom katalizatore [Modeling of ammonia oxidation on an oxide block catalyst]. *Kataliz v promyshlennosti [Catalysis in Industry]*, 2010, No. 3, pp. 45–48. (In Russ.)
- [20]. Beskov V. S., Flok V. K. Modelirovanie kataliticheskikh protsessov i reaktorov [Modeling of catalytic processes and reactors]. Moscow, Khimiya Publ., 1991, 256 p. (In Russ.)
- [21]. Setterfield Ch. Prakticheskii kurs geterogennogo kataliza [Practical course on heterogeneous catalysis]. Moscow, Mir Publ., 1984, 520 p. (In Russ.)
- [22]. Noskov A. S. Novaya krupnotonnazhnaya tekhnologiya polucheniya zakisi azota [New large-scale technology for nitrogen oxide production]. *Kataliz v promyshlennosti [Catalysis in Industry]*, 2004, No. 1, pp. 5–11. (In Russ.)
- [23]. Patent RF 2392048. Ulovitel platinoidov iz gazovoi smesi [Catcher of platinum metals from gas mixture]. MPK B01J 23/44. Chernyshev V. I. Publ. 20.06.2010, BI No. 17. (In Russ.)
- [24]. Patent RF 2638927. Kataliticheskaya sistema dlya konversii ammiaka [Catalytic system for ammonia conversion]. MPK B01J 23/42. Khalbzov P. I., Zvyagin V. N., Tushkanov I. M. Publ. 19.12.2017, BI No. 35. (In Russ.)
- [25]. Bokii V. A. Katalizatory na setchatykh nositelyakh [Catalysts on mesh supports]. Collection of abstracts of the Russian congress on catalysis "Roskataliz", Novosibirsk Publ., 2011, vol. 1, pp. 180. (In Russ.)
- [26]. Burstein E. A., Vanchurin V. I., Yaschenko A. V. Promyshlennyyi monitoring poter platinoidov pri okislenii ammiaka v agregatakh UKL-7 [Industrial monitoring of platinum losses during ammonia oxidation in UKL-7 units]. *Kataliz v promyshlennosti [Catalysis in Industry]*, 2014, No. 3, pp. 59–65. (In Russ.)
- [27]. Vanchurin V. I., Golovnya E. V., Burstein E. A., Yaschenko A. V. Issledovanie kataliticheskikh sistem dlya okisleniya ammiaka v opytно-promyshlennykh usloviyakh [Investigation of catalytic systems for ammonia oxidation under pilot-plant conditions]. *Kataliz v promyshlennosti [Catalysis in Industry]*, 2007, No. 3, pp. 38–42. (In Russ.)
- [28]. Beskov V. S., Burstein E. A., Golovnya E. V., Vanchurin V. I. Modelirovanie protsessa okisleniya ammiaka na platinovykh setkakh [Modeling of the process of ammonia oxidation on platinum meshes]. *Kataliz v promyshlennosti [Catalysis in Industry]*, 2008, No. 2, pp. 31–36. (In Russ.)
- [29]. Patent RF 2703560. Sposob prigotovleniya katalizatora [Method for preparing a catalyst]. MPK B01J 37/025.

Lobko S. V., Sandalov I. P., Lavrov A. A. Publ. 21.10.2019, BI No. 30. (In Russ.)

[30]. Il'gamov M. A. Vliyanie poverkhnostnykh effektov na izgib i ustoychivost' nanoprovod [Influence of surface effects on the bending and stability of nanowires]. *Doklady Akademii nauk [reports of the Academy of Sciences]*, 2019, vol. 488, No. 2, pp. 137–149. (In Russ.)

[31]. Patent UK 1517122. Honey Comb Structured Catalysts Containing Noble Metals. MPK B01J 35/04. J. Stenzel, W. Wendler. Publ. 21.01.1976.

[32]. Patent USA 5278113. Catalytic Body and Process for Producing the Same. MPK B01J 37/02. Y. O. Hirakata, K. K. Tsuzuki, H. W. Yawata, i dr. Publ. 11.01.1994.

[33]. Patent RF 750821. Sposob polucheniya metallicheskich vysokodispersnykh katalizatorov [Method for producing metallic highly dispersed catalysts]. MPK B01J 37/34. Artemov A. V., Pisarenko O. I., 1977. (In Russ.)

[34]. Artemov A. V., Lunina M. A., Khachatryan A. A. Vysokodispersnye metally – effektivnye katalizatory zhidkofaznykh protsessov [Highly dispersed metals - effective catalysts for liquid-phase processes]. *Zhurnal prikladnoi khimii [Journal of Applied Chemistry]*, 1985, No. 3, pp. 591–595. (In Russ.)

[35]. Artemov A. V. Novye vysokoeffektivnye katalizatory zhidkofaznykh okisitel'nykh protsessov [New highly effective catalysts for liquid-phase oxidation processes]. *Kataliz v promyshlennosti [Catalysis in Industry]*, 2001, No. 2, pp. 18–23. (In Russ.)

[36]. Artemov A. V., Zhiltsov V. A., Krutyakov Yu. A. et al. Poluchenie nanorazmernykh metallov elektricheskim razryadom v zhidkostyakh [Obtaining nanosized metals by electric discharge in liquids]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki [Atomic Energy and Technology journal]*, 2008, No. 4, pp. 150–154. (In Russ.)

[37]. Artemov A. V., Kulygin V. M., Pereslavitsev A. V., et al. Mnogofaznyy kataliz s ispol'zovaniem nanochastits metallov, poluchennykh elektricheskim razryadom v zhidkosti [Multiphase Catalysis Using Metal Nanoparticles Prepared via an Electric Discharge in a Liquid]. *Kataliz v promyshlennosti [Catalysis in Industry]*, 2011, No. 5, p. 34–44. (In Russ.)

[38]. Artemov A. V., Kulygin V. M., Pereslavitsev A. V. et al. Multiphase catalysis using metal nanoparticles obtained by electric discharge in a liquid. *Catalysis in Industry*, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 51–58.

[39]. Patent RF 2437741. Sposob polucheniya nanodispersnykh metallov v zhidkoy faze [Method for Producing Nanodispersed Metals in a Liquid Phase]. MKP B22F 9/14. Artemov A. V., Zhiltsov V. A., Krutyakov Yu. A., i dr. Publ. 27.12.2011, BI No. 36. (In Russ.)

[40]. Patent RF 2430999. Ustroystvo dlya polucheniya vysokodispersnykh metallov v zhidkoy faze [Device for Producing Highly Dispersed Metals in a Liquid Phase]. MKP B82B 3/00. Artemov A. V., Zhiltsov V. A., Krutyakov Yu. A., et al. Publ. 10.10.2011, BI No. 28. (In Russ.)

[41]. Patent RF 2596752. Sposob polucheniya uglerodnykh voloknistykh materialov [Method for producing carbon fibrous materials]. MKP D01F 9/16. Zhivetin V. V., Zaytsev M. V., Artemov A. V. Publ. 10.09.2016, BI No. 25. (In Russ.)

[42]. Patent RF 2645208. Ustroystvo dlya polucheniya uglerodnykh voloknistykh materialov [Device for producing carbon fibrous materials]. MPK D01F 9/16. Zhivetin V. V., Zaytsev M. V., Artemov A. V. Publ. 04.05.2017, BI No. 13. (In Russ.)

[43]. Vanchurin V. I., Golovnya E. V., Yatsenko A. V. Okislenie ammiaka na tkanykh i vyazanykh platinoidnykh setkakh [Oxidation of ammonia on woven and knitted

platinum grids]. *Kataliz v promyshlennosti [Catalysis in Industry]*, 2011, No. 6, pp. 28–33. (In Russ.)

[44]. Lehn J. M. *Supramolecular Chemistry: Concepts and Perspectives*. Weinheim, VCH Verlagsgesellschaft GmbH, 1995, p. 125–158.

[45]. Becher J., Schamburg K. *Molecular Engineering for Advanced Materials*. NATO ASI Series, Series C: Math. and Phys. Sci., 1995, pp. 68–92.

[46]. Blinov L. M. Lengmyurovskie plenki [Langmuir films]. *Uspekhi fizicheskikh*

nauk [Successes of Physical Sciences], 1988, vol. 155, No. 3, pp. 443–480. (In Russ.)

[47]. Artemov A. V., Dyubanov M. V., Ardamaov S. V. Katalizatory sinteza gidroksilamin-sulfata gidrirovaniem oksida azota (P) vodorodom v sernoj kislyote [Catalysts for the synthesis of hydroxylamine sulfate by hydrogenation of nitrogen oxide (P) in sulfuric acid]. *Promyshlennyye processy i tehnologii [Industrial processes and technologies]*, 2022, vol. 2, No. 3(5), pp. 57–75. (In Russ.)

Artemov A. V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Leading Researcher, National Research Center «Kurchatov Institute» (Academician Kurchatov Square, 1, Moscow, 123182, Russian Federation).

Pereslavitsev A. V. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Laboratory of Technological Application of Low-Temperature Plasma of the National Research Center "Kurchatov Institute" (Academician Kurchatov Square, 1, Moscow, 123182, Russian Federation).

Voshchinin S. A. — Chief Specialist of the State Research Center "Kurchatov Institute" (Academician Kurchatov Square, 1, Moscow, 123182, Russian Federation).

Dubanov M. V. — Head Of Materials Department, Interdepartmental Center for Analytical Research in Physics, Chemistry and Biology at the Presidium of the Russian Academy of Sciences (Profsoyuznaya st., 65, building 6, Moscow, 117342, Russian Federation).

Ardamakov S. V. — director of LLC «Volgatekhnool» (Novozavodskaya str., 6, Togliatti, 445007, Russian Federation).

Resh E. A. — Consultant, Department of Analysis, Statistics and Planning, Department of State Policy and Regulation in the Field of Industrial and Consumer Waste Management, Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation (Bolshaya Gruzinskaya st., 4/6, 125993, Moscow, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Переработка продуктов плазменного пиролиза отходов: получение водорода и гидроксиламинсульфата гидрированием оксида азота (II) в среде серной кислоты / А. В. Артемов, А. В. Переславцев, С. А. Вошинин, М. В. Дюбанов, С. В. Ардамаков, Е. А. Реш // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 3(10). С. 10–31.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-10-31

Please cite this article as:

Artemov A. V., Pereslavitsev A. V., Voshchinin S. A., Dubanov M. V., Ardamakov S. V., Resh E. A. Waste plasma pyrolysis products processing: obtaining hydrogen and hydroxylamine sulfate by hydrogenation of nitrogen oxide (II) in sulfuric acid medium. *Industrial processes and Technologies*, 2023, vol. 3, no. 3(10), pp. 10–31.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-10-31

Анализ результатов мониторинга тропосферного озона в городе Москве

А. Н. Цедилин^{*}, Д. А. Макаренков^{*,**,1}, А. С. Нартов^{***}

^{}Московский политехнический университет, Москва, Россия*

*^{**}НИЦ «Курчатовский институт» Курчатовский комплекс химических исследований
(ИРЕА), Москва, Россия*

*^{***}Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия*

Аннотация

В статье описано негативное влияние тропосферного озона на технобиосферу. Отмечено, что в последние десятилетия скорость роста концентрации тропосферного озона в среднем составляет 1–2% в год и необходимо формирование нового научно-практического направления в обеспечении техносферной безопасности, связанного с природным и техногенным озоном. Для успешного развития этого направления необходимы экспериментально обоснованные реперные значения концентраций тропосферного озона для исследуемых территорий. Показано, что для урбанизированного региона целесообразно использование усредненных во времени и по территории концентраций О₃. Полученная методом статической оценки результатов базы данных ГПБУ «Мосэкомониторинг» среднегодовая за 2022 г. концентрация озона, усредненная по территории города, равная 0.0376 мг/м³, может стать реперным значением на территории города Москвы.

Ключевые слова

Тропосферный озон, технобиосфера, парниковый эффект, озоностойкость, токсичность, статистическая оценка, реперные значения.

Введение

Озон — аллотропное видоизменение кислорода, образование которого в атмосфере обусловлено преимущественно живым веществом [1]. В тропосфере (приземный воздух) присутствие О₃ оказывает существенное воздействие на технобиосферу.

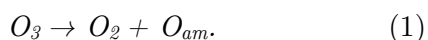
Озон способствует росту парникового эффекта. Парниковые газы — газообразные вещества природного или антропогенного происхождения, которые поглощают и выделяют инфракрасное излучение. Они

обладают высокой прозрачностью в видимом диапазоне и поглощением в инфракрасном диапазоне. Свойства озона, связанные с парниковым эффектом, обусловлены поглощением инфракрасного излучения в полосах 9.4–9.9 мкм с центром 9.65 мкм и коэффициентом прозрачности свыше 0.85. Потенциальный вклад тропосферного озона в рост парникового эффекта атмосферы по различным оценкам составляет 3–7% или около 25% от вклада СО₂ [2].

¹ Для переписки:

Email: makarenkovd@mail.ru

Озон увеличивает окислительную способность тропосферы: наиболее распространенное проявление окислительной способности приземного воздуха — коррозия, самопроизвольное разрушение материалов (металл, керамика, дерево, пластмасса и др.) в результате химического или электрохимического взаимодействия с окружающей средой. Причиной коррозии служит термодинамическая неустойчивость материалов к воздействию атмосферных газов (кислорода и паров воды). O_3 — сильнейший окислитель (сильнее атмосферного кислорода) за счет образования реакционноспособного атомарного кислорода:



Для характеристики его окислительной способности в приземном воздухе используется понятие озоностойкости. O_3 окисляет все металлы, кроме Au и Pt, и большинство неметаллов. Взаимодействует с неметаллами, окисляя их до высших оксидов. Взаимодействует с оксидами (низшие переводит в высшие). Взаимодействует с сульфидами, селенидами и теллуридами, переводя их в сульфаты, селенаты и теллулаты. Многие горючие органические вещества (спирты, кетоны, углеводороды и т. д.) при соприкосновении с озоном воспламеняются или взрываются [3]. Существенно воздействие озона на органические материалы: ткани, пластмассы, резину. Озон по-разному воздействует во влажных и сухих условиях, при высокой и низкой концентрации. Поэтому во многих случаях лучшим методом определения озоностойкости является проведение экспериментального тестирования.

Озон оказывает негативное влияние на живое вещество: являясь активным окислителем, при контакте с живыми структурами O_3 вызывает оксидативный стресс с лавинообразным образованием свободных радикалов, вызывающих их деградацию и

гибель. По параметрам острой токсичности в РФ озон относится к 1 классу опасности [4]. Предельно допустимая концентрация (ПДК) озона в воздухе рабочей зоны — 0.1 мг/м^3 , максимальная разовая ПДК озона в атмосферном воздухе — 0.16 мг/м^3 , средняя суточная ПДК озона в атмосферном воздухе — 0.03 мг/м^3 . Характерный запах озона органолептически начинает ощущаться уже при концентрациях $0.004\text{--}0.015 \text{ мг/м}^3$. Отрицательное влияние озона на растительность является установленным фактом. Увеличение концентрации озона может оказывать как прямое, так и косвенное воздействие на наземные растения. Пороговые концентрации озона для растительности: 0.04 мг/м^3 при 28-часовой экспозиции, 0.059 мг/м^3 при 4-часовой экспозиции и 0.4 мг/м^3 при 1-часовой экспозиции. Такие дозы озона приводят к гибели листы. В случае значительного поражения растительной площади листы и уменьшения вследствие этого поверхности ассимиляции возможна гибель растения. При воздействии озона на разные виды животных общим является раздражение слизистых оболочек, слезотечение, поражение ткани лёгких. Кроме отрицательного влияния на функцию лёгких могут происходить биохимические изменения на клеточном уровне. Токсические действия озона на человека проявляются воздействием на дыхательную и сердечно-сосудистую системы. Клинические и эпидемиологические исследования демонстрируют зависимость между увеличением приземных концентраций озона и частотой бронхолегочных и сердечно-сосудистых заболеваний [5].

В последние десятилетия скорость роста концентрации тропосферного озона в среднем по планете составляет примерно 1–2% в год [6]. Данная тенденция, в совокупности с указанными выше воздействиями O_3 на техносферу, становится

существенным вызовом в XXI в. [7] и формирует новое научно-практическое направление в обеспечении техносферной безопасности, связанное с природным и техногенным озоном. Для его успешного развития необходимы экспериментально обоснованные реперные (опорные, исходные) значения концентраций тропосферного озона для исследуемых территорий.

Целью данной работы является выявление реперных значений концентрации тропосферного озона над территорией города Москвы.

Исследование должно охватывать все климатические сезоны 2022 г. (годовые исследования) для последующих сравнительных наблюдений, изучения воздействия озона на технобиосферу мегаполиса, разработки организационных и санитарно-гигиенических мероприятий.

Методом исследования является статистическая оценка, для которой используется база данных Государственного природоохранного бюджетного учреждения (ГПБУ) «Мосэкомониторинг», осуществляющего квалифицированное регулярное наблюдение за состоянием атмосферного воздуха над территорией города. Статистическая оценка в выявлении реперных значений концентрации тропосферного озона, в отличие от моделирования химического состава атмосферы мегаполиса (COSMO-ART), по мнению авторов, позволяет учесть многофакторность процессов образования и разложения O_3 , трехмерный механизм трансформации кислород–озон и др.

В данной работе также была проведена оценка достоверности ранее выявленных зависимостей.

Экспериментальная часть

Показатели состояния атмосферного воздуха в базе данных ГПБУ «Мосэкомониторинг» представлены как данные автоматических измерительных станций и усреднённые по территории города

концентрации загрязняющих веществ. В таблицу 1 внесены типовые показания измерительных станций, характерные для каждого месяца 2022 г. Минимальные концентрации озона наиболее часто отмечались в Кожуховском проезде, максимальные — в МГУ, Туристской и Полярной улицах. Различие концентраций O_3 в мегаполисе авторы связывают, прежде всего, с антропогенными факторами воздействия на технобиосферу. Представленные в таблице 1 данные измерительных станций свидетельствуют о существенном и постоянном различии концентраций O_3 над территорией мегаполиса и детерминируют использование для определения реперных значений усреднённые по территории города часовые концентрации тропосферного озона (представленные в базе данных ГПБУ «Мосэкомониторинг» в виде ежедневного графика). Среднегодовые результаты O_3 $C_{ср} = 0.0376$ $мг/м^3$ (1.25 ПДКсс), усредненные по территории города, целесообразно использовать в качестве реперных значений показателей концентрации тропосферного озона над территорией города Москвы за 2022 г. При этом следует учитывать сезонность концентраций тропосферного озона. В весенне-летний период среднемесячная концентрация O_3 $C_{ср} = 0.0509$ $мг/м^3$ (1.69 ПДКсс), в осенне-зимний период $C_{ср} = 0.242$ $мг/м^3$ (0.81 ПДКсс). Исследования характера ежедневных часовых графиков концентраций озона, усредненных по территории города, позволили предположить, что на реперные значения оказывают влияние: миграция стратосферного озона через тропопаузу, тропосферные потоки озона московского региона, фотохимические реакции образования озона из его предшественников. При этом необходимо учитывать, что мощности стратосферного и фотохимического источников озона в тропосфере примерно равны [8].

Таблица 1 — Данные измерительных станций для различных дней и месяцев.

03.01, 11.00, –08.0 °С, облачно с прояснениями, УФ-0 низкий, магнитное поле спокойное. ОЗ МГУ — 0.110 ПДКмр, Туристская — 0.106 ПДКмр, Останкино — 0.064 ПДКмр., Полярная — 0.076 ПДКмр, Кожухово — 0.223 ПДКмр, Лосиный остров — 0.325 ПДКмр.
02.02, 24.00, –06.0 °С, небольшой снег, УФ-1 низкий, магнитное поле возмущенное. Оз МГУ — 0.208 ПДКмр, Туристская — 0.107 ПДКмр Останкино — 0.042 ПДКмр, Полярная — 0.044 ПДКмр, Кожухово — нет ПДКмр Лосиный остров — 0.008 ПДКмр.
17.03, 12.00, –01.0 °С, УФ-2 низкий, магнитное поле спокойное. Оз МГУ — 0.289 ПДКмр, Туристская — 0.448 ПДКмр, Останкино — 0.453 ПДКмр, Полярная — 0.237 ПДКмр, Кожухово — 0.302 ПДКмр, Лосиный остров — 0.556 ПДКмр.
10.04, 11.30, 07.0 °С, УФ-2 низкий, магнитное поле спокойное. Оз МГУ — нет ПДК мр, Туристская — 0.611 ПДК мр, Останкино — 0.259 ПДК мр, По- лярная — 0.285 ПДК мр, Кожухово — 0.104 ПДК мр, Лосиный остров — 0.275 ПДК м.р.
27.05, 12.00, 12.0 °С, УФ-2 низкий, магнитное поле спокойное. Оз МГУ — 0.387 ПДКмр, Туристская — 0.583 ПДКмр, Останкино — 0.439 ПДКмр, Полярная — нет ПДКмр, Кожухово — 0.215 ПДКмр, Лосиный остров — 0.287 ПДКмр.
02.06, 10.00, 21.0 °С УФ-2 низкий, магнитное поле спокойное. Оз МГУ — 0.329 ПДКмр, Туристская — 0.440 ПДКмр, Останкино — 0.415 ПДКмр, Полярная — нет ПДКмр, Кожухово — нет ПДКмр, Лосиный остров — 0.273 ПДКмр.
15.07, 21.00, 19.0 °С, УФ-6 высокий, магнитное поле спокойное. Оз МГУ — 0.249 ПДКмр, Туристская — нет ПДКмр, Останкино — нет ПДКмр., Полярная — 0.360 ПДКмр, Кожухово — 0.152 ПДКмр, Лосиный остров — 0.258 ПДКмр.
15.08, 14.00, 29.0 °С, УФ-4 средний, магнитное поле слабо возмущенное. Оз МГУ — 0.551 ПДКмр, Туристская — 0.590 ПДКмр, Останкино — 0.594 ПДКмр, Полярная — 0.556 ПДКмр, Кожухово — 0.348 ПДКмр, Лосиный остров — нет ПДКмр, Кожуховский проезд — 0.298 ПДКмр.
18.09, 20.30, 13.0 °С УФ-2 низкий, магнитное поле возмущенное. Оз МГУ — 0.036 ПДК мр, Туристская — 0.142 ПДКмр Останкино — 0.132 ПДКмр, Полярная — 0.145 ПДКмр, Кожухово — 0.131 ПДКмр, Лосиный остров — нет ПДКмр, Кожуховский проезд — 0.064 ПДКмр.
30.10, 12.00, 08.0 °С, УФ-1 низкий, магнитное поле неустойчивое. ОЗ МГУ — 0.200 ПДКмр, Туристская — 0.399 ПДКмр, Останкино — 0.429 ПДКмр, Полярная — 0.401 ПДКмр, Кожухово — 0.308 ПДКмр, Лосиный остров — нет ПДКмр, Кожуховский проезд — 0.229 ПДКмр.
19.11, 13.00, –4.0 °С, УФ-0 низкий, магнитное поле спокойное. МГУ — 0.103 ПДКмр, Туристская — 0.068 ПДКмр, Останкино — 0.056 ПДКмр, Полярная — 0.071 ПДКмр, Кожухово — 0.050 ПДКмр, Лосиный остров — 0.046 ПДКмр, Кожуховский проезд — 0.036 ПДКмр.
17.12, 13.00, –4.0 °С, УФ-0 низкий, магнитное поле спокойное. ОЗ МГУ — 0.055 ПДКмр, Туристская — 0.064 ПДКмр, Останкино — 0.142 ПДКмр, Полярная — 0.103 ПДКмр, Кожухово — 0.125 ПДКмр, Лосиный остров — 0.162 ПДКмр, Кожуховский проезд — 0.039 ПДКмр.

Таблица 2 — Средние значения усредненных по территории города часовых концентрации тропосферного озона для различных месяцев 2022 г. (мг/м³)

Месяц	Среднемесячное значение, мг/м ³	Максимальное месячное значение, мг/м ³	Минимальное месячное значение, мг/м ³
январь	0.0306	0.0758	0.0022
февраль	0.0422	0.0793	0.0021
март	0.0507	0.0950	0.0041
апрель	0.0594	0.1060	0.0031
май	0.0585	0.1129	0.0066
июнь	0.0461	0.1267	0.0022
июль	0.0442	0.1170	0.0027
август	0.0469	0.1396	0.0025
сентябрь	0.0207	0.0606	0.0030
октябрь	0.0191	0.0624	0.0028
ноябрь	0.0173	0.0623	0.0014
декабрь	0.0155	0.0522	0.0014
Среднегодовые результаты	0.0376 (1.25 ПДК _{сс})	0.1396 (4.65 ПДК _{сс})	0.0013 (0.04 ПДК _{сс})

Таблица 3 — Превышение среднемесячных концентраций, усредненных по территории города

Дата	Время	Средние концентрации, мг/м ³
02.07	08.00 — 20.00	С _{ср} = 0.0862 (2.87 ПДК _{сс})
06.08	08.00 — 20.00	С _{ср} =0.0933 (3.1 ПДК _{сс})
14.11	08.00 — 20.00	С _{ср} =0.0486 (1.62 ПДК _{сс})
27.12	00.00 — 09.00	С _{ср} =0.0435 (1.45 ПДК _{сс})

В весенне-летний период доминируют мощности фотохимических источников, в осенне-зимний период доминируют мощности стратосферных источников.

В исследуемый период фиксировались кратковременные существенные превышения среднемесячных концентраций О₃, способных оказывать негативное воздействие на живое вещество (таблица 3).

Это явление может быть связано с тропосферными потоками озона в московском регионе.

Проведённые сравнения усреднённых по территории города концентраций тропосферного озона в жилых районах и вблизи автотрасс представлены в таблице 4.

Усреднённые по территории города концентрации озона в жилых районах практически всегда существенно превышали концентрации вблизи автотрасс, что позволяет предположить влияние автотранспортного загрязнения городского воздуха на концентрацию тропосферного О₃. Превышение озона вблизи автотрасс над концентрациями в жилых районах зафиксировано 08.11. Сопоставимые концентрации отмечались 19.07 и 20.07. Корреляция усреднённых по территории города приоритетных загрязняющих веществ показала, что наибольшее влияние на О₃ оказывают NO₂ и PM10 (обратная зависимость).

Таблица 4 — Максимальные усреднённые по территории города концентрации озона в жилых районах и вблизи автотрасс

Дата	Максимальные усреднённые по территории города концентрации озона в жилых районах, мг/м ³	Максимальные усреднённые по территории города концентрации озона вблизи автотрасс, мг/м ³
10.01	0.0353	0.0118
17.02	0.0758	0.0441
27.03	0.0822	0.0578
18.04	0.0956	0.0469
15.05	0.0790	0.0500
09.06	0.1267	0.0854
20.07	0.0495	0.0429
06.08	0.0394	0.0193
22.09	0.0291	0.0106
04.10	0.0411	0.0289
08.11	0.0076	0.0142
17.12	0.0185	0.0102

Таблица 5 — Максимальные усреднённые по территории города концентрации озона в жилых районах в светлый и тёмный период суток

Дата	Максимальные усреднённые по территории города концентрации озона в жилых районах в светлый период суток, мг/м ³	Максимальные усреднённые по территории города концентрации озона в жилых районах в тёмный период суток, мг/м ³
07.01	0.0520	0.0573
08.01	0.0524	0.0520
10.02	0.0405	0.0626
11.02	0.0581	0.0724
25.12	0.0472	0.0503
26.12	0.0222	0.0514

Другие газы и атмосферные загрязнения, представленные в базе данных ГПБУ «Мосэкомониторинг» (CO , SO_2 , CH_4 , H_2S , NH_3 , NO , $\text{PM}_{2,5}$, C_6H_6 , C_{10}H_8 , C_8H_8 , C_7H_8 , $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$, CH_2O), влияние на концентрацию озона практически не оказывают.

В проводимых ранее работах [9] отмечалась сопоставимость наибольших значений тропосферного озона в светлый и темный период суток. В данных исследованиях подобная сопоставимость и превышение концентраций в темный период суток над светлым неоднократно отмечалась в зимний период.

Полученные значения позволяют предположить отсутствие влияния фотохимических реакций образования озона в зимний сезон (небольшой светлый период, низкий УФ) и доминирование стратосферных источников.

Обсуждение и анализ полученных результатов

Полученные результаты за 2022 г. позволили экспериментально установить реперные значения концентраций тропосферного озона над территорией города Москвы (крупнейшего северного мегаполиса мира), которые целесообразно использовать для оценки локальных и планетарных изменений в атмосферном воздухе и прогноза его комплексного воздействия на технобиосферу. Сопоставление с ранее выявленными зависимостями позволяет предположить, что O_3 является трансформируемым атмосферным газом. Концентрации определяются одновременно протекающими физико-химическими реакциями его образования и разложения, миграцией из стратосферы и в тропосфере, фотохимическими реакциями образования из «предшественников».

Заключение

1. Тропосферный озон в силу своих физико-химических свойств негативно воздействует на технобиосферу, и его

концентрации должны непрерывно контролироваться.

2. Концентрация тропосферного озона формируется миграцией O_3 из стратосферы и в тропосфере, фотохимическими реакциями образования из «предшественников».

3. Локальные концентрации тропосферного озона над урбанизированными территориями постоянно и существенно различаются.

4. Для оценки изменений концентрации тропосферного озона целесообразно использовать реперные значения — среднегодовые или среднемесячные сезонные концентрации O_3 , усредненные по территории.

5. Реперным значением на территории города Москвы может стать среднегодовая за 2022 г. концентрация озона, усредненная по территории города и равная 0.0376 мг/м^3 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Вернадский В. И. Биосфера и ноосфера. Москва, Издательство АСТ, 2022, 640 с.
- [2]. Изменение климата, 2007 г.: Обобщающий доклад. МГЭИК. Женева, Швейцария, 2008, 104 с.
- [3]. Некрасов Б. В. Н48 Основы общей химии. В 2 томах. Т. 1, 4-е изд., стер.-СПб., Издательство «Лань», 2003, 656 с.
- [4]. ГОСТ 12.1.007-76. «Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности».
- [5]. Котельников С. Н. Основные механизмы взаимодействия озона с живыми системами и особенности приземного озона для России. РАН *Труды института общей физики им. А. М. Прохорова*, т. 71, 2015, с. 10–38.

[6]. Laurence Y. Yeung, Lee T. Murray, Patricia Martinerie et al. Isotopic constraint on the twentieth century increase in tropospheric ozone. *Nature*, 2019, vol. 570, pp. 224–227.

DOI: 10.1038/s41586-019-1277-1

[7]. Ларин И. К. История озона. М., РАН, 2022, 478 с.

[8]. Куколева А. А. Стратосферный источник тропосферного озона и его связь с динамикой атмосферы: дис. на соиск.

учен. степ. канд. физ.-мат. наук: 25.00.29. Физика атмосферы и гидросферы.г. Долгопрудный, 2003, 136 с.

[9]. Систер В. Г., Цедилин А. Н., Василенко А. П. Вопросы экологической безопасности тропосферного воздуха в мегаполисе. *Современные проблемы науки и образования*, 2017, № 6, с. 269.

Цедилин Андрей Николаевич — канд. техн. наук, Московский политехнический университет (Российская Федерация, 107023, Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38).

Макаренков Дмитрий Анатольевич — д-р техн. наук, заместитель директора по науке, НИЦ «Курчатовский институт» Курчатовский комплекс химических исследований (ИРЕА) (Российская Федерация, 107076, Москва, ул. Богородский Вал, д. 3), доцент кафедры «Процессы и аппараты химических технологий», Московский политехнический университет (Российская Федерация, 107023, Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38).

Нартов Александр Сергеевич — канд. геогр. наук, доцент кафедры Геоэкологии и природопользования, Государственный университет по землеустройству (Российская Федерация, 105064, Москва, ул. Казакова, д. 15).

Analysis of the results of monitoring tropospheric ozone in Moscow

A. N. Tsedilin^{*}, D. A. Makarenkov^{*,**,1}, A. S. Nartov^{***}

^{*}*Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia*

^{**}*National Research Center "Kurchatov Institute" — IREA, Moscow, Russia*

^{***}*State University of Land Use Planning, Moscow, Russia*

Abstract

The article describes the negative impact of tropospheric ozone on the technobiosphere. It is noted that in recent decades, the growth rate of tropospheric ozone concentration has averaged 1–2% per year and it is necessary to form a new scientific and practical direction in ensuring technosphere safety related to natural and technogenic ozone. For its successful development, experimentally substantiated reference values of tropospheric ozone concentrations for the study areas are required. It has been shown that for an urbanized region it is advisable to use O₃ concentrations averaged over time and over the territory. The average annual ozone concentration for 2022 obtained by the method of static assessment of the results of the database of the State Budgetary Institution "Mosecomonitoring" for 2022, averaged over the city territory and equal to 0.0376 mg/m³, can become a reference value in the territory of Moscow.

Keywords

Tropospheric ozone, technobiosphere, greenhouse effect, ozone resistance, toxicity, statistical assessment, reference values.

REFERENCES

- [1]. Vernadskiy V. I. Biosfera i noosfera [Biosphere and noosphere]. Moscow, AST Publ, 2022, 640 p. (In Russ.)
- [2]. Izmeneniye klimata, 2007: Obobshchayushchiy doklad [Climate Change 2007: Synthesis Report]. MGEIK. Zheneva, Shveytsariya, 2008, 104 p. (In Russ.)
- [3]. Nekrasov B. V. N 48 Osnovy obshchey khimii. [Fundamentals of general chemistry], vol. 1, SPb., «Lan'» Publ., 2003, 656 p. (In Russ.)
- [4]. GOST 12.1.007-76. «Sistema standartov bezopasnosti truda. Vrednyye veshchestva. Klassifikatsiya i obshchiye trebovaniya bezopasnosti» [System of occupational safety standards. Harmful substances. Classification and general safety requirements]. (In Russ.)
- [5]. Kotelnikov S. N. Osnovnyye mekhanizmy vzaimodeystviya ozona s zhivymi sistemami i osobennosti prizem-nogo ozona dlya Rossii [Basic mechanisms of interaction of ozone with living systems and features of ground-level ozone for Russia]. RAN Trudy instituta obshchey fiziki im. A. M. Prokhorova [Proceedings of the Institute of General Physics named after A. M. Prokhorova], vol. 71, 2015, pp. 10–38. (In Russ.)

¹ Corresponding author:

Email: makarenkovd@mail.ru

[6]. Laurence Y. Yeung, Lee T. Murray, Patricia Martinerie et al. Isotopic constraint on the twentieth century increase in tropospheric ozone. *Nature*, 2019, vol. 570, pp. 224–227.

DOI: 10.1038/s41586-019-1277-1

[7]. Larin I. K. Istoriya ozona [History of ozone]. M., RAN, 2022, 478 p.

[8]. Kukoleva A. A. Stratosfernyy istochnik troposfernogo ozona i yego svyaz' s dinamikoy atmosfery [Stratospheric source of tropospheric ozone and its connection with

atmospheric dynamics], PhD thesis, Dolgoprudnyy, 2003, 136 p. (In Russ.)

[9]. Sister V. G., Tsedilin A. N., Vasilenko A. P. Voprosy ekologicheskoy bezopasnosti troposfernogo vozdukh v megalopole [Issues of environmental safety of tropospheric air in a megalopolis]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2017, № 6, p. 269. (In Russ.)

Tsedilin A. N. — Cand. Sc. (Eng.), Moscow Polytechnic University (B. Semenovskaya st., 38, Moscow, 107023, Russian Federation).

Makarenkov D. A. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Deputy Director for Science, NRC "Kurchatov Institute" — IREA (Bogorodsky Val., 3, Moscow, 107076, Russian Federation), Assoc. Professor, Department «Processes and Apparatus of Chemical Technologies», Moscow Polytechnic University (B. Semenovskaya st., 38, Moscow, 107023, Russian Federation).

Nartov A. S. — Cand. Sc. (Geog.), Assoc. Professor, Department of Geoecology and Environmental Management, State University of Land Use Planning (Kazakova st., 15, 105064, Moscow, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Анализ результатов мониторинга тропосферного озона в городе Москве / А. Н. Цедилин, Д. А. Макаренков, А. С. Нартов // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 3(10). С. 32 – 41.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-32-41

Please cite this article as:

Tsedilin A. N., Makarenkov D. A., Nartov A. S. Analysis of the results of monitoring tropospheric ozone in Moscow. *Industrial processes and Technologies*, 2023, vol. 3, no. 3(10), pp. 32 – 41.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-32-41

Разработка метода измерений поперечника крученой хлопчатобумажной пряжи

Ю. С. Шустов^{*,1}, Т. В. Зиновьев^{**}, В. П. Зиновьев^{**}

**Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия*

***Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный
медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна, Москва, Россия*

Аннотация

В работе проведена классификация методов оценки распределения волокон в поперечном сечении пряжи. Однако кручёная пряжа отличается от одиночной и по структуре, и по внешнему виду, поэтому метод измерения диаметра кручёной пряжи имеет некоторые особенности, связанные с отличием её от одиночной. В этой связи появилась необходимость разработки более корректного метода определения объёмной плотности и диаметра кручёного продукта.

В работе предложен метод измерения диаметра крученой пряжи, который отличается от поперечного сечения одиночной пряжи. Приведены конкретные результаты расчета объёмной плотности крученой пряжи с помощью прикладного пакета Mathcad с учетом угла наклона составляющих стренг.

Ключевые слова

Пряжа хлопчатобумажная крученая, стренги, объёмная плотность, поперечник, прикладной пакет.

Введение

Исследование большого числа поперечных срезов дает возможность установить физическое расположение волокон различных компонентов в пряже, полученной различными способами прядения. Эффективность перемешивания разнородных волокон в каждом сечении пряжи оценивается различными способами. Классификация методов оценки распределения волокон подробно рассмотрена в работе И. Г. Рашкована [1]. Все имеющиеся

методы условно можно разбить на четыре группы.

Первая группа — методы, которые дают количественную оценку распределения волокон в радиальном направлении поперечного сечения пряжи. К ним относятся методы И. Гамильтона [2], Ф. Маилларда [3], Л. Рудольфа [4], Е. Киршнера [5], Н. И. Ратиани [6], А. Г. Севостьянова [7].

Вторая группа — методы, которые дают количественную оценку секториального распределения волокон в поперечном

¹ Для переписки:

Email: shustov-yus@rguk.ru

сечении пряжи. К ним относятся методы М. И. Коплана и М. Г. Блоха [8], В. Г. Клейна [9], А. Г. Севостьянова [7].

Третья группа — методы, которые дают количественную оценку распределения смешанных волокон вдоль пряжи. К ним относятся методы П. И. Аристова [10], М. И. Коплана и В. Г. Клейна [9], А. Г. Севостьянова [7].

Четвертая группа — методы, в которых перемешивание исследуется посредством оценки величины и числа групп волокон разнородных компонентов. К ним относятся методы Е. Киршнера [5], М. И. Коплана и В. Г. Клейна [9], М. В. Эммануэля [11].

Результаты исследований и их обсуждение

Метод измерения поперечника (диаметра) кручёной пряжи в основном повторяет метод измерения поперечника одиночной пряжи. Однако, кручёная пряжа отличается от одиночной и по структуре, и по внешнему виду, поэтому метод измерения диаметра кручёной пряжи имеет некоторые особенности, связанные с отличием её от одиночной в структурном смысле.

Структурные особенности хорошо видны на рисунке 1, где показаны поперечные сечения кручёной пряжи с различным числом сложений.

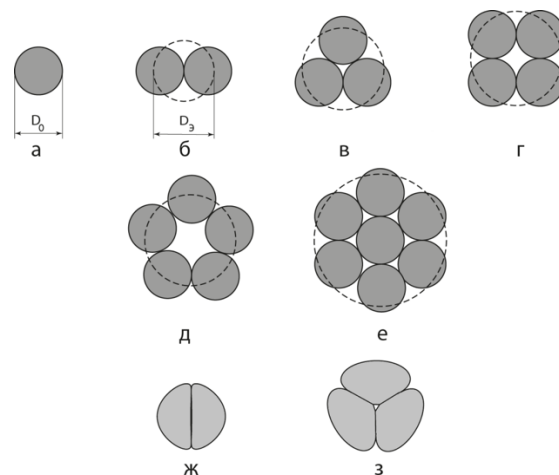
Пунктирная линия показывает так называемый эквивалентный диаметр, который получается, если вести расчёты по формуле (1), зная суммарную линейную плотность кручёного продукта и его объёмную плотность:

$$d = 0.0357T,$$

где T — линейная плотность пучка; γ — объёмная плотность пучка.

Как видно из рисунка 1, только сечения кручёной пряжи «ж» и «з» достаточно точно соответствуют понятию круглого сечения. Все остальные случаи не имеют

ничего общего с расчётными значениями эквивалентного диаметра.



а — сечение одиночной пряжи; б — сечение пряжи с креповой круткой в два сложения; в — сечение пряжи с креповой круткой в 3 сложения; г, д, е — сечение пряжи с креповой круткой в 4, 5, 7 сложений с трубчатой и стержневой структурой; ж, з — сечения пряжи с круткой малой и средней интенсивности в 2 и 3 сложения.

Рисунок 1 — Структура кручёной пряжи с различным числом сложений

Однако, справедливости ради нужно отметить, что случаи «б, в, г, д, е» имеют место только при очень высокой степени скрученности продукта, когда объёмная плотность близка к своему предельно максимальному значению и жёсткость пряжи не даёт возможность её деформировать в поперечном направлении при скручивании. Кроме того, структуры «г» и «д» являются неустойчивыми, так как пустота в середине в процессе скручивания стренг иногда заполняется одной из составляющих, что приводит к «штопорности» из-за неодинаковости натяжения составляющих и, как следствие, нерегулярности структуры.

Исходя из анализа рисунков 1ж и 1з, для корректного определения объёмной плотности кручёной пряжи нельзя использовать структурную модель, изображённую на рисунке 1б, так как это лишь частный случай возможной структуры

кручёной пряжи. В этой связи появилась необходимость разработки более корректного метода определения объёмной плотности и диаметра кручёного продукта.

Поскольку поперечное сечение одиночной составляющей в реальной кручёной пряже больше напоминает эллипс, то для определения объёмной плотности продукта в целом достаточно определить объёмную плотность одиночки в составе кручёного продукта.

Для осуществления поставленной задачи измерения проводились в соответствии с рисунком 2.

Здесь отрезок прямой АВ лежит в плоскости сечения кручёной пряжи, но нас в этом месте интересует сечение одиночной пряжи. В плоскости сечения одиночки лежит отрезок DE, который является большой осью эллиптического сечения одиночной пряжи. Рассуждая аналогичным образом, отрезок KL — это две малых оси эллипса. Зная величину большого и малого эллипса, легко можно определить его площадь, а далее, исходя из линейной плотности одиночки, рассчитать её объёмную

плотность. Также нужно отметить, что отрезок АВ соединяет две точки в наиболее узком месте проекции кручёной пряжи, а отрезок FG — наиболее широкий. Точка С — это середина отрезка АВ.

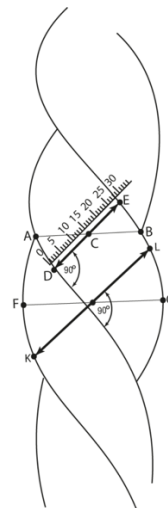


Рисунок 2 — Схема измерения большой и малой осей эллиптического сечения кручёной пряжи

Пример расчёта объёмной плотности кручёной пряжи с помощью математического прикладного пакета Mathcad приведён ниже на рисунках 3 и 4.

Результаты измерения геометрических характеристик кручёной Х/Б пряжи 14,45 текс х 2

$$\begin{array}{l}
 \text{DL} - \text{большая ось эллипса} \quad \text{DS} - \text{малая ось эллипса} \\
 K_2 = 720 \quad \frac{\text{КР}}{\text{М}} \quad - \text{Вторичная крутка} \\
 \text{DL38} := \begin{pmatrix} 23 & 24 & 17 & 24 & 16 & 23 & 15 \\ 17 & 24 & 25 & 24 & 25 & 21 & 21 \\ 15 & 22 & 15 & 22 & 24 & 21 & 20 \\ 24 & 17 & 14 & 25 & 21 & 14 & 16 \\ 23 & 23 & 22 & 23 & 23 & 22 & 22 \\ 21 & 22 & 23 & 25 & 23 & 24 & 17 \\ 14 & 20 & 15 & 26 & 15 & 24 & 15 \\ 23 & 15 & 23 & 21 & 22 & 20 & 23 \\ 22 & 17 & 24 & 20 & 25 & 16 & 24 \\ 21 & 22 & 24 & 25 & 24 & 25 & 23 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} - \text{Массив индивидуальных измерений большой оси} \\ \text{эллипсного сечения кручёной пряжи при коэффициенте} \\ \text{вторичной крутки, равной 38,7} \end{array} \\
 \text{В обозначении переменной массива DL38:} \\
 \text{D} - \text{диаметр} \\
 \text{L} - \text{large (большой)} \\
 38 - \text{коэффициент вторичной крутки} \\
 \frac{\sigma_{\Sigma}}{\Sigma} = 0.01 \cdot K_2 \cdot \sqrt{T_{\Sigma}} = 38.706 \quad - \text{Коэффициент крутки кручёной пряжи} \\
 \frac{\sigma_{\Sigma}}{\Sigma} = 0.00823 \quad - \text{Масштаб } \sigma \text{ мм/деление} \\
 \text{mean(DL38)} = 21 \quad - \text{Среднее значение массива DL38, где число наблюдений (измерений) равно 80} \\
 \text{Stdev(DL38)} = 3.53 \quad - \text{Стандартное отклонение (в делениях окуляра)} \\
 D_{L38} = \text{mean(DL38)} \cdot \sigma = 0.173 \quad \text{мм} \quad - \text{Большая ось эллипса} \\
 \varepsilon_{\Sigma} = 2 \cdot \frac{\text{Stdev(DL38)} \cdot \sigma \cdot 100}{\sqrt{80}} = 0.65 \% \quad - \text{Относительная погрешность измерений} \\
 \text{поперечника в мм}
 \end{array}$$

Рисунок 3 — Пример расчёта объёмной плотности и диаметра кручёной пряжи 14,45 текс х 2 (начало)

$$DS_{2_38} = \begin{pmatrix} 27 & 33 & 27 & 30 & 34 & 30 & 32 \\ 32 & 31 & 30 & 29 & 32 & 26 & 27 \\ 33 & 27 & 33 & 31 & 29 & 25 & 30 \\ 29 & 25 & 30 & 33 & 29 & 29 & 33 \\ 31 & 33 & 31 & 28 & 30 & 27 & 29 \\ 35 & 29 & 29 & 30 & 31 & 27 & 34 \\ 30 & 30 & 33 & 33 & 31 & 26 & 32 \\ 32 & 30 & 30 & 30 & 32 & 34 & 30 \\ 27 & 33 & 30 & 35 & 29 & 33 & 32 \\ 32 & 30 & 29 & 32 & 30 & 29 & 30 \end{pmatrix}$$

- Массив индивидуальных измерений малой оси эллипсного сечения кручёной пряжи при коэффициенте вторичной крутки, равной 38,7

В обозначении переменной массива DS_2_38:

D - диаметр
S - small (малый)
38 - коэффициент вторичной крутки
2 - удвоенное значение величины малой оси

$$Sc_{\text{www}} = 0.00823 \quad \text{- Масштаб Sc мм/деление}$$

$$\text{mean}(DS_{2_38}) = 30.343 \quad \text{- Среднее значение массива DS_2_38, где число наблюдений (измерений) равно 80}$$

$$\text{Stdev}(DS_{2_38}) = 2.352 \quad \text{- Стандартное отклонение (в делениях окуляра)}$$

$$D_{S_{2_38}} = \text{mean}(DS_{2_38}) \cdot Sc \cdot 0.5 = 0.125 \quad \text{мм} \quad \text{- Малая ось эллипса. Число 0,5 в выражении - это деление на 2}$$

$$\varepsilon_{\text{www}} = 2 \cdot \frac{\text{Stdev}(DS_{2_38}) \cdot Sc \cdot 100}{\sqrt{80}} = 0.433 \quad \% \quad \text{- Относительная погрешность измерений поперечника в мм}$$

Большая ось: $D_{L38} = 0.173 \quad \text{мм}$

Малая ось: $D_{S_{2_38}} = 0.125 \quad \text{мм}$

$$\gamma_{38} = \frac{0.00127 \cdot T_{\text{пр}} \cdot 1}{D_{L38} \cdot D_{S_{2_38}}} = 0.8504 \quad \frac{\text{мг}}{\text{мм}^3} \quad \text{- Объёмная плотность кручёной пряжи (объёмная плотность одиночек в составе кручёной)}$$

$$DTwist_{38\text{equivalent}} = 0.0356 \cdot \sqrt{\frac{T_{\Sigma}}{\gamma_{38}}} = 0.208 \quad \text{мм} \quad \text{- Эквивалентный диаметр кручёной пряжи}$$

Рисунок 4 — Пример расчёта объёмной плотности и диаметра кручёной пряжи 14.45 текс × 2 (продолжение)

Выводы

1. Разработан метод определения объёмной плотности и диаметра кручёной Х/Б пряжи.
2. Учтены особенности поперечной деформации кручёной пряжи с целью более корректного определения её диаметра и объёмной плотности.
3. Учтён угол наклона составляющих стренг при расчёте площади их поперечного сечения в составе кручёного продукта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Рашкован И. Г. Методы оценки распределения волокон по перечным сечениям пряжи. М., Легкая индустрия, 1977, 200 с.
- [2]. Hamilton J. B. The radial distribution of fibres in biended Yarn. *Journal of*

the Textile Institute, vol. 49, 1958, №9, pp. 411-433.

[3]. Maillard E. Untersuchungen an Polyamid. *Woll-Mischungen. Chemiefasern* 1961, №12b, pp. 818-826.

[4]. Rudolph L. Untersuchungen uber die Fasergruppierung im Gespinstquerschnitt bei einigen Fasermischungen. *Textil und Faserstofftechnik*, № 5, 1955, pp. 293-300.

[5]. Kirschner E. Das Verhalten der eingemisten Fasern wahrend der Verarbeitung, *Melliand Textilberichte*, 1963, № 1, pp. 22-27

[6]. Ратиани Н. Н. Исследование методов изучения структурной неровноты пряжи. Дисс...к.т.н. 1965

[7]. Севостьянов А. Г. Методы исследования неровноты продуктов прядения. М.: Ростехиздат, 1961.

[8]. Coplan M. I., Bloch M. G. A study of Blendet Woolen Struetures Part 11 *Textile Research journal*, 1955, vol. XXV, № 11.

[9]. Coplan M. J. and William G. A Study of Blended Woolen. Structures. *Textile Research journal*, 1955, vol. XXV, № 9.

[10]. Аристов П. И. Об изменении системы приготовления ленты и ровницы

при производстве меланжевой пряжи. *Труды ИВНИТИ*. Т. XXIV, 1960.

[11]. Эммануэль М. В. Оценка качества перемешивания волокон разных компонентов на основе анализа срезов ровницы и пряжи. *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*, 1962, №3, с.64-74.

Шустов Юрий Степанович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения и товарной экспертизы, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Зиновьев Тимофей Викторович — научный сотрудник, Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна (Российская Федерация, 123098, Москва, ул. Маршала Новикова, д. 23).

Зиновьев Виктор Павлович — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна (Российская Федерация, 123098, Москва, ул. Маршала Новикова, д. 23).

Development of a method for measurement of the cross-dimension of twisted cotton yarn

Yu. S. Shustov^{*,1}, T. V. Zinoviev^{**}, V. P. Zinoviev^{**}

**The Kosygin State University of Russia, Moscow, Russia*

***State Scientific Center of the Russian Federation — Federal Medical Biophysical Center named after A. I. Burnazyan, Moscow, Russia*

Abstract

The work provides a classification of methods for assessing the distribution of fibers in the cross section of yarn. However, twisted yarn differs from single yarn both in structure and appearance, therefore the method of measuring the diameter of twisted yarn has some features associated precisely with its difference from single yarn. In this regard, there was a need to develop a more correct method for determining the bulk density and diameter of the twisted product.

This paper proposes a method for measuring the diameter of twisted yarn, which is different from the cross-section of a single yarn. Specific results are presented for calculating the bulk density of twisted yarn using the Mathcad application package, taking into account the angle of inclination of the components of the strands.

Keywords

Twisted cotton yarn, strands, bulk density, diameter, application package.

REFERENCES

- [1]. Rashkovan I. G. Metody otsenki raspredeleniya volokon po perechnym secheniyam pryazhi [Methods for assessing fiber distribution across yarn cross sections]. Moscow: Legkaya industriya Publ., 1977, 200 p. (In Russ.)
- [2]. Hamilton J. B. The radial distribution of fibres in biended Yarn, «Journal of the Textile Institute», vol. 49, 1958, №9, pp. 411–433.
- [3]. Maillard E. Untersuchungen an Polyamid / Woll-Mischungen, «Chemiefasern» №12b 1961, pp. 818–826.
- [4]. Rudolph L. Untersuchungen uber die Fasergruppierung im Gespinstquerschnitt bei einigen Fasermischungen «Textil und Faserstofftechnik», № 5, 1955, pp. 293–300.
- [5]. Kirschner E. Das Verhalten der eingemisten Fasern wahrend der Verarbeitung, *Melliand Textilberichte*, 1963, № 1, pp. 22–27.
- [6]. Ratiani N. N. Issledovaniye metodov izucheniya strukturnoy nerovnoty pryazhi [Research on methods for studying the structural unevenness of yarn]. PhD thesis, 1965. (In Russ.)

¹ Corresponding author:

Email: shustov-yus@rguk.ru

[7]. Sevostyanov A. G. Metody issledovaniya nerovnoty produktov pryadeniya [Methods for studying the unevenness of spinning products]. Moscow, Rostekhizdat Publ., 1961. (In Russ.)

[8]. Coplan M. I., Bloch M. G. A study of Blendet Woolen Structures Part 11 *Textile Research journal*, 1955, vol. XXV, №11.

[9]. Coplan M. J. and William G. A Study of Blended Woolen Structures. *Textile Research journal*, 1955, vol. XXV, № 9.

[10]. Aristov P.I. On changing the system for preparing sliver and roving in the production of melange yarn [Ob izmenenii

sistemy prigotovleniya lenty i rovnitsy pri proizvodstve melanzhevoy pryazhi]. *Proceedings of IvNITI*, vol. XXIV, 1960. (In Russ.)

[11]. Emmanuel M. V. Otsenka kachestva peremeshivaniya volokon raznykh komponentov na osnove analiza srezov rovnitsy i pryazhi [Assessment of the quality of mixing fibers of different components based on the analysis of roving and yarn sections], *Izvestiia vuzov. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti* [Textile Industry Technology. Series: "Proceedings of Higher Educational Institutions"], 1962, №3, c.64-74. (In Russ.)

Shustov Yu. S. — Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Materials Science and Commodity Expertise, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Zinoviev T. V. — Researcher, State Scientific Center of the Russian Federation — Federal Medical Biophysical Center named after A. I. Burnazyan (Marshala Novikova st., 23, 123098, Moscow, Russian Federation).

Zinoviev V. P. — Cand. Sc. (Tech.), Leading Researcher, State Scientific Center of the Russian Federation — Federal Medical Biophysical Center named after A. I. Burnazyan (Marshala Novikova st., 23, 123098, Moscow, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Разработка метода измерений поперечника крученой хлопчатобумажной пряжи / Ю. С. Шустов, Т. В. Зиновьев, В. П. Зиновьев // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 3(10). С. 42 – 48.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-42-48

Please cite this article as:

Shustov Yu. S., Zinoviev T. V., Zinoviev V. P. Development of a method for measurement of the cross-dimension of twisted cotton yarn. *Industrial processes and Technologies*, 2023, vol. 3, no. 3(10), pp. 42 – 48.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-42-48

Mathematical modeling of the process of hydrotreating diesel fuel from organosulfur impurities

N. A. Samoilov^{*,1}

^{}Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia*

Abstract

In this article, I want to introduce new methods for calculating the hydrodesulfurization process of diesel fuel.

Mathematical models for the interpretation of the feed stock and reaction rate constants for multicomponent systems are considered. Taking into account these models, the operation of industrial reactor blocks of hydrotreatment units is analyzed and new options for their prospective implementation are presented. It has been shown that these options will make it possible to reduce the amount of catalyst in the reactors.

Keywords

Diesel fuel, hydrodesulfurization process, mathematical modeling, diesel feed stock, reaction rate constants, industrial reactor blocks.

1. Introduction

Hydrotreating of diesel fuel is one of the most large-scale catalytic processes in oil refining. Mathematical modeling of this process is complicated by its implementation in a three-phase system: liquid feed stock, hydrogen-containing gas and bifunctional solid catalysts that provide hemolytic and heterolytic hydrogenation reactions of numerous organosulfur compounds, which significantly complicates the formation of mathematical models of the process [1–5]. In industry, hydrotreater process flowsheets are conservative in terms of the hardware of the reactor plant and usually represent a complex of two to four reactors operating in series. The required loading of the catalyst into the reactors is proportional to the productivity of the installation and increases extensively (several

times) with an increase in the purification depth. For Euro 5 vehicles, the sulfur content is limited to 10 ppm, which is achieved by increasing the contact time of the feed stock with the catalyst in the hydrotreating reactors.

The degree of activity of sulfur compounds in hydrogenolysis reactions is different and decreases in the following order: mercaptans > sulfides > thiophenes > benzothiophenes > dibenzothiophenes. At the same time, the most difficultly hydrogenated compounds of the thiophene series are concentrated mainly in heavy fractions boiling above 330°C [6–9]. It is characteristic that the quality and depth of diesel fuel hydrotreatment, the cleaning process as a whole, is determined by the interaction with hydrogen of a relatively small amount of

¹ Corresponding author:

Email: naum.samoilow@yandex.ru

hardly hydrogenated organic sulfur impurities, while easily hydrogenated components have already undergone hydrogenolysis. In this situation, the assessment of the composition of the initial purified diesel fuel by hydrogenated components, which is necessary for mathematical modeling of the process, is of particular importance [6, 7, 10, 11]. The large number of these components, their different nature and reactivity complicate adequate mathematical modeling and calculation of the reaction blocks of hydrotreatment units.

2. Computational procedures and programs

Since in this work we had solved the problem of comparing different variants of hydrotreatment reactor blocs from the point of view of removing organosulfur impurities under identical technological conditions, the need for a complex hierarchical model of catalytic hydrotreating was no longer needed. Due to this, the operation of the reactor was studied on the basis of the following assumptions:

- quasi-homogeneous reaction stream within the reactor;
- constant velocities of local flow jets and hydrodynamic model of ideal displacement in the reactor;
- isothermicity of the process;
- stationary nature of the process;
- constant activity of the catalyst in time τ ;
- the content of total organosulfur in the feed stock or in its narrow fractions is considered as an organosulfur pseudo-component and its concentration in the stream is determined by analysis for total sulfur;
- the rate constants of the hydrodesulfurization reactions of the pseudo-components are effective.

Under these assumptions, the mathematical model of a hydrotreating reactor, when analyzing the process by N organosulfur

pseudo-components, takes the following form of a system of equations:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC_{S1}}{d\tau} &= -k_1 C_{S1N} \\ \frac{dC_{S2}}{d\tau} &= -k_2 C_{S2} \\ &\vdots \\ \frac{dC_{Si}}{d\tau} &= -k_i C_{Si} \\ &\vdots \\ \frac{dC_{SN}}{d\tau} &= -k_N C_{SN} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

where C_{Si} and k_i are the concentration of the organosulfur component and the effective reaction rate constant of the i^{th} pseudo-component, respectively.

The numerical values of the concentration of organosulfur components in the hydrotreating feed stock and the effective rate constants of the hydrodesulfurization reactions were taken from independent literature sources.

The mathematical model was calculated by the Runge-Kutta method, and the calculation program made it possible to determine the change in the concentration of pseudo-components during the process, the residence time of the reaction mixture in the reactor until a given degree of purification of feed stock was achieved, and the required volume of catalyst in the reactor. The same assumptions were used when comparing different configurations of reaction units. It is the specific features of the hydrodesulfurization chemistry in these units that made it possible to quickly compare them in terms of the effectiveness of the hydrotreating process using a fairly simple calculation program instead of complex programs that fully take into account the system of hierarchical modeling of the catalytic process from the catalyst grain to the reactor taking into account its placement in the reaction unit scheme.

3. Results and discussion

3.1. Methods of characterizing hydrotreating raw materials by the content of organosulfur impurities

The identification of an extremely complete set of dozens of organosulfur components in diesel fuel (figure 1a) and the development of a database of numerous reaction paths is practically impossible due to the scale of the task, the high cost of the necessary reagents, the complexity of analysis methods, the need to use expensive precision equipment to determine the concentration of individual organosulfur impurities in fractions in ppm [12, 13]. Instead, the total sulfur content of the feed stock is often used in calculations as characterize the raw materials. In many cases, in the experimental study of the hydrotreatment process, there was used a feed stock model, in which dibenzothiophene was presented as the only generalizing hydrogenated component instead of a set of organosulfur impurities [14–17] (figure 1b).

Most often, researchers consider the grouping of organosulfur impurities of the same homologous series as a kind of conditional pseudo-component (figure 1c) or two-lump, three-lump, four-lump kinetic model

which includes corresponding groups of higher, high, low and lower reactivity portions of feed stock [18–20], but they do not take into account the fact that homologues or groups with significantly different boiling points also have different reactivity. In addition, in this situation, the selection of fractions of various homologues from the hydrotreating feed stock is also very laborious.

In this regard, we propose to consider the feed stock of the hydrotreatment process as a set of several narrow fractions, in each of which a set of organosulfur impurities is considered as a conditional pseudo-component (figure 1d). Their content in the narrow fraction is determined using the simplest and most accessible analysis for total sulfur [21], which makes it possible to significantly simplify the constructed mathematical models for a comparative analysis of various hydrotreatment schemes. Subsequent studies have shown that it is most expedient to divide the raw material into 16 or 8 equal narrow fractions.

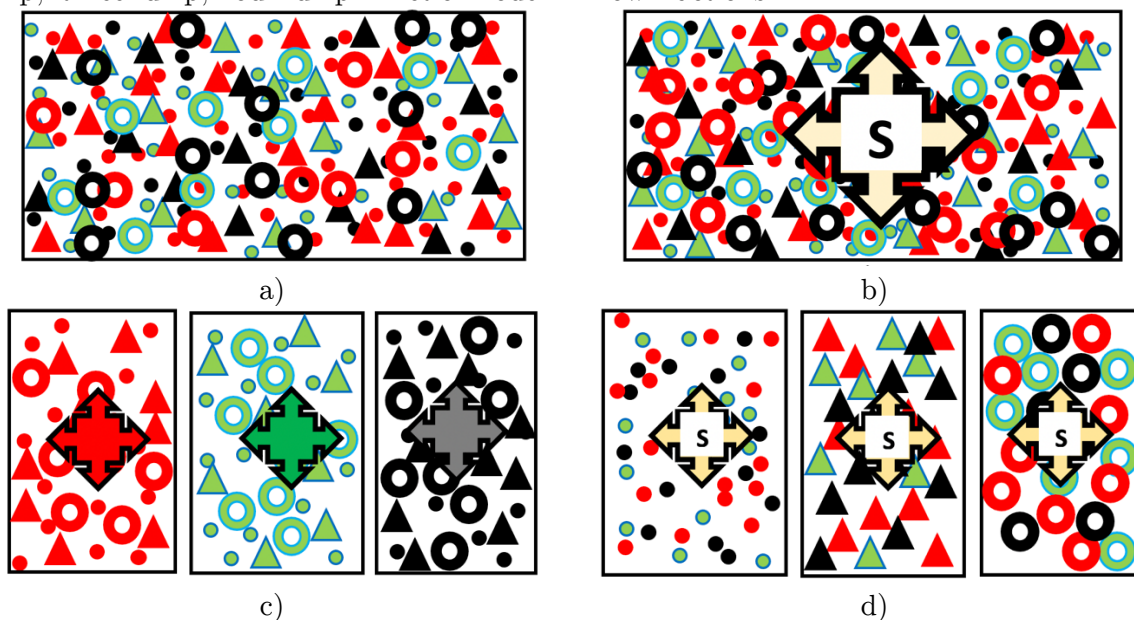


Figure 1 — Models characterizing hydrotreating raw materials by the content of organosulfur impurities: a — the totality of many different components with specific concentrations in a single raw material; b — characterization of this set by a single analysis for total sulfur; c — combination of homologues as pseudo-components, for example, three; d — separation of raw materials into several narrow fractions with analysis of each of them for the content of total sulfur, for example, three. ●, ○ and ▲ — homologues, e.g. disulfides, with successively increasing boiling points and decreasing reactivity

3.2 Reaction rate constant or kinetic characteristic?

The development of an experiment to determine the rate constants of hydrodesulfurization reactions for diesel fuel is very different from classical experiments on monoreactions. If one component enters into the reaction, then according to the law of action of the masses, at any time of contact of the reaction mixture with the catalyst, the calculated value of the effective reaction rate constant is constant. With the simultaneous course of many reactions, the reactivity of various components differs significantly from each other. In this regard, at the beginning of the process, with a short contact time, the highly active components of the raw material with a high value of the reaction rate constants react intensively. At the end of the process low-active components react slowly, with a low value of the reaction rate constant.

To calculate the effective reaction rate constant $k_{i,ef}$ for a particular i^{sh} component of the reaction system (or pseudo-component), it is necessary to take a sample and determine the concentration of this component in it at the time of contact of the reaction mixture with the catalyst τ and determine the amount of decrease in the concentration of this component compared to the initial $C_{i,0} - C_{i,\tau}$; then

$$k_{i,ef} = \frac{1}{\tau} \ln \left(\frac{C_{i,0}}{C_{i,\tau}} \right). \quad (2)$$

The processing of a number of materials for the calculated hydrotreating of model raw materials and experiments on desulfurization of real diesel fuel showed that the effective reaction rate constants decrease as the reaction depth increases, that is, the duration of the hydrodesulfurization process. For example, the performed processing of data [22] on

the study of the diesel fuel hydrotreating process at the pilot plant (fraction 160–360 °C, total sulfur content 1.17%), as well as two fractions that make up this raw material (light fraction 160–360 °C, total sulfur content 0.92% and heavy fraction 300–360 °C, total sulfur content 1.47%), on a co-catalyst showed (table 1) that for all three fractions, the numerical values of the effective reaction rate constants k_{ef} decrease 4–5 times with an increase in the duration of the hydrotreating process, expressed in conditional hours (τ , h).

Thus, the analysis of the chemistry of hydrotreatment indicates that the hydrotreatment process as a whole with the integral method for determining sulfur should be characterized not by essentially degenerate effective reaction rate constants, but by variable **kinetic characteristics K** , which naturally change during the process. It can be assumed that the kinetic characteristic can also be used to describe other multi-reaction systems, the patterns of which are determined as a result of the analysis of the group composition.

Regularly, the kinetic characteristic $K(\tau)=f(\tau)$ reflects the observed change in the effective rate constant of the reaction of a complex multicomponent system as a whole. Both for model systems and for real diesel fuel $K(\tau)=f(\tau)$ are qualitatively similar. The form of the dependence of the reaction kinetic characteristic K on the contact time of the reaction mixture with the catalyst τ is a characteristic of a hyperbolic type function of the form

$$k(\tau) = f(\tau) = M/(1 + N\tau), \quad (3)$$

where N and M are empirical approximation coefficients of the kinetic characteristic of the experimental data set by values of the effective rate constants.

Table 1 — Change in the values of sulfur concentrations at the exit from the reactor C and the effective reaction time constants k_{ef} in the process of hydrotreating fractions 160–300 °C, 160–360 °C and 300–360 °C

τ , h	Temperature, °C	Fraction 160–300 °C		Fraction 160–360 °C		Fraction 300–360 °C	
		C, %	k_{ef} , h ⁻¹	C, %	k_{ef} , h ⁻¹	C, %	k_{ef} , h ⁻¹
1	340	0.020	3.8	0.15	2.1	0.19	2.0
	350	0.017	4.0	0.13	2.2	0.16	2.2
	360	0.015	4.1	0.11	2.4	0.14	2.4
0.50	340	0.035	6.5	0.18	3.7	0.35	2.9
	350	0.030	6.8	0.16	4.0	0.29	3.2
	360	0.025	7.2	0.13	4.4	0.25	3.5
0.33	340	0.050	8.7	0.22	5.0	0.46	3.5
	350	0.044	9.1	0.19	5.5	0.41	3.8
	360	0.040	9.4	0.16	6.0	0.37	4.1
0.25	340	0.068	10.4	0.25	6.2	0.62	3.5
	350	0.060	10.9	0.22	6.7	0.55	3.9
	360	0.050	11.6	0.18	7.5	0.5	4.3
0.20	340	0.080	12.2	0.28	7.2	—	—
	350	0.071	12.8	0.25	7.7	—	—
	360	0.060	13.7	0.22	8.4	—	—
0.16	340	0.095	13.6	0.30	8.2	—	—
	350	0.080	14.7	0.27	8.8	—	—
	360	0.070	15.5	0.25	9.3	—	—
0.14	340	0.110	14.9	—	—	—	—
	350	0.097	15.7	—	—	—	—
	360	0.090	16.3	—	—	—	—

Let us consider mathematical modelling of the diesel hydrotreating process using the concept of ‘kinetic characteristic’ and expressing the composition of feed stock by sulphur-organic impurities as the total sulphur content C_s . For a steady-state process, the simplest mathematical model of a hydrotreating reactor, assuming quasihomogeneous reaction and ideal displacement mode for the flow, is expressed as

$$\frac{dC_s}{d\tau_{cond}} = -\frac{M}{1 + N\tau_{cond}} C_s - W \frac{dC_s}{dl} = 0, \quad (3)$$

where W is flow rate, l is catalyst bed height in the reactor.

The advantages of using kinetic characteristics over the application of the only ones

natural values of reaction rate constants in mathematical modelling of hydrotreating kinetics of fractions 160–360 °C are clearly illustrated in figure 2.

When calculating the kinetic curves for complex multicomponent reaction systems on the basis of effective rate constants, the calculated concentration of the reactant in the reaction mixture corresponds to reality only in the vicinity of a kinetic time point, in which the effective rate constant of the process k_{ef} was determined earlier (for example, the black points, which belong to curves 1-5 in figure 2), whereas the group of white points, which belong to the kinetic response (curve 6 in figure 2) covers the entire hydrotreating process and equation (4) is more

informative than just a set of reaction rate constants.

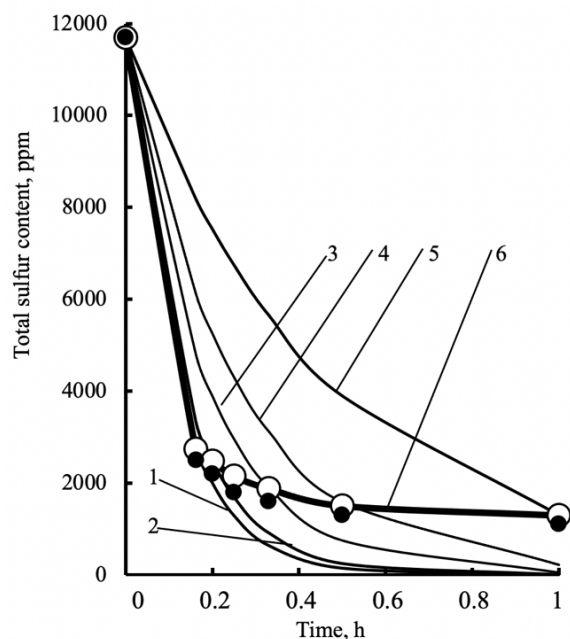


Figure 2 — The change in the total sulfur content in the hydrogenate over time for hydrotreating diesel fuel fractions 180–360 °C, calculated from the unit reaction rate constants determined from experimental data [22] for reaction time ω 0.2 h (1), 0.25 h (2), 0.33 h (3), 0.5 h (4), 1.0 h (5), and with kinetic characteristic (curve (6) and O).

● — experimental data on [22]

Since the mathematical modeling of the hydrotreating process using only the one reaction rate constant leads to an incorrect value of hydrotreating duration, this puts additional requirements on the method of conducting experiments. In order to increase the accuracy of the kinetic dependence formation, it is recommended to carry out at least three experimental determination of the k_{eff} , respectively, for three positions of the τ . At the same time, it is recommended to work in the area of sufficiently large values of τ τ_{cond} , although this significantly complicates the experiment. So, when only 5–10 cm³ of the catalyst is loaded into the microreactor it is difficult to ensure the supply of reagents (raw material and hydrogen-containing gas) in micro quantities (for example, with a volume ratio of raw materials/catalyst equal to 0.5 h⁻¹ and a reaction time of 2 hours, it is necessary to ensure the consumption of diesel fuel 2.5–5 cm³ per hour in the reactor while guaranteeing the stationarity of the process).

Mathematical modeling of the hydrodesulfurization process based on kinetic characteristics has been successfully applied to analyze this process on model systems and real diesel fuels.

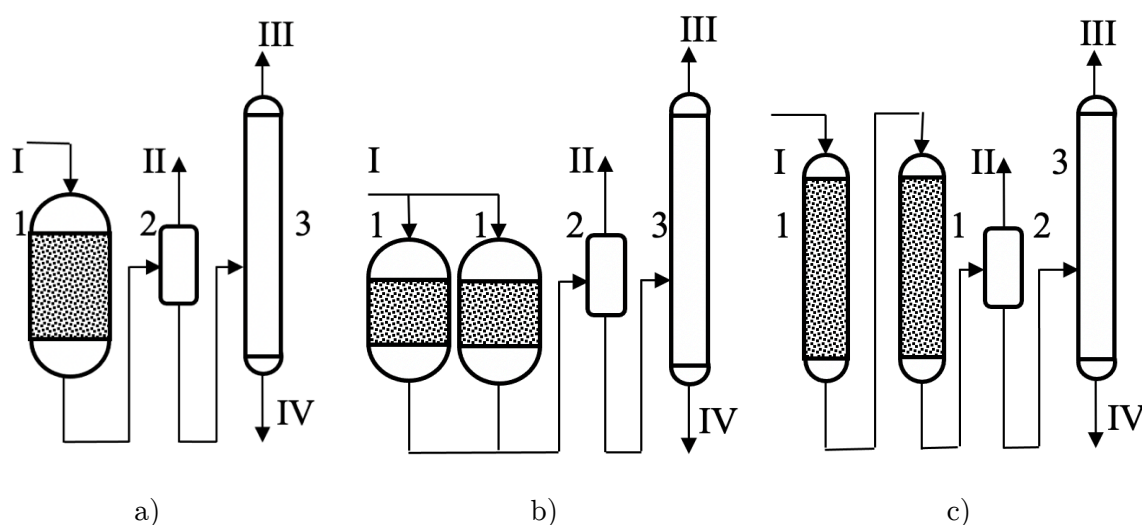


Figure 3 — Concepts for reactor units of the process of hydrotreating of diesel fuel:

- a — single-reactor system; b — block double-reactor with parallel the supply of raw materials;
c — double-reactor unit with a consistent supply of raw material.

Table 2 — Results of mathematical modeling of various reaction units of diesel fuel hydrotreating plants for different systems (figure 3, a, b, c)

Concentration of sulfur in feed stock, ppm	Final concentration of sulfur in purified fuel, ppm	Duration of reaction, h			The volume of the catalyst in the system, m ³		
		a	b	c	a	b	c
6000	2000	0.550	0.550	0.550	68.8	68.8	68.8
6000	500	1.245	1.245	1.245	155.6	155.6	155.6
6000	350	1.420	1.420	1.420	177.5	177.5	177.5
6000	50	2.395	2.395	2.395	299.4	299.4	299.4
6000	10	3.199	3.199	3.199	400.0	400.0	400.0

3.3. Analysis of efficiency of industrial reactor units of diesel fuel hydrotreating plants

The variety of types of layout for the reactor unit of hydrotreating plants (figure 3) requires their comparison from the standpoint of minimizing the loading of the catalyst to obtain highquality diesel fuel. Since the reactors are structurally the same in all schemes, when solving the problem, it was assumed that in the reactors, with the assumptions made, the temperature and concentration profiles in the height of the catalyst layer should be practically the same.

To compare different hydrotreating reactor systems (figure 3), mathematical modeling of the hydrodesulfurization process of 250 m³/h of diesel fuel with a sulfur content of 6000 ppm, the volumetric feed rate of feedstock 2 h⁻¹ and the accepted effective rate constant of the hydrodesulfurization reaction 2 h⁻¹ was performed [12]. The efficiency of the reaction system in ensuring the final concentration of sulfur in purified diesel fuel from 500 to 10 ppm was estimated by the total volume of the catalyst in the industrial reaction systems. Calculations have shown (table 2) that the volume of the catalyst in a single reactor and in a parallel and sequential reactor system required to achieve a given residual sulfur concentration in diesel fuel is the same and the configuration of the installation scheme is determined by technical

limitations. This conclusion is valid t also for a four-reactor [23], as well as for a combined parallel-serial circuit, allowing us to assume that all actual industrial reactor units, regardless of their configuration and number of reactors, are equivalent to the operation of a single big reactor.

3.4. Development of perspective schemes of the reactor blocs of the diesel fuel hydrotreating unit

The representation of the model of hydrotreating raw materials in the form of several narrow fractions (figure 1d) with different boiling points and, accordingly, different reactivity of the organosulfur components included in these fractions made it possible to consider differential hydrotreating, that is, to purify not all raw materials, but some of its parts separately [24].

The advantages of this approach to carrying out a diesel hydrotreating process can be easily demonstrated by the following example.

Assume that diesel fuel in the amount of G=100 t/h goes to the hydrotreatment unit for deep desulfurization. Let us consider two options for treatment of this fuel to remove organosulfur impurities from this fuel. First, this feedstock can be desulfurized in the traditional way in one reactor. Second, the raw materials can be preliminarily divided into two fractions (distillate and residue) if there is a reserve distillation column in the

hydrotreating unit, and then these fractions can be hydrogenated and purified from sulfur individually in two reactors:

a) a light (low boiling) fraction in quantity $G = 80 \text{ t/h}$ which contains sulfur-organic components easily fully hydrogenated within 1 hour;

b) a heavy (high-boiling) fraction of $G = 20 \text{ t/h}$ containing organosulfur components which are difficult and slow to react with hydrogen within 3 hours.

For deep hydrotreating of diesel fuel, the required loading of the catalyst into the reactors G_{kat} can be calculated as

$$G_{\text{kat}} = G_F \cdot \tau_R, \quad (3)$$

where G_F — the feed of raw materials, t/h , τ_R — the duration of the reaction, h.

If all the feedstock was in contact with the catalyst for 3 hours for complete removal of both easily and slowly hydrated sulfur-organic components, the required loading of catalyst in the reactor G_{kat} will be equal to 300 tons (100 t/h , 3 h) (figure 2a). If we carry out the hydrogenation of two fractions of feed stock separately in two reactors, then we can

achieve the necessary loading of the catalyst in the first reactor 80 t (80 t/h , $\cdot 1 \text{ h}$) and in the second reactor — 60 t (20 t/h , $\cdot 3 \text{ h}$) (figure 2b); that is the total loading of the catalyst in two reactors of the reactor block will make only 140 t instead of 300 t in one reactor.

In mathematical modeling of hydrotreating process of diesel fuel pre-fractionated into light and heavy broad fractions in separate reactors, calculation of hydrodesulphurization of several variants of model fuel as feedstock was performed. In each variant of calculation, the distribution of sulfur-organic components in each broad fraction at the time of chemical process with achievement of concentration of total sulfur at the outlet of corresponding reactor being 10 ppm and necessary volume of catalyst in each reactor and as a whole in both reactors were determined. The feed stock (fraction $180\text{--}360^\circ\text{C}$) was divided into 16, 8 or 4 narrow fractions, from which wide fractions were formed. Eight variants of various (linear, non-linear and extreme) non-distribution functions of sulfur over narrow fractions were considered (figure 5).

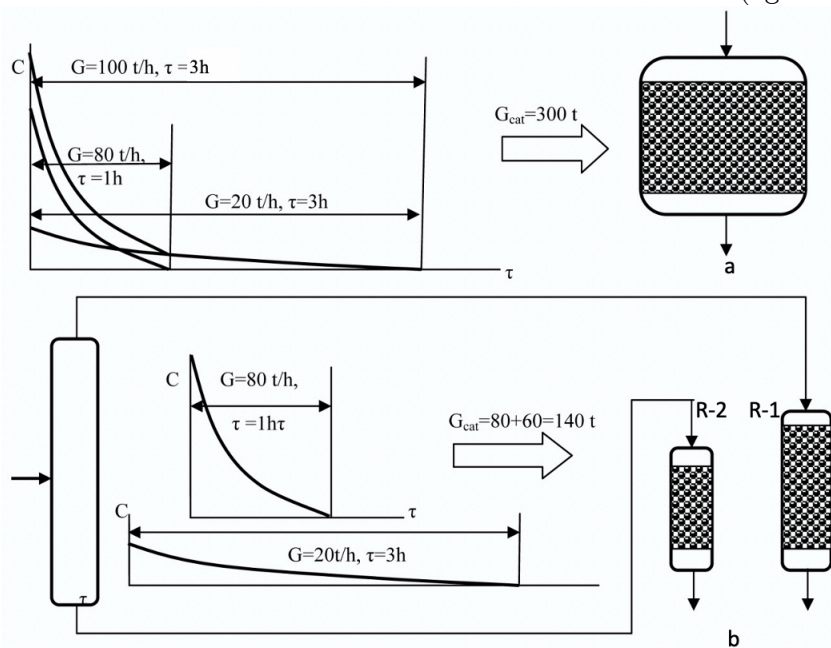


Figure 4 — Illustration of the principle of differential hydrogenation of diesel fractions:
a — usual hydrotreating; b — differential hydrotreating

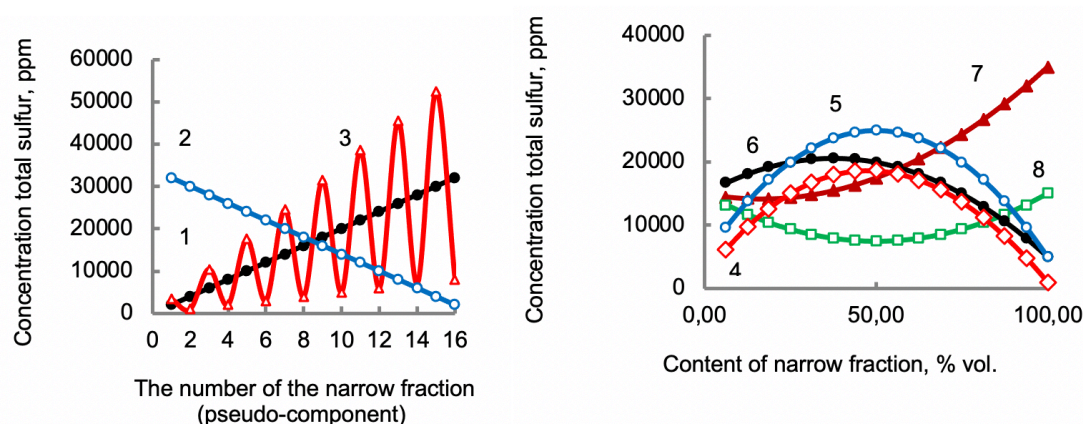


Figure 5 — Options distribution of total sulfur by hydrotreating raw materials
(1–8 is the number of the raw material variant according to table 3)

Calculations showed (table 3) that in all cases of mathematical modeling of the process, the loading of the catalyst into two reactors during differential hydrotreating of diesel fuel is much lower than during conventional one. An increase in the number of narrow fractions increases the level of calculation accuracy. Thus, there is such boundary of division of two fractions at which the hydrotreating process can be realized at minimum catalyst loading in two reactors.

Since calculations have shown that the efficiency of hydrotreating is largely

negatively affected by the overloading of the reactor R-1 with heavy narrow fractions, and the reactor R-2 with light narrow fractions (figure 4), there is no doubt that it is expedient to combine a part of these fractions into the third stream of the medium wide fraction subjected to hydrotreating in a separate third reactor R-3. This fraction can be obtained in the distillation column of the hydrotreater plant (figure 6) as a side stream. The reactor R-3 becomes additional equipment of the unit.

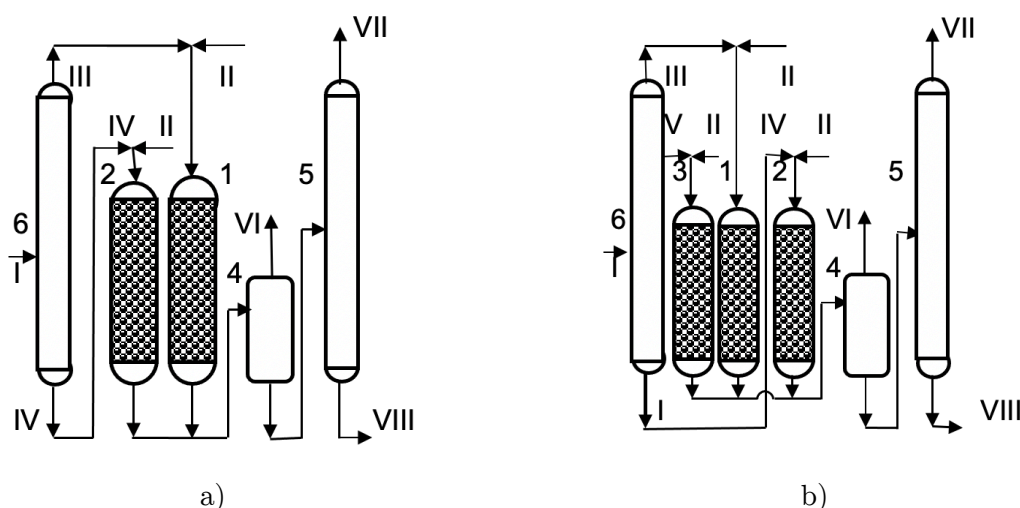


Figure 6 — Basic technological schemes of reactor units: a — two-reactor; b — three-reactor.
Apparatuses: 1 — reactor R-1; 2 — reactor R-2; 3 — reactor R-3; 4 — separator; 5 — stabilizer, 6 — distillation column. Streams: I — raw materials; II — hydrogen-containing gas (HCG); III — light fraction of raw materials; IV — heavy fraction of raw materials; V — medium fraction of raw materials; VI — recirculate HCG; VII — hydrocarbon gas; VIII — purified diesel fuel

Table 3 — Summary data on the dependence of the total volume of the loaded catalyst in two reactors for different variants of the distribution of total sulfur in the feedstock

Number of narrow fractions (pseudo-components) in raw materials	Distribution of narrow fractions by reactor R-1 and R-2	The total volume of the loaded catalyst in two reactors, m ³ , with options for the distribution of total sulfur in the feedstock according to figure 5							
		1	2	3	4	5	6	7	8
16	1/2...16	252.4	247.0	375.8	184.6	331.8	332.0	514.0	434.6
	1, 2/3...16	239.9	239.8	358.6	181.4	318.8	319.0	488.8	414.6
	1...3/4...16	227.3	232.4	343.2	177.8	305.6	305.8	463.0	394.0
	1...4/5...16	214.7	224.6	324.4	174.2	292.2	292.2	437.2	373.0
	1...5/6...16	202.0	216.6	310.6	170.4	278.8	278.6	411.2	351.8
	1...6/7...16	189.4	208.4	289.4	166.6	265.4	265.0	385.2	330.2
	1...7/8...16	176.9	200.2	278.6	162.8	252.2	251.4	359.6	308.8
	1...8/9...16	164.6	192.0	254.6	159.2	239.2	238.0	334.2	287.4
	1...9/10...16	152.8	184.0	249.0	156.0	226.8	225.0	309.8	266.4
	1...10/11...16	141.5	176.4	221.4	153.6	215.2	212.8	286.6	246.6
	1...11/12...16	131.5	170.0	226.0	152.4*	205.2	202.0	265.8	228.6
	1...12/13...16	123.5	165.0	194.6	153.2	198.0	193.8	249.4	214.0
	1...13/14...16	119.4	163.2	224.0	157.8	195.8	190.0	240.8	206.0
	1...14/15, 16	123.5	168.0	192.4	16.0	203.4	196.0	249.4	212.2
	1...15/16	149.5	188.0	316.4	192.6	234.8	225.6	302.4	256.0
8	1/2...8	268.9	335.6	535.6	332.2	413.0	402.4	545.8	470.2
	1, 2/3...8	239.9	307.6	477.8	304.2	373.8	364.8	487.2	421.8
	1...3/4...8	211.1	279.0	420.4	276.2	334.8	326.6	428.2	372.4
	1...4/5...8	182.9	250.6	364.4	249.0	296.6	289.4	370.4	323.0
	1...5/6...8	156.7	224.0	312.2	224.4	261.8	254.8	316.6	276.2
	1...6/7...8	136.5	203.8	272.0	207.4	235.8	228.4	275.2	239.4
	1...7/8	137.1	205.8	273.0	215.0	240.0	230.6	276.0	238.4
4	1/2...4	263.7	399.0	525.2	414.8	459.6	443.4	533.8	466.4
	1, 2/3...4	199.9	314.8	398.4	325.6	356.8	344.8	404.0	355.8
	1...3/4	148.8	247.0	375.8	184.6	331.8	332.0	514.0	434.6
* The positions of the minimum loading of the catalyst are highlighted in bold; calculations of the hydrotreating process and loading of the catalyst into the reactors were performed by V.A. Zhilina									

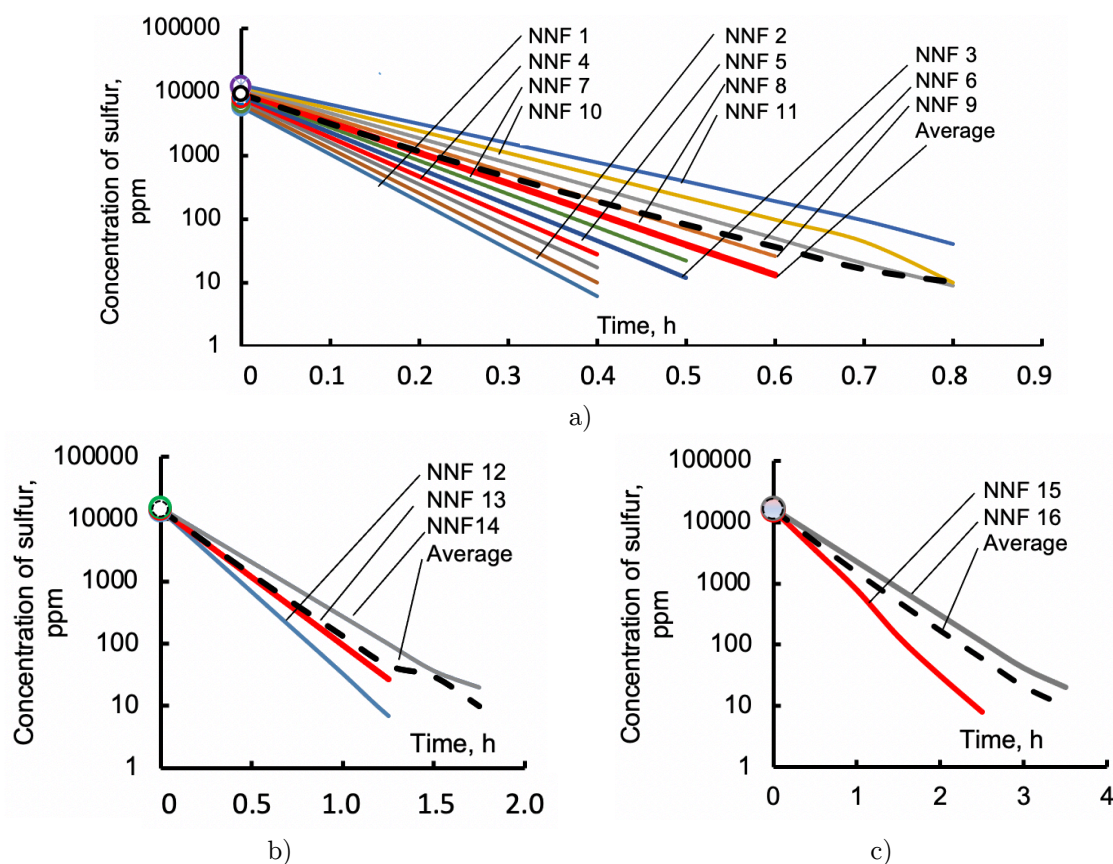


Figure 7 — Kinetics of hydrodesulfurization of pseudo-components contained in narrow fractions forming reactor feedstock: a — R-1; b — R-3; c — R-2 (NNF — number of narrow fraction, average sulfur content in a wide fraction)

The kinetics of one of the variants of hydrodesulfurization of 16 pseudo-components of the feedstock of the process divided into three broad fractions is shown in figure 7.

Mathematical modeling of a three-reactor scheme of a hydrotreating unit, all other things being equal, showed that when a set of narrow fractions forming a medium narrow fraction sent to the reactor R-3 is formed, a rather diverse variability of solutions appears on the selection of temperature boundaries for the beginning and end of boiling of the middle fraction. It is characteristic that the transition from a two-reactor to a three-reactor hydrotreating scheme is accompanied by an additional decrease in the total volume of catalyst loading into the reactor unit due to the elimination of the previously discussed factors that negatively affect the operation of

the reactors R-1 and R-2 of the two-reactor scheme.

When selecting the temperature limits of the medium wide fraction, the adopted set of narrow fractions provides a monotonic change in the volume of the catalyst loaded into the reactor R-3 (figure 5), while the calculated volume of the total load in all three reactors also has a minimum (figure 6), like for a two-reactor scheme. However, if a two-reactor unit has a single minimum of catalyst loading, many local extrema of the minimum type are formed when calculating a three-reactor unit, and when searching for a global extremum, it is necessary to use a scanning method with a sequential change in the range of narrow fractions that form a wide medium fraction for the new reactor R-3.

An additional feature of the variability of the problems being solved for optimizing a

three-reactor hydrotreatment scheme is the possibility of not only minimizing the catalyst load in a separate variant of the distribution of narrow fractions of diesel fuel over light, medium and heavy wide fractions, but also selecting such a variant of the simulated scheme, so that at a volume sufficiently close to the global minimum for the total loading of the catalyst, the scheme included close in size volumes of catalyst in all three reactors of the scheme, which makes it possible to develop the designed reactors as identical equipment.

Considering the required volume of loading an expensive catalyst into the reactor unit as an optimality criterion R , we can assume that each calculation option allows us to determine the local optimum, and their comparison allows us to identify the global optimum for solving the problem (table 4).

The three-reactor scheme, compared with the two-reactor scheme, makes it possible to reduce the catalyst loading, depending on the option of forming the medium wide fraction, from 7 to 13% and bring the reduction in catalyst loading to 50% from the currently used "one-reactor" variant of diesel fuel hydrotreatment.

It can be assumed that a further increase in the number of hydrotreating reactors to the limit of the number of narrow fractions will lead to a further decrease in the required catalyst load in the reactor unit, but this will most likely be inefficient from an economic standpoint due to an increase in the cost of numerous non-standard equipment. For example, with 16 narrow fractions and their differential hydrogenation in 16 reactors, the reactor loading will vary from 2.3 m^3 in the first reactor to 23.1 m^3 in the sixteenth reactor, totaling 108.5 m^3 , which is only on 2.8 m^3 less than global optimum of 111.3 m^3 .

A feature of the process scheme of differentiated hydrotreatment is the need for computer control of the process of distribution of wide fractions in reactors with a change in the flow rate and composition of the feedstock.

Conclusion

It is proposed to consider the feedstock of the hydrotreating process as a set of several narrow fractions, in each of which the aggregate of organosulfur impurities is considered as a conditional pseudo-component. Its concentration in a narrow fraction is determined using the simplest and most accessible analysis for total sulfur. It is recommended to present hydrotreating raw materials in the form of 16 or 8 identical narrow fractions, and, accordingly, organosulfur impurities — as 16 or 8 pseudo-components.

A chemical process involving a large number of simultaneous reactions, and, accordingly, many components or pseudo-components with varying degrees of activity (for example, hydrotreating diesel fuel) is more convenient and more accurate to calculate not by reaction rate constants, but on the basis of kinetic characteristics.

The kinetic characteristic is formed as a continuously changing set of reaction rate constants, which gradually decrease during the time when the reaction mixture moves through the catalyst layer in the reactor. The maximum value of the kinetic characteristic of the process $K(\tau)$ corresponds to the value of the rate constant of the hydrodesulfurization reaction of the most easily hydrogenated organosulfur component of the raw material. The minimum value $K(\tau)$ corresponds to the value of the rate constant of the most difficult-to-hydrogenate organosulfur component of feed.

Table 4 — Comparison of characteristics of one-, two- and three-reactor units of plants for differentiated hydrotreatment of diesel fuel

Characteristics of reactor unit	Reactors		
	R-1	R-3	R-2
One-reactor unit ($R = 231.7 \text{ m}^3$)			
Distribution of pseudo-components	1...16		
Feedstock consumption, m^3/h	100		
Duration of contact of feedstock with catalyst, h	2.31		
Catalyst volume in reactor, m^3	231.7		
Optimal two-reactor unit ($R = 134.2 \text{ m}^3$)			
Temperature limits of boiling of wide fractions, $^{\circ}\text{C}$	180–315		315–360
Distribution of pseudo-components	1...12		13...16
Feedstock consumption, m^3/h	75		25
Duration of contact of feedstock with catalyst, h	0.78		3.00
Catalyst volume in reactor, m^3	59.0		75.2
Three-reactor unit (option 1 — local optimum; $R = 123.9 \text{ m}^3$)			
Temperature limits of boiling of wide fractions, $^{\circ}\text{C}$	180–270	270–315	315–360
Distribution of pseudo-components	1...8	9...12	13...16
Feedstock consumption, m^3/h	50	25	25
Duration of contact of feedstock with catalyst, h	0.49	0.97	3.00
Catalyst volume in reactor, m^3	24.4	24.3	75.2
Three-reactor unit (option 2 — local optimum; $R = 119.4 \text{ m}^3$)			
Temperature limits of boiling of wide fractions, $^{\circ}\text{C}$	180–303.7	303.7–348.7	348.7–360
Distribution of pseudo-components	1...11	12...15	16
Feedstock consumption, m^3/h	68.75	25	6.25
Duration of contact of feedstock with catalyst, h	0.68	2.00	3.70
Catalyst volume in reactor, m^3	46.6	23.1	49.7
Optimal three-reactor unit (option 3 — global optimum; $R = 111.3 \text{ m}^3$)			
Temperature limits of boiling of wide fractions, $^{\circ}\text{C}$	180–292.5	292.5–337.5	337.5–360
Distribution of pseudo-components	1...10	11...14	15...16
Feedstock consumption, m^3/h	62.5	25	12.5
Duration of contact of feedstock with catalyst, h	0.60	1.48	3.35
Catalyst volume in reactor, m^3	37.4	41.9	32.0

It has been shown by mathematical modeling that the reactor blocks of industrial diesel fuel hydrotreatment units are equivalent to a single reactor, on the basis of which series or parallel reactor schemes with the same total catalyst load are formed. Analysis of a number of options for the hardware design of the reactor blocks of the diesel hydrotreating process showed that the only way to intensify the process is a system of two or three separately operating reactors with loading of light, middle or heavy fractions of pre-fractionated raw diesel fuel. Such a system provides the desired performance and quality of diesel fuel purification from organosulfur impurities at a lower load of catalyst, while accounting for 70 to 40% compared to other traditional options. While maintaining the loading of the catalyst into the reactors, this scheme allows for a 1.5-2-fold increase the productivity of the hydrotreating plant.

REFERENCES

- [1]. Song C. An Overview of New Approaches to Deep Desulfurization for Ultra-clean Gasoline, Diesel Fuel and Jet Fuel. *Catalysis Today*. 2003, 86(2), pp. 211–263. DOI:10.1016/S0920-5861(03)00412-7
- [2]. Zeyad M. Ahmed, Gurashi A. Gasmelseed. Modelling and Control of a Diesel Hydrotreating Process. *Int. J. of Science&Research*. 2017, 6(10), 1940-1944. DOI:10.21275/ART20177709
- [3]. Palmer E., Polcar S., Wong A. Clean Diesel Hydrotreating. Design Considerations for Clean Diesel Hydrotreating. *Petroleum Technology Quarterly*, 2009, 14(1), p. 91–103.
- [4]. Samoilov N. A. Mathematical Modeling and Optimization of Diesel-fuel Hydrotreatin. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2021, 55(1), pp. 99-109. DOI:10.1134/S0040579520060202
- [5]. Babich I. V., Moulijn J. V. Science and Technology of Novel Processes for Deep Desulfurization of Oil Refinery Streams: a Review. *Fuel*, 2003, 82(6), pp. 607–631. DOI: 10.1016/S0016-2361(02)00324-1
- [6]. Saba Gheni, Saad A. Awad, Sa-faa M. R. Ahmed, Ghassan Abdullah. Nano-particle Catalyzed Hydrodesulfurization of Diesel Fuel in a Trickle Bed Reactor: Experimental and Optimization Study. *Royal Society of Chemistry Advances*, 10(56), p. 33911–33927. DOI: 10.1039/D0RA05748G
- [7]. Verstraete J. J., Le Lannic K., Guibard I. Modeling Fixed-bed Residue Hydrotreating Processes. *Chem. Eng. Sci.* 2007, 62, pp. 5402–5408. DOI: 10.1016/j.ces.2007.03.020
- [8]. Weng Huixin, Wang Jiming. Kinetic Study of Liquid-phase Hydrodesulfurization of FCC Diesel in Tubular Reactors. *China Petroleum Processing and Petrochemical Technology*, 2015, 17(2), pp. 1-8.
- [9]. Solmanov P. S., Maximov N. M., Eremina Yu. V., et al. Hydrotreating of Mixtures of Diesel Fractions with Gasoline and Light Coking Gas Oil. *Petrol. Chem.* 2013, 53(3), pp. 177-185. DOI: 10.1134/S0965544113030109
- [10]. Koji Nakano, Syed Ali, Hyun-Jong Kimet, Taegon Kim, Khalid Alhooshani, Joo-Il Park, Isao Mochida. Deep Desulfurization of Gas Oil Over NiMoS Catalysis Supported on Alumina Coated USY-zeolite. *Fuel Processing Technology*, 2013, 116, pp. 44-51. DOI: 10.1016/j.fuproc.2013.04.012
- [11]. Saeid Shokri, Mahdi Ahmadi, Marvastand Morteza Tajerian. Production of Ultra Low Sulfur Diesel: Simulation and Software development. *Petroleum & Coal*, 2007, 49(2), pp. 48–59.
- [12]. Tataurshikov A., Ivanchina E., Krutcvja N., Krivtsov E., Syskina A. Mathematical Modeling of Diesel Fuel Hydrotreating. *IOP Conf. Series: Earth and*

- Environmental Science*, 27(2015) 012046, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/27/1/012046
- [13]. Ghosh P., Andrews A. T., Quann R. Q., Halber T. R. Detailed Kinetic Model for the Hydrodesulfurization of FCC Naphtha. *Energy Fuels*. 2009, 23(12), pp. 5743–5759. DOI: 10.1021/ef900632v
- [14]. Al-Zeghayer Y. S., Jibri B. Y. Kinetics of Hydrodesulfurization of Dibenzothiophene on Sulfide Commercial Co-Mo/ γ - Al_2O_3 Catalyst. *The Journal of Engineering Research*. 2006, 3(1), 38–42.
- [15]. Xiang Li, Feng Zhou, Anjie Wang, Linying Wang, Yao Wang. Hydrodesulfurization of Dibenzothiophene over MCM-41-Supported Pd and Pt Catalysts. *Energy & Fuels*. 2012, 26(8), pp. 4671–4679. DOI: 10.1021/ef300690s
- [16]. Jing Ren, Anjie Wang, Xiang Li, Yongying Chen, Haiou Liu, Yongkang Hu. Hydrodesulfurization of Dibenzothiophene Catalyzed by Ni-Mo Sulfides Supported on a Mixture of MCM-41 and HY Zeolite. *Applied Catalysis A: General*. 2008, 344 (1–2), pp. 175–182. DOI: 10.1016/j.apcata.2008.04.017
- [17]. Khaja W. Ahmed, Syed Ali, Shakeel Ahmed, Muhammad A. Al-Saleh. Simultaneous Hydrodesulfurization of Benzothiophene and Dibenzothiophene Over CoMo/ Al_2O_3 Catalysts with Different [Co/(Co + Mo)] Ratios. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. 2011, 103(1), pp. 113–123. DOI: 10.1007/s11144-011-0288-1
- [18]. Xun Tang, Shuyan Li, Changtao Yue, Jilai He, Jili Hou. Lumping Kinetics of Hydrodesulfurization and Hydrodenitrogenation of the Middle Distillate from Chinese Shale oil. *Oil Shale*. 2013, 30(4), pp. 517–535. DOI: 10.3176/oil.2013.4.05
- [19]. Papor Bannatham, Sornsawan Teeraboonchaikul et al. Kinetic Evaluation of the Hydrodesulfurization Process Using a Lumpy Model in a Thin-layer Reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2016, 55(17), pp. 4878–4886. DOI: 10.1021/acs.iecr.6b00382
- [20]. Tataurshchicov A. A., Krivtcova N. I. Non-stationary Mathematical Model of Industrial Diesel Fuel Hydrotreating Process. *Petroleum & Coal*, 2018, 60(1), pp. 104–112.
- [21]. Samoilov N.A., Zhilina V.A., On the Formation of Pseudo-components in the Raw Organosulfur Materials of the Diesel Fuel Hydrotreating Process. *Progress in petrochemical science*. 2020, 3(5), pp. 389–381. DOI: 10.31031/PPS.2020.03.000573
- [22]. Loginov S.A., Lebedev B.L., Kapustin V.M. et al. Development of a New Technology for the Process of Hydrodesulfurization of Diesel Fuels. *Oil Refining and Petrochemistry [Neftepererabotka i neftekhimiy]*. 2001, (11), pp. 67–74. (In Russ.)
- [23]. Yalin Wang, Dandan Shang, Xiaofeng Yuan, Yongfei Xue, Jiazhou Sun. Modeling and Simulation of Reaction and Fractionation Systems for the Industrial Residue Hydrotreating Process. *Processes* 2020, 8(32), pp. 1–19. DOI: 10.3390/pr8010032.
- [24]. Mnushkin I.A., Samoilov N.A., Zhilina V.A. Method Hydrotreating of Diesel Fuel. Patent RU, no. 2691965, 2019. (In Russ.)

Математическое моделирование процесса гидроочистки дизельного топлива от сероорганических примесей

Н. А. Самойлов^{*,1}

**Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия*

Аннотация

В статье представлены новые методы расчета процесса гидрообессеривания дизельного топлива.

Рассмотрены математические модели для интерпретации константы скорости исходного сырья и реакций многокомпонентных систем. С учетом этих моделей проанализирована работа промышленных реакторных блоков установок гидроочистки и представлены новые варианты их перспективной реализации. Показано, что эти варианты позволят уменьшить количество катализатора в реакторах.

Ключевые слова

Дизельное топливо, процесс гидрообессеривания, математическое моделирование, дизельное сырье, константы скорости реакций, блоки промышленных реакторов.

Самойлов Наум Александрович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры нефтехимии и химической технологии, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Российская Федерация, 450062, Уфа, ул. Космонавтов, д. 1).

Samoylov N. A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Petrochemical and Chemical Technology, Ufa State Petroleum Technological University (Kosmonavtov st. 1, Ufa, 450062, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Математическое моделирование процесса гидроочистки дизельного топлива от сероорганических примесей / Н. А. Самойлов // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 3(10). С. 49 – 64.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-49-64

Please cite this article as:

Samoylov N. A. Mathematical modeling of the process of hydrotreating diesel fuel from organosulfur impurities. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 3(10), pp. 49 – 64.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-49-64

¹ Для переписки:

Email: naum.samoilow@yandex.ru

УДК 685.34.03

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-65-75

Исследование свойств обувных материалов с реконфигурируемой структурой

В. В. Костылева^{*1}, А. И. Карасева^{*}, О. Б. Коновалова^{*}, О. В. Сироткина^{*}

**Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия*

Аннотация

В процессе исследований установлено, что в аддитивном производстве решетчатые структуры — ключевая концепция. Они встречаются в природе и часто используются в технике из-за таких свойств, как высокое отношение жесткости к плотности и пространственно-изменяющееся поведение материала. На этом фоне из материалов с реконфигурируемой структурой для 3D-моделирования обуви привлекательными представляются ауксетики, некоторые из которых построены с использованием двумерных паттернов складывания на основе таких оригами-структур как «миура-ори» или «шаблон Рона Реша». Для проектирования подобных структур нужна определенная проектная среда. Для этого в работе рассмотрены инструменты параметрического проектирования с проектной логикой, позволяющей создавать алгоритмы объектов или процессов любой сложности. По результатам проведенного в работе анализа, выявлено, что таким требованиям в наибольшей степени отвечает среда 3D-проектирования Rhinoceros и язык визуального программирования Grasshopper. Разработанный ряд алгоритмов позволил реализовать 48 цифровых моделей реконфигурируемых поверхностей. В статье приводятся результаты физико-механических испытаний 4 из 48 моделей экспериментальных материалов. По результатам исследований 10 образцов экспериментальных материалов из фотополимера и ТПУ с 20, 50 и 100% заполнением ячеек каждого вида в форме двухсторонней лопатки толщиной 2.5–3.5 мм согласно ГОСТ Р 54553-2019 установлены: прочность при растяжении (Мпа); удлинение при разрыве (ε, %); плотность (г/см³); твердость по Шору (А). Проведенное сравнение результатов лабораторных исследований с показателями свойств материалов подошв, используемых в производстве АО «Егорьевск-обувь», позволило выявить, что показатели отдельных экспериментальных материалов близки к показателям плотности контрольной резины, подошвы ТЭП ANNA 2 (для сапог, ботинок, осень-весна), подошвы ф. JEANS — ТЭП (туфли или ботинки малодетские, девичьи, осень-весна), подошвы ТЭП туфель летних модели 322107-25, используемых на АО «Егорьевск-обувь».

Ключевые слова

3D-печать, фотополимер, ТПУ, физико-механические свойства, степень заполнения, размер ячеек, реконфигурируемая структура, детали обуви.

¹ Для переписки:

Email: kostyleva-vv@rguk.ru

Работы выполнялись в рамках научного проекта — гранта РФФИ в 2020–2022 гг., договор №20-38-90047/2020 «Параметрическое проектирование материалов с реконфигурируемой трехмерной структурой в производстве товаров народного потребления».

Введение

Сегодня обувная промышленность — это высокотехнологичное производство, активно применяющее системы автоматизированного проектирования обуви (САПРО), что положительно сказывается на его экономической эффективности. В обувной промышленности получили распространение САПРО, поддерживающие форматы 2D и 3D. Эти системы автоматизируют работу с конструктивной основой верха обуви, усредненной разверткой боковой поверхности колодки и разверткой следа обуви [1-3]. Аддитивные технологии охватывают все новые сферы деятельности человека: дизайнеры, архитекторы, медики и представители других профессий используют 3D-принтеры для реализации различных идей и проектов [4, 5].

При выборе метода 3D-печати и расходных материалов для применения в технологии производства обуви нужно руководствоваться задачами проектирования [6-9]. В проведенных нами экспериментах на АО «Егорьевск-обувь» для 3D-печати были использованы:

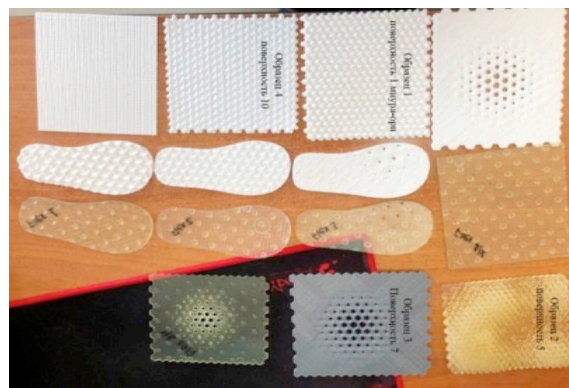
- оборудование (3D-принтеры): Flying Bear Tornado (FDM); Phrozen Mega 8k (фотополимеризация);
- материалы: ТПУ от Fdplast с диаметром прутка 1.75 мм (для FDM); Phrozen Aqua 4k — фотополимерная смола, HARZ Labs Industrial Flex — добавка к фотополимерной смоле для увеличения пластичности.

Экспериментальные исследования

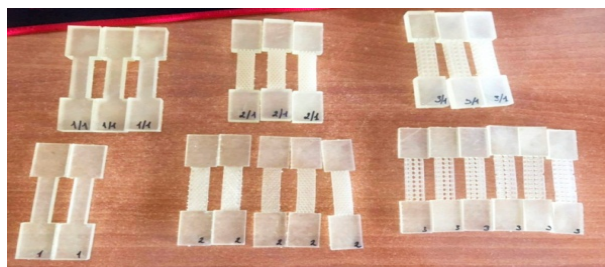
В испытательной лаборатории отдела контроля качества АО «Егорьевск-обувь» протестированы напечатанные 3D-образцы FDM (ТПУ и STL — фотополимер)

материалов с разными степенью заполнения и размером ячеек (рисунок 1а) четырех разработанных поверхностей [6].

Так как и экспериментальные, и расходные материалы сочетают в себе свойства резины и термоэластопластов, то есть предположительно это материалы для деталей низа обуви, для исследования их свойств и последующего анализа результатов из каждого вида поверхности было получено по 10 образцов в форме двухсторонней лопатки толщиной 2.5–3.5 мм (рисунок 1б) согласно ГОСТ Р 54553-2019 «Национальный стандарт Российской Федерации. Резина и Термоэластопласты. Определение упруго-прочностных свойств при растяжении» [10].



а)



б)

Рисунок 1 — Внешний вид поверхностей образцов (а); экспериментальные образцы материалов для лабораторных испытаний (б)

В ходе физико-механических испытаний установлены прочность при растяжении (МПа), удлинение при разрыве (ϵ , %), плотность (г/см^3) и твердость по Шору (А).

В таблице 1 в качестве примера приведены статистические показатели прочности при растяжении образцов поверхности 1 из фотополимера и ТПУ с различным заполнением ячеек. Статистические показатели прочности при растяжении, удлинения при разрыве (ϵ , %), плотности (г/см^3) и твердости по Шору (А) получены для всех образцов, принятых к испытаниям. Обратимся к анализу результатов

исследования. Для наглядности на рисунке 2 приведены гистограммы изменения прочности при растяжении образцов, принятых к исследованию.

Как видно из рисунка 2, к показателям прочности резины при растяжении максимально приближены образцы 1, 2, 4 из фотополимера со 100% заполнением ячеек и составляют:

- образец 1 (поверхность 1) фотополимер 100% заполнения — 16.034 МПа;
- образец 2 (поверхность 5) фотополимер 100% заполнения — 16.044 МПа;
- образец 4 (поверхность 10) фотополимер 100% заполнения — 16.025 МПа.

Таблица 1 — Статистические показатели прочности при растяжении (Мпа) образцов поверхности 1 из фотополимера и ТПУ с различным заполнением ячеек

Образцы	Материал	Размер ячейки, мм	Заполнение, %	Прочность при растяжении				
				Статистические показатели				
				Средняя арифметическая (M)	Медиана (Me)	Стандартное квадратичное отклонение (σ)	Коэффициент вариаций (Cv), %	Средняя ошибка средней арифметической (m)
Образец 1 (поверхность 1)	Фотополимер	2.5-3.5	100	15.79	16.0125	0.40	2.50	0.13
Образец 1 (поверхность 1)	Фотополимер	2.5-3.5	50	13.12	13.105	0.13	1.02	0.04
Образец 1 (поверхность 1)	Фотополимер	2.5-3.5	20	4.99	5.004	0.04	0.74	0.01
Образец 1 (поверхность 1)	ТПУ	2.5-3.5	100	14.26	14.3205	0.29	2.05	0.10
Образец 1 (поверхность 1)	ТПУ	2.5-3.5	50	9.22	9.224	0.03	0.32	0.01
Образец 1 (поверхность 1)	ТПУ	2.5-3.5	20	4.84	4.8395	0.04	0.84	0.01

Несколько пониженные показатели прочности резины при растяжении имеют:

- образец 3 (поверхность 7) из фотополимера со 100% заполнением ячеек;
- образец 2 (поверхность 5) из фотополимера с 50% заполнением ячеек и образец 3 (поверхность 7) из фотополимера с 50% заполнением ячеек, для которых они составляют:

- образец 3 (поверхность 7) из фотополимера со 100% заполнением ячеек — 12.948 МПа;
- образец 2 (поверхность 5) из фотополимера с 50% заполнением ячеек — 13.09 МПа;
- образец 3 (поверхность 7) фотополимер с 50% заполнением ячеек — 11.01 МПа.

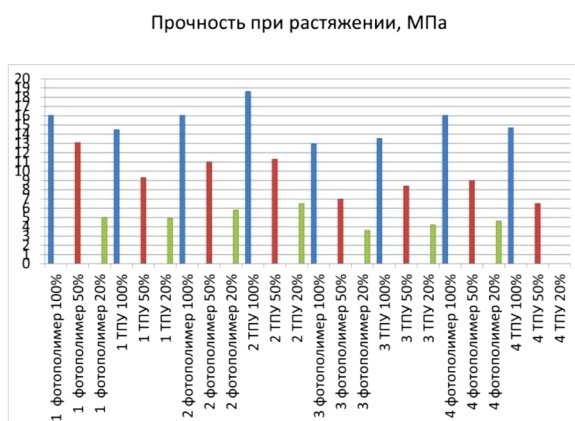


Рисунок 2 — Гистограмма распределения прочности при растяжении образцов из фотополимера и ТПУ при разной степени заполнения ячеек

Для образцов из ТПУ значения показателя прочности при растяжении существенно разнятся с показателями соответствующих образцов из фотополимера. Например:

- образец 1 (поверхность 1) из ТПУ при 100% заполнении показывает прочность при растяжении 14.479 МПа, что меньше прочности при растяжении образца 1 при 100% заполнении из фотополимера — 16.034 МПа. При 50% и 20% заполнении ячеек образца 1 (поверхность 1) из ТПУ показатели прочности при

растяжении также немного ниже, чем у образца 1 (поверхность 1) из фотополимера;

- образцы 2 (поверхность 5) из фотополимера и из ТПУ дают приблизительно равные показатели прочности при растяжении;

- образец 3 (поверхность 7) из ТПУ дает чуть более высокие показатели прочности при растяжении, чем образец 3 (поверхность 7) из фотополимера, при любом заполнении ячеек;

- образец 4 (поверхность 10) из ТПУ демонстрирует показатели прочности при растяжении чуть более низкие, чем образец 4 (поверхность 10) из фотополимера, при любом заполнении ячеек.

Таким образом, на прочность при растяжении влияет как заполнение ячеек, так и их пространственная конфигурация. Причем показатели прочности при растяжении для образцов из фотополимера при 100% заполнении ячеек ближе к аналогичным показателям резины.

На рисунке 3 отображены показатели удлинения при разрыве образцов из фотополимера и ТПУ при разной степени заполнения ячеек.

Как видно из рисунка 3, максимальные удлинения при разрыве демонстрируют образцы 1–4 из фотополимера с 50% заполнением ячеек, для которых показатели равны:

- образец 1 (поверхность 1) — 28.74%;
- образец 2 (поверхность 5) — 38.73%;
- образец 3 (поверхность 7) — 31.56%;
- образец 4 (поверхность 10) — 38.32%.

Таким образом, удлинение при разрыве прямо пропорционально проценту заполнения ячеек и зависит от их

пространственной конфигурации, отвечающей за сохранение формы образцов.

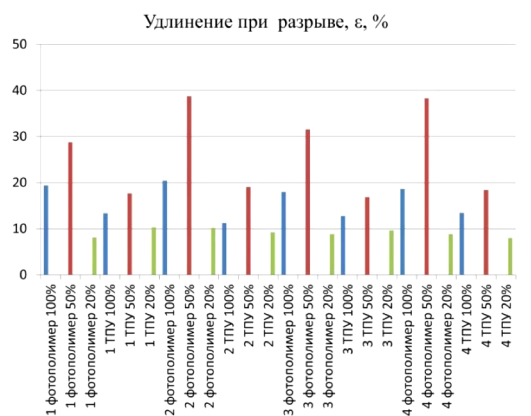


Рисунок 3 — Гистограмма распределения удлинения при разрыве образцов из фотополимера и ТПУ при разной степени заполнения ячеек

При 100% заполнении ячеек показатели удлинения при разрыве образцов 1–4 из фотополимера составляют соответственно:

- образец 1 (поверхность 1) — 19.37%;
- образец 2 (поверхность 5) — 20.43%;
- образец 3 (поверхность 7) — 17.97%;
- образец 4 (поверхность 10) — 18.67%;

При 20% заполнении ячеек наблюдается резкое снижение показателя:

- образец 1 (поверхность 1) фотополимер — 8.13%;
- образец 2 (поверхность 5) фотополимер — 10.22%;
- образец 3 (поверхность 7) фотополимер — 8.87%;
- образец 4 (поверхность 10) фотополимер — 8.86%.

Это означает, что при низком заполнении ячеек они становятся более хрупкими. У образцов из ТПУ наблюдается та же закономерность, но менее выраженная.

При 100% заполнении ячеек образцы демонстрируют пространственную стабильность и жесткость, при 50%

заполнении ячеек процент удлинения на разрыв несколько увеличивается, то есть ячейки перед разрывом проявляют незначительное удлинение, а при 20% заполнении ячеек наблюдается резкий спад показателя удлинения, то есть образцы становятся более хрупкими.

Можно сделать вывод, что структура в виде ячеек придает поверхностям пространственную стабильность, которая зависит не только от свойств расходного материала и степени заполнения его ячеек, но и от их конфигурации.

На рисунке 4 отображены показатели плотности образцов из фотополимеров и ТПУ при разной степени заполнения ячеек.

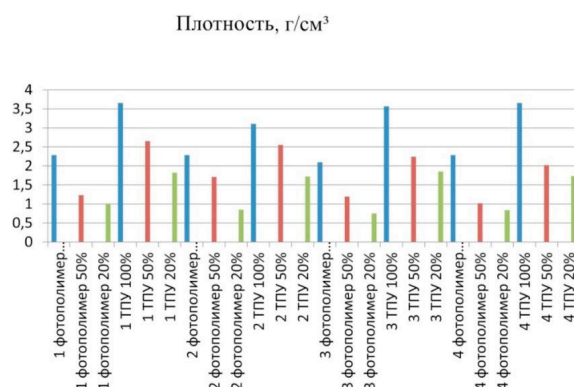


Рисунок 4 — Гистограмма распределения плотности образцов из фотополимеров и ТПУ при разной степени заполнения ячеек

Как видно из рисунка 4, показатели плотности, соответствующие ГОСТ Р 54553-2019, демонстрируют следующие образцы:

- образец 1 (поверхность 1) фотополимер 50% заполнения — 1.231 г/см³;
- образец 2 (поверхность 5) фотополимер 50% заполнения — 1.709 г/см³;
- образец 3 (поверхность 7) фотополимер 50% заполнения — 1.195 г/см³;
- образец 4 (поверхность 10) фотополимер 50% заполнения — 1.117 г/см³;
- образец 1 (поверхность 1) ТПУ 20% заполнения — 1.824 г/см³;

- образец 2 (поверхность 5) ТПУ 20% заполнения — 1.724 г/см³;
- образец 3 (поверхность 7) ТПУ 20% заполнения — 1.856 г/см³;
- образец 4 (поверхность 10) ТПУ 20% заполнения — 1.731 г/см³.

При увеличении степени заполнения ячеек показатели плотности пропорционально увеличиваются, причем у образцов из ТПУ они выше, чем у образцов из фотополимеров:

- образец 1 (поверхность 1) фотополимер 100% заполнения — 2.286 г/см³;
- образец 2 (поверхность 5) фотополимер 100% заполнения — 2.286 г/см³;
- образец 3 (поверхность 7) фотополимер 100% заполнения — 2.098 г/см³;
- образец 4 (поверхность 10) фотополимер 100% заполнения — 2.286 г/см³;
- образец 1 (поверхность 1) ТПУ 100% заполнения — 3.657 г/см³;
- образец 2 (поверхность 5) ТПУ 100% заполнения — 3.108 г/см³;
- образец 3 (поверхность 7) ТПУ 100% заполнения — 3.567 г/см³;
- образец 4 (поверхность 10) ТПУ 100% заполнения — 3.657 г/см³.

Для образцов с регулярной структурой решетки без градиента величины показатели немного выше. То есть значение плотности зависит не только от свойств расходного материала и процента заполнения его ячеек, но и от их пространственной конфигурации.

Обратимся к характеристике твердости по Шору образцов, принятых к исследованию. На рисунке 5 для сравнения отображены показатели твердости по Шору образцов из фотополимера и ТПУ при разной степени заполнения ячеек.

По результатам исследований установлено, что показатели твердости по Шору, соответствующие ГОСТ Р 54553-2019, демонстрируют следующие образцы:

- образец 1 (поверхность 1) фотополимер 50% заполнения — 83;
- образец 1 (поверхность 1) фотополимер 20% заполнения — 73;
- образец 1 (поверхность 1) ТПУ 20% заполнения — 52;
- образец 2 (поверхность 5) фотополимер 20% заполнения — 63;
- образец 2 (поверхность 5) ТПУ 50% заполнения — 74;
- образец 2 (поверхность 5) ТПУ 20% заполнения — 62;
- образец 3 (поверхность 7) фотополимер 20% заполнения — 72;
- образец 3 (поверхность 7) ТПУ 20% заполнения — 81;
- образец 4 (поверхность 10) фотополимер 50% заполнения — 73;
- образец 4 (поверхность 10) фотополимер 20% заполнения — 64;
- образец 4 (поверхность 10) ТПУ 20% заполнения — 78.

Твердость по Шору, А

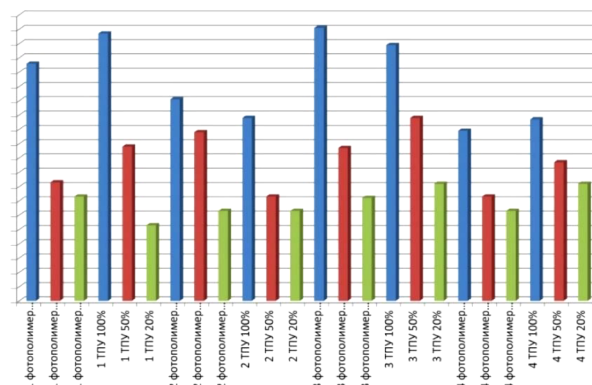


Рисунок 5 — Гистограмма распределения твердости по Шору образцов из фотополимеров и ТПУ при разной степени заполнения ячеек

При увеличении степени заполнения ячеек показатели твердости по Шору пропорционально увеличиваются, причем у образцов из ТПУ они выше, чем у образцов из фотополимеров, за исключением образца 3 поверхности 7.

Заключение

Разработанные алгоритмы — 48 цифровых моделей материалов призваны, с одной стороны, продемонстрировать возможности проектирования с помощью инструмента Grasshopper в среде RhinocerosCAD, с другой — показать, что при соблюдении технических требований к обору́дованию 3D-печати, допускающему использование определенных расходных материалов, они реализуемы на практике. Проведенные исследования свойств прототипов материалов позволяют дифференцировать их по назначению, то есть рекомендовать в данном случае для изготовления наружных, внутренних или промежуточных деталей низа. По показателям свойств всех 48 моделей материалов можно будет дать рекомендации по их использованию как для изготовления отдельных деталей, так и обуви в целом.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лабораторий 3D-печати, отдела контроля качества и лично генеральному директору АО «Егорьевск-обувь» Сорокину Сергею Викторовичу за предоставленную возможность проведения экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Бекк В. Г. Разработка математического обеспечения процесса проектирования обувной заготовки, формуемой на автоматизированных обтяжно-затяжных машинах: Дисс... канд. техн. наук. М., 1989, 230 с.

[2]. Бекк Н. В. Развитие теоретических и методологических основ формирования промышленных коллекций изделий из кожи с использованием информационных технологий: Дис. ... доктора технических наук. Москва, 2002, 450, 152 с.

[3]. Буй В. Х. Разработка метода получения антропометрических данных и

проектирования внутренней формы обуви с использованием цифровых и информационных технологий (На примере антропометрии вьетнамских школьников): Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2006. 200 с.

[4]. Коновалова О. Б., Костылева В. В. Экзоскелетон – роботизированный костюм будущего. *Материалы международного научно-исследовательского конкурса научно-практических работ студентов, аспирантов и сотрудников ВУЗов*, 2019, с. 20–29.

[5]. Коновалова О. Б., Костылева В. В., Федосеева Е. В. Особенности создания обуви с использованием 3D-технологий и 3D-печати. *Научный журнал «Костюмология»*. 2022, №1, Том 7. URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/04TLKL122.pdf>

[6]. Коновалова О.Б., Минец В.В., Бокова Е.С., Костылева В.В., Белицкая О. А., Полимерные материалы для 3D-печати и возможность их применения в обувном производстве: группа крупнотоннажных полимеров. *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*, 2022, № 2(398), с. 304–311.

[7]. Коновалова О.Б., Минец В.В., Бокова Е.С., Костылева В.В., Белицкая О. А., Полимерные материалы для 3D-печати и возможность их применения в обувном производстве: ассортимент пластмасс инновационной функциональности», *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*, 2021, № 5 (395), с. 262–267.

[8]. Konovalova O. B. and Yumashev E. M. 3D printing of individual shoes using natural fibers, Opportunities and Prospects/International Conference on Textile and Apparel Innovation (ICTAI 2021) <https://aip.scitation.org/toc/apc/2430/1?windowStart=50&size=50>

[9]. Коновалова О. Б., Костылева В. В. Моделирование и

прототипирование в легкой промышленности. *Сборник докладов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием «Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2021)»*, Ч. 1, с. 140–145.

[10]. ГОСТ Р 54553-2019 Национальный Стандарт Российской Федерации Резина и термоэластопласты. Определение упругопрочностных свойств при растяжении
<https://docs.cntd.ru/document/1200167688?ysclid=lpjcsn6ml8804585245>

Костылева Валентина Владимировна — д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой «Художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи», Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Карасева Алина Игоревна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи,, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Коновалова Ольга Борисовна — аспирант кафедры художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Сироткина Олеся Викторовна — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Study of the properties of footwear materials with reconfigurable structure

V. V. Kostyleva^{*1}, A. I. Karaseva^{*}, O. B. Konovalova^{*}, O. V. Sirotkina^{*}

^{}The Kosygin State University of Russia, Moscow, Russia*

Abstract

During our research, we found that lattice structures are a key concept in additive manufacturing. They occur naturally and are often used in engineering due to properties such as high stiffness-to-density ratio and spatially varying behavior of the material. Against this backdrop of reconfigurable materials, auxetics appear attractive for 3D shoe modeling, some of which are constructed using 2D folding patterns based on origami structures such as the "miura-ori" or "Ron Resch pattern". To design such structures, a specific design environment is needed. For this purpose, the work considers parametric design tools with design logic that allows to create algorithms for objects or processes of any complexity. According to the results of our analysis, the 3D design environment "Rhinoceros" and the visual programming language "Grasshopper" best meet these requirements. The developed series of algorithms made it possible to implement 48 digital models of reconfigurable surfaces. The article presents the results of physical and mechanical tests of 4 out of 48 models of experimental materials. Based on the results of studies of 10 experimental materials samples from photopolymer and TPU with 20, 50 and 100% filling of cells of each type in the form of a double-sided blade with a thickness of 2.5-3.5 mm according to GOST R 54553-2019, the following was established: strength at tensile strength (MPa); elongation at break (ϵ , %); density (g/cm^3); Shore hardness (A). A comparison of the results of laboratory studies with the indicators of sole materials used at Egoryevsk-Obuv JSC in production revealed that the indicators of individual experimental materials are close to the density indicators of control rubber, TEP ANNA 2 soles (for boots, shoes, autumn-spring season), soles f. JEANS — TEP (shoes or boots for children, women, autumn-spring season), TEP soles of summer shoes model 322107-25, used at Egoryevsk-Obuv JSC.

Keywords

3D printing, photopolymer, TPU, physical and mechanical properties, filling degree, cell size, reconfigurable structure, shoe parts.

The work was carried out within the framework of a scientific project — the grant from the Russian Foundation for Basic Research in 2020–2022, contract No. 20-38-90047/2020 “Parametric design of materials with a reconfigurable three-dimensional structure in the production of consumer goods”

¹ Corresponding author:
Email: kostyleva-vv@rguk.ru

REFERENCES

- [1]. Bekk V. G. Razrabotka matematicheskogo obespecheniya processa proektirovaniya obuvnoy zagotovki, formuemoj na avtomatizirovannyh obtjazhnozatzhzhnyh mashinah [Development of mathematical support for the design process of shoe blanks molded on automated stretching machines]: PhD thesis, Moscow, 1989, 230 p. (In Russ.)
- [2]. Bekk N. V. Razvitie teoreticheskikh i metodologicheskikh osnov formirovaniya promyshlennyykh kollekcij izdelij iz kozhi s ispol'zovaniem informacionnykh tehnologij: PhD thesis [Development of theoretical and methodological foundations for the formation of industrial collections of leather goods using information technologies], Moscow, 2002. 450 p. (In Russ.)
- [3]. Buj V. H. Razrabotka metoda poluchenija antropometricheskikh dannyh i proektirovaniya vnutrennej formy obuvi s ispol'zovaniem cifrovyyh i informacionnykh tehnologij (Na primere antropometrii v'etnamskikh shkol'nikov) [Development of a method for obtaining anthropometric data and designing the internal shape of shoes using digital and information technologies (On the example of anthropometry of Vietnamese schoolchildren)]: PhD thesis, Moscow, 2006. 200 p. (In Russ.)
- [4]. Konovalova O. B., Kostyleva V. V. Jekzoskeleton — robotizirovannyj kostjum budushhego [Exoskeleton - robotic suit of the future]. *Materialy mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa nauchno-prakticheskikh rabot studentov, aspirantov i sotrudnikov VUZov* [Materials of the international research competition of scientific and practical works of students, graduate students and university staff], 2019, pp. 20–29. (In Russ.)
- [5]. Konovalova O. B., Kostyleva V. V., Fedoseeva E. V. Osobennosti sozdaniya obuvi s ispol'zovaniem 3D-tehnologij i 3D-pechati [Features of creating shoes using 3D technologies and 3D printing]. *Nauchnyj zhurnal «Kostjumologija» [Scientific journal "Costumeology"]*. 2022, №1, vol. 7. URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/04TLKL122.pdf> (In Russ.)
- [6]. Konovalova O. B., Minets V. V., Bokova Ye. S., Kostyleva V. V., Belitskaya O. A. Polimernyye materialy dlya 3D — pečati i vozmozhnost' ikh primeneniya v obuvnom proizvodstve: gruppа krupnotonnazhnykh polimerov. [Polymer materials for 3D printing and the possibility of their use in shoe production: a group of large-capacity polymers] *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [Textile Industry Technology. Series: "Proceedings of Higher Educational Institutions"], № 2 (398), 2022, p. 304–311. (In Russ.)
- [7]. Konovalova O. B., Minets V. V., Bokova Ye. S., Kostyleva V. V., Belitskaya O. A. Polimernyye materialy dlya 3D-pechati i vozmozhnost' ikh primeneniya v obuvnom proizvodstve: assortiment plastmass innovatsionnoy funktsional'nosti [Polymer materials for 3D printing and the possibility of their use in shoe production: a range of plastics with innovative functionality], *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [Textile Industry Technology. Series: "Proceedings of Higher Educational Institutions"], № 5(395), 2021, pp. 262–267. (In Russ.)
- [8]. Konovalova O. B. and Yumashev E. M. 3D printing of individual shoes using natural fibers, Opportunities and Prospects/International Conference on Textile and Apparel Innovation (ICTAI 2021) <https://aip.scitation.org/toc/apc/2430/1?windowStart=50&size=50> (In Russ.)
- [9]. Konovalova O. B., Kostyleva V. V. Modelirovanie i prototipirovanie v legkoj

promyshlennosti. [Modeling and prototyping in light industry] Sbornik докладov Vserossijskoj nauchnoj konferencii molodyh issledovatelej s mezhdunarodnym uchastiem «Innovacionnoe razvitie tehniki i tehnologij v promyshlennosti (INTEKS-2021)» [Collection of reports of the All-Russian Scientific Conference of Young Researchers with International Participation “Innovative Development of Engineering and Technologies in Industry (INTEX-2021)” Part 1], pp. 140–145. (In Russ.)

[10]. GOST R 54553-2019 NACIONAL'NYJ STANDART ROSSIJSKOJ FEDERACII Rezina i termoplastoplasty. Opreделение uprugoprochnostnyh svojstv pri rastjazhenii. [NATIONAL STANDARD OF THE RUSSIAN FEDERATION Rubber and thermoplastic elastomers. Determination of elastic-strength properties under tension] <https://docs.cntd.ru/document/1200167688?ysclid=lpjcsn6ml8804585245> (In Russ.)

Kostyleva V. V. — Dr. Sc. (Eng.), Head of Department of Art Modeling, Design and Technology of Leather Products, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Karaseva A. I. — Cand.Sc. (Tech.), Assoc. Professor, Associate Professor of the Department of Artistic Modeling, Design and Technology of Leather Products, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Konovalova O. B. — Postgraduate student, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Sirotkina O. V. — Cand.Sc. (Tech.), Senior Lecturer at the Department of Artistic Modeling, Design and Technology of Leather Products, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Исследование свойств обувных материалов с реконфигурируемой структурой / В. В. Костылева, А. И. Карасева, О. Б. Коновалова, О. В. Сироткина // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 3(10). // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 1(8). С. 65 – 75.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-65-75

Please cite this article as:

Kostyleva V. V., Karaseva A. I., Konovalova O. B., Sirotkina O. V. Study of the properties of footwear materials with reconfigurable structure. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 3(10),. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 1(8). pp. 65 – 75.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-65-75

УДК 658.264

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-76-87

Современные теплоаккумулирующие системы горячего водоснабжения

Л. И. Жмакин*, Н. М. Шарпар^{*,1}, А. Н. Сорокин*, И. Н. Власов*,
А. Д. Васильева*

**Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия*

Аннотация

Статья посвящена теплотехническому расчету паровых подогревателей-аккумуляторов, широко применяемых в системах горячего водоснабжения промышленных и коммунальных объектов. В основе исследования лежит математическая модель, предназначенная для определения основных характеристик рассматриваемых аппаратов. С использованием предложенного алгоритма проведены теплотехнические расчеты для шести типоразмеров подогревателей серии ВПЕ, выпускаемых Саратовским заводом энергетического машиностроения. Результаты расчетов представлены в графической форме, что обеспечивает наглядное восприятие для потребителей и обслуживающего персонала. Исследование охватывает аспекты эффективности и регулирования расхода пара в зависимости от различных параметров, таких как температура насыщенного водяного пара и температура нагреваемой воды. Полученные данные могут служить основой для оптимизации проектирования и эксплуатации паровых подогревателей, обеспечивая более энергоэффективное и устойчивое функционирование систем горячего водоснабжения. Данная статья вносит вклад в область теплотехники и инженерии горячего водоснабжения, предоставляя новые подходы и данные для разработки современных и эффективных систем теплоснабжения.

Ключевые слова

Теплотехнический расчет, математическая модель, водоснабжение, теплообмен, аккумулярование, теплоотдача, регулирование расхода пара.

Введение

Среди современных инженерных и технических разработок важную роль в обеспечении эффективного и надёжного горячего водоснабжения для промышленных и коммунальных объектов играют теплотехнические системы, такие как паровые подогреватели-аккумуляторы. Эти системы являются неотъемлемой частью инфраструктуры, обеспечивая

оптимальные условия теплоснабжения и обеспечивая потребителей тепловой энергией [1-3].

В данной статье представлена математическая модель, разработанная для теплотехнического расчета паровых подогревателей-аккумуляторов, предназначенных для использования в системах горячего водоснабжения. Разработка модели направлена на достижение оптимальной

¹ Для переписки:

Email: sharpar753@mail.ru

эффективности и надёжности данных подогревателей, что является ключевым вопросом в современном инженерном проектировании [2, 3].

На предприятиях в качестве источника тепла часто используется собственная котельная, производящая насыщенный или перегретый водяной пар. В случае систем горячего водоснабжения (ГВС) с резкими изменениями суточной тепловой нагрузки можно применять ёмкостные подогреватели-аккумуляторы. Эти устройства выполняют функцию передачи тепла и одновременно накапливают его. Кроме того, они могут служить резервуарами для хранения жидкостей и выдачи их по графику, установленному потребителем.

Ёмкостные теплообменники предназначены для работы в различных режимах, как стационарных, так и нестационарных [4, 5]. Например, водоподогреватели серии ВПЕ от ОАО «Сарэнергомаш» являются кожухотрубными устройствами горизонтального типа с рабочим объемом до 4 м³ [6]. В этих устройствах горячий теплоноситель (насыщенный пар с давлением до 0.7 МПа или горячая вода с начальной температурой 95 °С) подается в трубный пучок, а холодная вода поступает

в нижнюю часть корпуса, вытесняя нагретую воду из аппарата (рисунок 1) [6, 7]. Корпус водоподогревателя установлен с уклоном 1:100 в сторону спускного патрубка и обеспечен теплоизоляцией.

Теплообменник ВПЕ представляет собой горизонтальный кожухотрубный подогреватель, который состоит из сварного цилиндрического корпуса из листовой стали, а также переднего и заднего днища и греющего U-образного трубчатого змеевика, изготовленного методом штамповки.

Горячая вода поступает в корпус через нижний патрубок и выходит для использования через верхний. Рабочий объем водоподогревателя определяется объемом воды, находящейся выше змеевика. Для каждого размера ВПЕ установлена определенная площадь поверхности змеевика, обеспечивающая нагрев рабочего объема воды от 5 до 75 °С в течение одного часа при рабочем давлении пара до 0.5 МПа.

Также в комплект подогревателя входит арматура и контрольно-измерительные приборы: манометр с трехходовым краном, термометр в оправе и предохранительный клапан. Для слива воды предусмотрен специальный спускной патрубок с запорным вентилем.

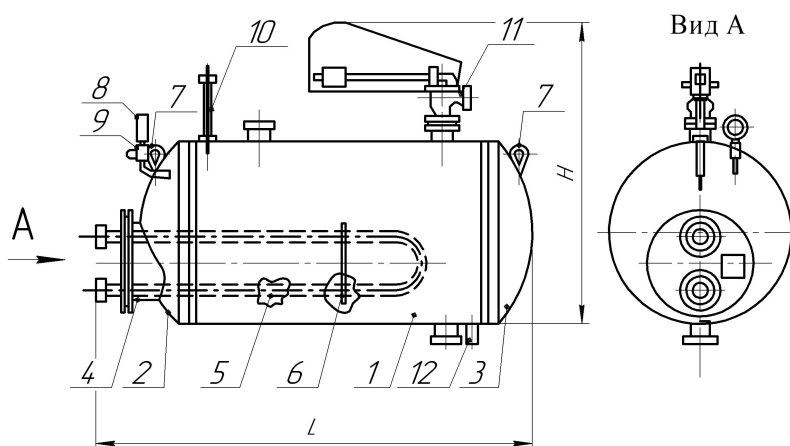


Рисунок 1 — Схема подогревателя-аккумулятора для системы ГВС:

1 — корпус; 2 — переднее днище; 3 — заднее днище; 4 — горловина с присоединительным фланцем; 5 — змеевик; 6 — уголок с рамкой; 7 — уши; 8 — манометр; 9 — трехходовой кран; 10 — термометр в оправе; 11 — предохранительный клапан

Таблица 1 — Технические данные водонагревателей типа ВПЕ

№ п/п	Марка	Объем воды, л	$F, \text{м}^2$	$d_n, \text{мм}$	$\delta, \text{мм}$	n_T	$l, \text{м}$
1	ВПЕ-0,4	400	0.475	33.5	3.2	2	0.9
2	ВПЕ-0,64	640	0.76	33.5	3.2	2	1.567
3	ВПЕ-1	1000	1.30	48	3.5	3	1.127
4	ВПЕ-1,6	1500	2.06	48	3.5	3	1.906
5	ВПЕ-2,5	2500	3.16	48	3.5	4	2.193
6	ВПЕ-4	4000	4.87	48	3.5	4	3.693

Значительным преимуществом ёмкостных подогревателей по сравнению с проточными является их более низкая поверхность нагрева, что приводит к уменьшению тепловой мощности. Эта мощность рассчитывается исходя из среднесуточной нагрузки системы ГВС [8, 9]. Помимо этого, теплообменники ёмкостного типа также применяются в системах электро-теплоаккумуляции (ЭТА) для теплоснабжения. Такие системы выполняют важную функцию потребителей-регуляторов [10], которые выравнивают суточный график нагрузки электрических систем, потребляя электроэнергию только в период ночных провалов нагрузки.

Характеристики аккумуляторов-подогревателей определяются несколькими ключевыми параметрами. В первую очередь это объем воды V в аккумуляторе (л), который играет важную роль в определении его производительности. Другим существенным параметром является расчетная поверхность теплообмена F , измеряемая по наружному обмеру трубок (м^2). Наружный диаметр d_n и толщина δ стенок трубок (мм) также важны для эффективности теплопередачи. Кроме того, технические характеристики включают в себя информацию о числе трубок n_T и их длине l в змеевике. Для более подробного ознакомления с техническими характеристиками водонагревателей серии ВПЕ информация представлена в таблице 1 [6, 7].

Материалы и методы решения задач, принятые допущения

Рассмотрим математическую модель, предназначенную для расчета парового подогревателя-аккумулятора.

В аппаратах, работающих по периодическому принципу, процесс нагрева воды осуществляется в нестационарном режиме. В связи с этим при разработке их математической модели применяются дифференциальные уравнения теплового баланса и теплопередачи для определенных временных интервалов dt и температур нагрева dt . Основная задача расчета заключается в определении среднего времени, необходимого для разогрева воды до заданной температуры, а также в вычислении среднего расхода пара за цикл подогрева водопроводной воды. Кроме того, необходимо построить графики, отражающие регулирование расхода водяного пара в течение цикла, что представлено в виде количественного графика регулирования расхода водяного пара [10–13].

Отметим, что при реальной эксплуатации аппарата происходят тепловые потери в окружающую среду. В литературе [11, 12] отмечается, что учет этого воздействия возможен, однако при этом расчетные формулы становятся более сложными. Тепловые потери приводят к снижению температуры разогреваемой воды. Это аналогично тому, что в подогревателе действуют два удельных тепловых потока. Первый поток, обозначенный как q_1 ,

характеризует передачу тепла от движущегося пара к внутренней стенке трубы, в то время как второй поток, обозначенный как q_2 , представляет собой передачу тепла от внутренней стенки трубы к нагреваемой воде. Значения q_1 и q_2 неодинаковы, поскольку часть тепла q_1 теряется в окружающую среду. В дальнейших расчетах будем считать, что

$$q_2 = \eta_{\text{ТО}} \cdot q_1, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{ТО}}$ — коэффициент тепловой эффективности изоляции.

Запишем тепловые потоки в следующем виде:

$$q_1 = \bar{\alpha}_1 \frac{d_{\text{ВН}}}{d_{\text{Н}}} (t_{\text{С}} - t_{\text{СТ1}}), \quad (2)$$

$$q_2 = \frac{t_{\text{СТ1}} - t}{R_{31} + R_{\text{СТ}} + R_{32} + 1/\bar{\alpha}_2}, \quad (3)$$

где $\bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2$ — средние коэффициенты теплоотдачи со стороны пара и нагреваемой воды, $d_{\text{ВН}} = d_{\text{Н}} - 2\delta$ — внутренний диаметр трубок, $t_{\text{С}}, t$ — температуры пара на линии насыщения и нагреваемой воды, $t_{\text{СТ1}}, t_{\text{СТ2}}$ — температура внутренней и наружной стенок труб, $R_{\text{СТ}} = \frac{d_{\text{Н}}}{2\pi\lambda_{\text{СТ}}} \ln\left(\frac{d_{\text{Н}}}{d_{\text{ВН}}}\right)$, R_{31}, R_{32} — термическое сопротивление стенки труб, термическое сопротивление загрязнений со стороны водяного пара и нагреваемой воды, $\lambda_{\text{СТ}}$ — коэффициент теплопроводности материала стенки труб.

Рассмотрим вычислительные зависимости для определения среднего коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}_1$ со стороны конденсирующегося пара. Согласно исследованиям [8], процесс теплообмена при конденсации пара, движущегося внутри трубы, представляет собой более сложный механизм по сравнению с теплообменом при конденсации неподвижного пара.

В процессе движения пара вдоль трубы происходит постепенная конденсация и на внутренних стенках трубы образуется плёнка конденсата, находящаяся в динамическом взаимодействии с паром.

Под воздействием силы тяжести плёнка конденсата стекает вниз по внутренней поверхности трубы, при этом конденсат постепенно накапливается в трубе. К этому движению добавляется движение конденсата в продольном направлении под воздействием потока пара. Все эти факторы приводят к переменному коэффициенту теплоотдачи вдоль периметра трубы: в верхней части коэффициент выше, чем в нижней.

При тепловых нагрузках $q < 10^5$ Вт/м², воздействующих на характер движения конденсатной пленки, силы тяжести оказывают влияние и закономерности теплоотдачи остаются недостаточно изученными. В связи с этим далее рассматривается турбулентный режим движения пленки конденсата. Расчет коэффициента теплоотдачи в этих условиях выполняется по формуле, полученной в результате теоретического анализа с использованием аналогии Рейнольдса, применимой в диапазоне давлений, превышающих 5 бар:

$$\alpha_1 = \alpha_1^0 \sqrt{\frac{\rho'}{\bar{\rho}}}, \quad (4)$$

где α_1^0 — коэффициент теплоотдачи при турбулентном движении пленки конденсата с расходом, равным расходу пара, Вт/(м²·К), $\rho', \bar{\rho}$ — плотность конденсата и средняя плотность парожидкостной смеси в рассматриваемом сечении трубы.

Формула (4) предоставляет возможность вычислить локальный коэффициент теплоотдачи в заданном поперечном сечении трубы. Для получения среднего коэффициента теплоотдачи используется среднее арифметическое значение α_1 во входном и выходном поперечных сечениях трубы. В дальнейшем предположим, что в трубную систему поступает насыщенный или слабоперегретый водяной пар, что соответствует условию $\rho'/\bar{\rho} = \rho'/\rho''$ (отношение плотностей конденсата и сухого

насыщенного водяного пара). На выходе из трубок происходит полная конденсация водяного пара, следовательно, $\rho'/\bar{\rho} = 1$. Тогда средний коэффициент теплоотдачи со стороны пара может быть выражен как:

$$\bar{\alpha}_1 = 0,5\bar{\alpha}_{10}(1 + \sqrt{\rho'/\rho''}). \quad (5)$$

Коэффициент теплоотдачи при турбулентном течении однофазной жидкости, согласно [13], определяется по формуле

$$\bar{\alpha}_{10} = 0,021 \frac{\lambda_1}{d_{\text{вн}}} \text{Re}_{10,8} \text{Pr}_{10,43} \varepsilon_{t1}, \quad (6)$$

где λ_1 — коэффициент теплопроводности конденсата, $\text{Re}_1 = \frac{w_1 \cdot d_{\text{вн}}}{\nu_1}$ — число Рейнольдса, w_1 — скорость конденсата внутри труб, ν_1 — коэффициент кинематической вязкости конденсата, Pr_1 — число Прандтля конденсата, $\varepsilon_{t1} = (\frac{\text{Pr}_1}{\text{Pr}_{\text{ст1}}})^{0,25}$ — поправка на неизомеричность, $\text{Pr}_{\text{ст1}}$ — число Прандтля конденсата при температуре внутренней стенки труб.

В уравнении (6) не учтено изменение коэффициента теплоотдачи вдоль длины трубы, поскольку в реальных условиях соотношение длины трубы к ее внутреннему диаметру соответствует условию $l/d_{\text{вн}} > 50$. Чтобы рассчитать число в данном контексте, скорость конденсата для расчета числа Re_1 можно выразить через расход пара с использованием уравнения неразрывности;

$$w_1 = \frac{4D}{\pi d_{\text{вн}}^2 \rho' n_T}. \quad (7)$$

Используя (6) и (7), уравнение (5) можно записать в виде

$$\bar{\alpha}_1 = K_0 K_1 \frac{D^{0,8}}{\text{Pr}_{\text{ст1}}^{0,25}}, \quad (8)$$

где $K_0 = 0,021 \frac{\lambda_1}{2} (\frac{4}{\pi \mu_1})^{0,8} \text{Pr}_{10,68} (1 + \frac{\rho'}{\rho''})$ — теплофизический комплекс пара, $K_1 = \frac{1}{d_{\text{вн}}^{1,8} n_T^{0,8}}$ — геометрический комплекс. Введение этих комплексов упрощает решение поставленной задачи.

Рассмотрим процесс теплообмена со стороны нагреваемой воды, находящейся в

баке. Тепло поступает в воду за счет конденсации движущегося пара, что приводит к теплоотдаче в результате свободной конвекции. Критерии Прандтля и Архимеда являются определяющими характеристиками для этого процесса теплообмена, а соответствующее уравнение подобия в данном случае представлено [13]

$$\bar{Nu}_2 = c (\text{Ar}_2 \cdot \text{Pr}_2)^n \varepsilon_{t2}, \quad (9)$$

где $\bar{Nu}_2 = \frac{\bar{\alpha}_2 d_{\text{н}}}{\lambda_2}$ — критерий Нуссельта, $\text{Ar}_2 = \frac{|\rho_{\text{ст2}} - \rho_2| \cdot g \cdot d_{\text{н}}^3}{\rho_2 \nu_{22}}$ — критерий Архимеда, $\bar{\alpha}_2$ — средний коэффициент теплоотдачи нагреваемой воды, λ_2 — коэффициент теплопроводности воды, ρ_2 и $\rho_{\text{ст2}}$ — плотность воды при температуре t и при температуре наружной поверхности труб, ν_2 — коэффициент кинематической вязкости воды при температуре t , Pr_2 — число Прандтля воды при температуре t , $\varepsilon_{t2} = (\frac{\text{Pr}_2}{\text{Pr}_{\text{ст2}}})^{0,25}$ — поправка на неизомеричность, c, n — эмпирические коэффициенты.

В формуле (9) выделим теплофизический и геометрический комплексы, тогда

$$\bar{\alpha}_2 = K_2 K_3 \frac{(|\rho_2 - \rho_{\text{ст2}}|)^n}{\text{Pr}_{\text{ст2}}^{0,25}}, \quad (10)$$

где $K_2 = c \cdot \lambda_2 (\frac{g \cdot \text{Pr}_2}{\rho_2 \nu_{22}})^n \text{Pr}_{20,25}$ — теплофизический комплекс нагреваемой воды, $K_3 = \frac{1}{d_{\text{н}}^{1-3 \cdot n}}$ — геометрический комплекс.

При проведении расчетов необходимо знать среднюю температуру нагреваемой воды $\bar{t}$, которая определяется по формуле

$$\bar{t} = t_s - \Delta t, \quad (11)$$

где $\Delta t = \frac{t_{\text{г}} - t_{\text{х}}}{\ln(\frac{t_{\text{с}} - t_{\text{х}}}{t_{\text{с}} - t_{\text{г}}})}$ — средний логарифмический температурный напор.

При установленной температуре пара на входе в подогреватель t_s и рассчитанной средней температуре нагреваемой воды $\bar{t}$ из таблицы 2 определяются фактические значения комплексов K_0 и K_2 . Для вычисления коэффициентов теплоотдачи

со стороны пара и со стороны воды с использованием формул (8) и (10) требуется знание температур внутренней $t_{ст1}$ и внешней $t_{ст2}$ стенок трубы. Данные температуры определяют соответствующие значения $Pr_{ст1}$, $Pr_{ст2}$, $\rho_{ст2}$. Температуры стенок трубы остаются неизвестными, однако известен диапазон температур $\bar{t} \dots t_s$, в пределах которого находятся температуры стенок. Установив выбранные значения температуры $t_{ст2}$ и ссылаясь на таблицы [14], определяем соответствующие значения $Pr_{ст2}$, $\rho_{ст2}$. Это, в свою очередь, позволяет вычислить коэффициент теплоотдачи со стороны нагреваемой воды $\bar{\alpha}_2$ и плотность теплового потока, используя формулу

$$q_2 = \bar{\alpha}_2(t_{ст2} - \bar{t}). \quad (12)$$

По значению q_2 определяется температура внутренней стенки трубы:

$$t_{ст1} = t_{ст2} + q_2(R_{31} + R_{ст} + R_{32}). \quad (13)$$

Для вычисления расхода пара D , включенного в уравнение (8), выразим уравнения тепловой нагрузки подогревателя на элемент времени $d\tau$:

$$dQ = D \cdot (h_{п} - h_{к}) \cdot d\tau, \quad (14)$$

$$dQ = q_1 \cdot F \cdot d\tau, \quad (15)$$

$$dQ = \frac{M \cdot C_p}{\eta_{то}} dt, \quad (16)$$

где dQ — тепловая нагрузка аппарата, Дж, D — массовый расход водяного пара, кг/с, $h_{п}$, $h_{к}$ — энтальпия водяного пара на входе в трубную систему и конденсата на выходе из нее (считается, что пар полностью конденсируется), Дж/кг, F — поверхность теплообмена подогревателя, м², M — масса воды, кг, C_p — средняя теплоёмкость воды.

Из уравнений (14), (15) расход пара определяется зависимостью

$$D = F \frac{q_1}{h_{п} - h_{к}}. \quad (17)$$

Исходя из температуры $t_{ст1}$ для пленки конденсата определяется значение $Pr_{ст1}$ и коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}_1$ со стороны движущегося пара с использованием формулы (8). Полученное значение $\bar{\alpha}_1$ позволяет вычислить плотность теплового потока q_1 при заданной температуре стенки $t_{ст2}$ согласно формуле (2). В процессе работы подогревателя выполняется условие, представленное формулой (1), то есть при использовании нескольких значений $t_{ст2}$ это условие соответствует точке пересечения зависимостей $\eta_{то} \cdot q_1(t_{ст2})$ и $q_2(t_{ст2})$. Параметры этой точки могут быть определены, например, методом половинного деления с использованием компьютерной программы. После нахождения q_1 определяется средний расход пара за время нагрева воды по формуле (17).

Температура нагреваемой воды на выходе из подогревателя поддается влиянию времени разогрева, обозначенного как $t = f(\tau)$. Считается, что цикл нагрева воды завершается, когда температура воды достигает установленного значения, равного температуре горячей воды в точках водоразбора $t = t_{г}$. Из уравнения (16) вычисляется количество тепла, необходимое для нагрева воды в водопроводе:

$$Q = \frac{M \cdot C_p}{\eta_{то}} (t_{г} - t_{х}). \quad (18)$$

В свою очередь, время, необходимое для нагрева, рассчитывается из уравнения (15)

$$\tau_{к} = \frac{Q}{q_1 F}. \quad (19)$$

Путем варьирования значений температуры пара t_s мы можем вывести зависимости $\tau_{к}(t_s)$ и $D(t_s)$, которые определяют время, необходимое для разогрева водопроводной воды, а также средний расход пара, требуемый для завершения цикла нагрева водопроводной воды для определенного типа подогревателя. Уравнения (17) — (19) разработаны с

предположением, что значения q_1, D представляют собой средние значения в течение периода нагрева водопроводной воды. Однако при таком подходе невозможно получить характеристики, описывающие качественные изменения в регулировании расхода пара. В реальности величины q_1, D , а также температура на выходе из подогревателя являются функциями времени нагрева водопроводной воды. Решение этой задачи может быть достигнуто путем просмотра пространства переменных с фиксированным шагом. Из уравнений (15) и (16) можно вывести уравнение, определяющее зависимость $t = f(\tau)$:

$$\frac{dt}{d\tau} = \eta_{\text{то}} \cdot \frac{F}{M \cdot C_p} \cdot q_1. \quad (20)$$

Применение уравнения (20) представляет собой неудобство, поскольку для определения плотности теплового потока необходимо учитывать не только время, но и температуру нагреваемой воды. В этом контексте более удобной для практической реализации может быть формула

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{M \cdot C_p}{\eta_{\text{то}} \cdot F} \cdot \frac{1}{q_1}. \quad (21)$$

Из уравнения (20) вытекает, что зависимость $t = f(\tau)$ обусловлена исключительно плотностью теплового потока. Решение уравнения (21), принадлежащего к классу обыкновенных дифференциальных уравнений и играющего ключевую роль в анализе динамических состояний разрабатываемого объекта, возможно с использованием методов численного интегрирования.

Для формирования дискретной модели области определения функции представляется необходимым задать число n и разделить интервал температур нагреваемой воды на n равных частей. Закодированные полученные узловые точки присваиваются переменной i , принимающей значения от 0 до n . В процессе вычислений

текущее значение температуры нагреваемой воды определяется согласно формуле

$$t_i = t_{i-1} + h_T, \quad (22)$$

где $h_T = \frac{t_{\Gamma} - t_X}{n}$ — шаг изменения температуры воды, если $i=0$, следует принять $t_0 = t_X$.

Интервал изменения тепловой нагрузки подогревателя характеризуется постоянным шагом, обозначаемым как $\Delta Q = Q/n$. Необходимо вычислить температурный напор для каждой узловой точки:

$$\Delta t = t_s - t_i, \quad (23)$$

вместо использования температуры $\bar{t}$, принято рассматривать температуру t_i . Узловые точки обозначаются значениями q_{1i}, D_i . Шаг по времени для любого заданного интервала разбиения можно вычислить, применяя уравнение (15). Для этой цели можно воспользоваться одним из методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений, таким как модифицированный метод Эйлера:

$$\Delta \tau_i = \frac{\Delta Q}{2 \cdot F} \left(\frac{1}{q_{1,i-1}} + \frac{1}{q_{1,i}} \right). \quad (24)$$

Время разогрева водопроводной воды определяется суммированием полученных значений $\Delta \tau_i$, то есть $\tau_K = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta \tau_i$. Средний расход водяного пара в течение цикла нагрева водопроводной воды, используя уравнение (14), вычисляется следующей формулой:

$$\bar{D} = \frac{Q}{(h_{\text{п}} - h_{\text{к}}) \cdot \tau_K}. \quad (25)$$

Результаты

Согласно исследованию, представленному в [13], в вычислениях принимается наружный диаметр труб d_H в качестве определяющего размера канала, а эмпирические коэффициенты c, n для диапазона $\text{Ar}_2 \cdot \text{Pr}_2 = 10^3 \dots 10^8$ устанавливаются на уровне 0.5 и 0.25 соответственно. В силу сложности поставленной задачи решение проводится с использованием

компьютерных вычислений. Начальный блок данных включает в себя характеристики водонагревателей-аккумуляторов (значения V, F, d_H, δ, n_T). Это позволяет выполнить расчет геометрических комплексов K_1, K_3 .

Характеристики нагреваемой воды представлены в блоке значений $t, \rho_2, \lambda_2, v_2, Pr_2$. Для водяного пара исходные данные включают значения $t_s, h_{п}, h_k, v', v''$. Кроме того, дополнительно вводятся температуры холодной водопроводной воды t_x , температура горячей воды t_r , поступающей к потребителям теплоты, $\lambda_{ст}, R_{31}, R_{32}$. При отсутствии данных о значениях тепловых сопротивлений загрязнений их можно считать равными нулю. Имея в распоряжении сведения о свойствах пара и нагреваемой воды, мы можем вычислить теплофизические комплексы K_0, K_2 . Полученные результаты расчетов представлены в таблице 2 [14].

Таблица 2 — Результаты расчета теплофизических комплексов K_0 и K_2

Конденсат		Конденсат		Нагреваемая вода	
$t_s, ^\circ\text{C}$	K_0	$t_s, ^\circ\text{C}$	K_0	$t, ^\circ\text{C}$	K_2
120	270.3	190	122.9	0	241.4
130	238.1	200	114.1	10	244.6
140	211.1			20	249.5
150	187.3			30	256.9
160	167.6			40	255.0
170	151.7			50	257.2
180	132.7			60	259.7

Результаты расчета в виде зависимостей $\tau_k(t_s)$ и $\bar{D}(t_s)$ для различных марок аккумуляторов представлены на рисунках 2 и 3.

В случае необходимости на основании этих данных возможно построение графиков регулирования расхода пара в виде зависимостей $D_i/\bar{D} = f(\tau_i/\tau_k)$.

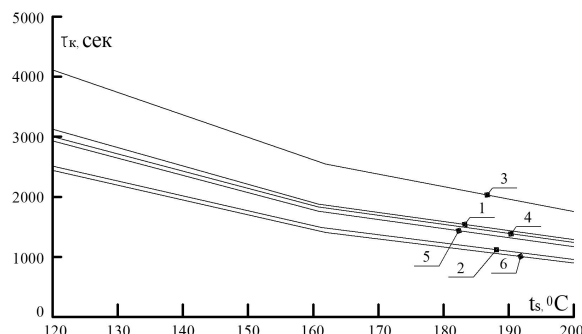


Рисунок 2 — Зависимость времени разогрева водопроводной воды 5...60 °С от температуры насыщенного водяного пара для 6 типоразмеров подогревателей серии ВПЕ (таблица 1)

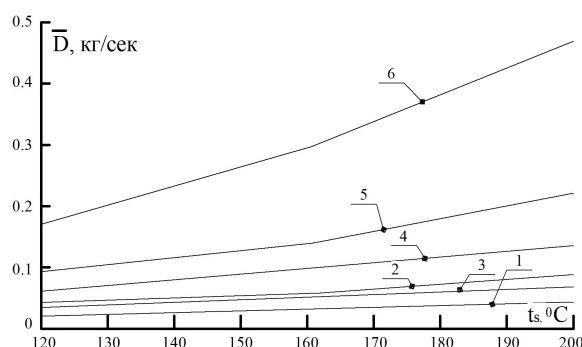


Рисунок 3 — Зависимость среднего расхода пара от его температуры насыщения за цикл разогрева для 6 типоразмеров подогревателей серии ВПЕ

Обсуждение полученных результатов

Полученные результаты теплотехнических расчетов и анализа работы паровых подогревателей-аккумуляторов вносят важный вклад в область теплотехники и теплоснабжения. Разработанная математическая модель подтвердила свою эффективность при расчетах характеристик подогревателей-аккумуляторов. Результаты теплотехнических анализов открывают перспективы для оптимизации работы подогревателей-аккумуляторов. С использованием данной модели

производители могут эффективно подбирать параметры системы, обеспечивая экономии энергии и ресурсов в системах ГВС. Внедрение разработанной модели в производственные процессы может привести к повышению качества и эффективности подогревателей. Управление параметрами процесса на основе результатов расчетов может значительно улучшить производственные характеристики. Графическое представление результатов в виде зависимостей времени разогрева и расхода пара обеспечивает наглядность и ясность для конечных пользователей. Это важно как для инженеров, так и для обслуживающего персонала. Полученные результаты открывают перспективы для дальнейших исследований в области теплоснабжения. Возможности расширения модели для более сложных условий и различных рабочих сред позволяют применять ее в различных областях.

Заключение

1. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитать основные характеристики паровых подогревателей-аккумуляторов, применяемых в системах горячего водоснабжения промышленных и коммунальных потребителей.

2. С помощью предложенного нами алгоритма проведены теплотехнические расчеты 6 типоразмеров подогревателей ВПЕ, выпускаемых Саратовским заводом энергетического машиностроения.

3. Результаты расчётов представлены в графической форме, что удобно для потребителей и обслуживающего персонала.

4. Производители и инженеры могут использовать результаты расчётов для оптимизации дизайна и выбора параметров подогревателей-аккумуляторов.

5. Дальнейшие исследования могут быть направлены на адаптацию модели к различным типам и размерам

подогревателей, чтобы расширить ее область применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. М., Энергоиздат, 2001, 471 с.

[2]. Жмакин Л. И., Шарпар Н. М., Полуцыган Е. О. Повышение энергетической эффективности тепловой. *Промышленные процессы и технологии*, 2022, т. 2, № 3, с. 76-87.

DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-3(5)-76-87

[3]. Жмакин Л. И. и др. Повышение эффективности теплоснабжающих систем. *Энергосбережение и водоподготовка*, 2023, № 4(144), с. 24–27.

[4]. Бажан П. И., Каневец Г. Е., Селиверстов В. М. Справочник по теплообменным аппаратам. М., Машиностроение, 1989, 365 с.

[5]. Ганин Е. А., Корнеев С. Д., Корнюхин И. П., Щербаков В. И. Теплоиспользующие установки в текстильной промышленности. М., Легпромышлениздат, 1989, 390 с.

[6]. Подогреватели ВПЕГ 1-4 м³, каталог ОАО «Сарэнергомаш». Режим доступа: <http://www.sarzem.ru> (дата обращения: 23.11.23).

[7]. Жмакин Л. И. Тепломассобменные процессы и оборудование в легкой и текстильной промышленности. М., Инфра-М, 2017, 294 с.

[8]. Данилов О. Л. и др. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях (ред. Клименко А.В.). М., ИД МЭИ, 2010, 423 с.

[9]. Справочник по теплообменникам, т. 1. Под ред. Мартыненко О. Г. М., Энергоатомиздат, 1987, 273 с.

[10]. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника. Справочник. Под ред.

Клименко А. В. и Зорина В. М., кн. 4, М., Изд. МЭИ, 2004, 630 с.

[11]. Теория тепломассообмена. Под ред. Леонтьева А. И. М., Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997, 683 с.

[12]. Корнюхин И. П. Тепломассообмен в теплотехнике текстильного производства. М.: Изд. Совъяз Бево, 2004, 597 с.

[13]. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М., Энергия, 1969, 424 с.

[14]. Ривкин С. А., Александров А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Справочник. М., Энергоатомиздат, 1984, 80 с.

Жмакин Леонид Иванович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры Энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Шарпар Николай Михайлович — канд. техн. наук, доцент, Доцент, Энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Сорокин Александр Николаевич — аспирант, кафедра «Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность», Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Власов Илья Николаевич — аспирант, кафедра «Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность», Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Васильева Алиса Денисовна — магистрант, кафедра «Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность», Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Modern thermal storage hot water systems

L. I. Zhmakin*, N. M. Sharpar*,¹, A. N. Sorokin*, I. N. Vlasov*, A. D. Vasilieva*

**The Kosygin State University of Russia, Moscow, Russia*

Abstract

The article is devoted to the thermotechnical calculation of steam heaters-accumulators, widely used in hot water supply systems of industrial and municipal facilities. The research is based on a mathematical model designed to determine the main characteristics of the considered apparatuses. Using the proposed algorithm, heat engineering calculations have been carried out for six standard sizes of heaters of the VPE series produced by the Saratov Power Engineering Plant. The results of calculations are presented in graphical form, which provides visual perception for consumers and maintenance personnel. The study covers aspects of efficiency and steam flow control depending on various parameters such as saturated water vapor temperature and heated water temperature. The findings can serve as a basis for optimizing the design and operation of steam heaters, ensuring more energy efficient and sustainable operation of hot water systems. This paper contributes to the field of thermal and hot water heating engineering by providing new approaches and data for the design of modern and efficient heating systems.

Keywords

Thermal calculation, mathematical model, water supply, heat transfer, accumulation, heat transfer, steam flow control.

REFERENCES

- [1]. Sokolov E. Ya. Teplofikatsiya i heat networks [District heating and heating networks]. Moscow, Energoizdat publ., 2001, 471 p. (In Russ.)
- [2]. Zhmakin L.I. et al. Increasing the energy efficiency of a heat network. *Industrial processes and technologies*, 2022, vol. 2, № 3, pp. 76-87. (In Russ.)
DOI 10.37816/2713-0789-2022-2-3(5)-76-87
- [3]. Sharpar N.M. et al. Efficiency increase of the heat supply systems. *Energy saving and water treatment*, 2023, № 4(144), pp. 24-27. (In Russ.)
- [4]. Bazhan P. I., Kanevets G. E., Seliverstov V. M. Spravochnik po teploobmennym apparatam [Reference book on heat-exchange apparatuses]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1989, 365 p. (In Russ.)
- [5]. Ganin E. A. et al. Teploispol'zuyushchiye ustanovki v tekstil'noy promyshlennosti [Heat-exchange installations in textile industry]. Moscow, Legprombytizdat Publ., 1989, 390 p. (In Russ.)
- [6]. Heaters VPEG 1-4 m³, catalog of JSC «Sarenergomash». Access mode: <http://www.sarzem.ru> (date of reference: 23.11.23). (In Russ.)
- [7]. Zhmakin L. I. Teplomassoobmennyye protsessy i oborudovaniye v legkoy i tekstil'noy promyshlennosti [Heat and mass transfer processes and equipment in the light and textile industries]. Moscow, Infra-M Publ., 2017, 294 p. (In Russ.)

¹ Corresponding author:

Email: sharp753@mail.ru

[8]. Danilov O.L. et al. Energoberezhenie v teploenergetiki i teploekhnologii [Energy saving in heat power engineering and heat technologies] (ed. Klimenko A.V.). Moscow, ID MEI publ., 2010, 423 p. (In Russ.)

[9]. Spravochnik po teploobmennikam [Reference book on heat exchangers], vol. 1. Edited by Martynenko O.G. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 273 p. (In Russ.)

[10]. Promyshlennaya teploenergetika i teploekhnika. Spravochnik [Industrial heat power engineering and heat engineering. Reference book]. Edited by A. V. Klimenko and V. M. Zorin, book 4, Moscow: MPEI Publ., 2004, 630 p. (In Russ.)

[11]. Teoriya teplomassoobmena [Theory of heat and mass transfer]. Edited by Leontiev A.I.

Moscow, Publ. MSTU named after N.E. Bauman, 1997, 683 p. (In Russ.)

[12]. Korniyukhin I. P. Teploassoobmen v teploekhnike tekstil'nogo proizvodstva [Heat and mass transfer in heat engineering of textile production]. Moscow: Sovyazh Bevo Publ., 2004, 597 p. (In Russ.)

[13]. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. Teploperedacha [Heat transfer]. Moscow, Energia Publ., 1969, 424 p. (In Russ.)

[14]. Rivkin S. A., Aleksandrov A. A. Termodinamicheskiye svoystva vody i vodyanogo para. Spravochnik [Thermodynamic properties of water and water vapor. Reference book]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1984, 80 p. (In Russ.)

Zhmakin L. I. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Sharpar N. M. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Sorokin A. N. — postgraduate student, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Vlasov I. N. — postgraduate student, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Vasilieva A. D. — graduate student, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Современные теплоаккумулирующие системы горячего водоснабжения / Л. И. Жмакин, Н. М. Шарпар, А. Н. Сорокин, И. Н. Власов, А. Д. Васильева // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 3(10). С. 76 – 87.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-76-87.

Please cite this article as:

Zhmakin L. I., Sharpar N. M., Sorokin A. N., Vlasov I. N., Vasilieva A. D. Modern thermal storage hot water systems. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 3(10), pp. 76 – 87.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-76-87

УДК 537.22

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-88-99

Имитационная модель энергобаланса профессионального потребителя

Е. В. Отрубянников^{*,1}, П. А. Пустовойт^{*}, Е. М. Маркин^{*}

**Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия*

Аннотация

В работе представлена имитационная модель энергобаланса профессионального потребителя. Показаны возможности детализации такого рода моделей, а также универсальность подхода. Обосновано использование системно-динамического подхода и проведен анализ существующих моделей. Продемонстрирована реализованная в программном обеспечении AnyLogic имитационная модель предприятия профессионального потребителя. Определены основные параметры модели, показаны возможности корректирующих коэффициентов и функций, их определяющих. Показано, что прогнозирование двух функций, потребления и генерации, без использования имитационной модели бесперспективно, в том числе из-за значимого объема случайных факторов, в первую очередь это связано с неравномерной генерацией от основных источников внутренней генерации, а также из-за разнесения во времени пиков генерации и пиков потребления. Показаны возможности перехода модели к цифровому двойнику, а также потенциал модели при оптимизации и прогнозировании.

Ключевые слова

Профессиональный потребитель, имитационная модель, системно-динамическая модель, энергобаланс предприятия, микросеть.

Введение

Современный этап развития технологий подводит нас к состоянию, когда автономное производство является доступной и реализуемой возможностью. В декабре 2019 г. Государственная дума Российской Федерации определила сущность понятия «объект микрогенерации», а постановление Правительства России №299 от 2 марта 2021 г. обязало энергосбытовые компании рассматривать объекты

микрогенерации как генерирующие элементы единой энергосистемы. Фактически данное постановление дало старт изменению отношения к микрогенерации — ранее такого рода деятельность была более характерна для индивидуальных хозяйств, которые либо в меру технической необходимости, либо в целях идейного подхода реализовывали механизмы закрытия собственных потребностей в энергии. Переход к схеме профессионального потребителя

¹ Для переписки:

Email: otrubyannikov-ev@rguk.ru

или потребителя-производителя («просьюмерская» энергетика) открывает для предприятий широкие возможности. В частности, субъект микрогенерации, обладающий мощностями генерации до 15 кВт, может реализовывать электроэнергию в единую энергосистему, и такого рода доходы не требуют регистрации отдельного юридического лица и не будут облагаться налогами до конца 2028 г. Отчет Ассоциации развития возобновляемой энергетики [1] указывает на стабильный рост в 2022–2023 гг. объема генерации электроэнергии при помощи возобновляемых источников энергии. Стоит отметить, что в 2023 г. отмечен рост объема электроэнергии, вырабатываемой в рамках свободных двусторонних договоров, что подтверждает заинтересованность владельцев объектов микрогенерации в реализации и распределении получаемой энергии.

Литературный обзор показал, что исследования, связанные с энергосбережением и энергоэффективностью производственных предприятий достаточно популярны, а методы и инструменты такого рода исследований очень неоднородны — от регрессионного статистического анализа [2] до имитационных моделей агентного типа [3]. При этом прослеживается общая тенденция к учащению случаев применения имитационного моделирования по мере роста сложности моделируемой системы [4, 5].

В общем смысле энергоэффективность должна рассматриваться на всех этапах: генерация, транспортировка, потребление [6]. Особо это важно при рассмотрении схемы профессионального потребителя, имеющего внутри микросети все три составляющие. С использованием имитационного моделирования подобные задачи часто решаются в рамках агентного подхода, но с точки зрения систем управления энергосистемой [7], и показывают высокую

эффективность. Такой же подход применяется для создания цифровых двойников крупных энергосетей [8, 9]. Однако данных о возможности использования этих моделей в реальном времени нет, что вероятно связано с комбинированным подходом к созданию модели и использованием дискретно-событийной парадигмы. Отсутствие возможности синхронизации модельного времени с реальным временем ставит под вопрос полноценное использование цифрового двойника, а также возможность использования такого подхода к прогнозированию процесса в реальном времени.

Стоит отметить, что системно-динамический подход для моделирования энергоэффективности встречается в ряде работ, однако в большинстве своём модели создаются для энергосистем в целом, применяя интегральные понятия потребление и генерация. Также существуют подходы [10], рассматривающие энергоэффективность в совокупности с тепловыми процессами, но большинство из таких моделей ориентировано только на электрогенерацию.

Материалы и методы решения задачи

Предлагаемая в данной работе модель представляет собой системно-динамический подход к проблеме распределения и эффективного использования энергии на предприятии. Особенность такого подхода относительно агентного в большей универсальности, которая в первую очередь проявляется отсутствием необходимости реализовывать логику конкретного агента и необходимости синхронизировать модельное и реальное время [11]. С другой стороны, степень детализации предложенной модели в некоторых зонах энергосистемы может быть меньше, чем у перечисленных ранее моделей. Полученная модель является продолжением работы

представленной в [12], и так же реализована в программном обеспечении AnyLogic.

Особенностью системно-динамического подхода к моделированию в системе AnyLogic является возможность использования единиц измерения для потоков и накопителей, что позволяет реализовать несколько уровней модели (рисунок 1), получая инженерные и экономические характеристики процесса одновременно. Взаимное влияние уровней выражается в экономической оценке энергетического баланса предприятия, а обратное влияние достигается за счет экономической обоснованности использования энергетических ресурсов.

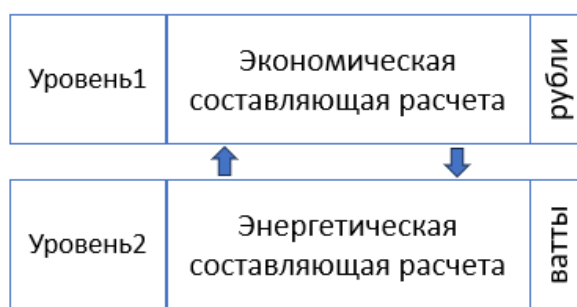


Рисунок 1 — Уровни модели и их единицы измерения

Энергетическая модель профессионального потребителя состоит из двух возможных источников энергии – электросеть общественного пользования и источники внутренней электрогенерации. Баланс потребления между этими источниками определяется доступностью и экономической целесообразностью. Также для солнечной и ветрогенерации характерна неравномерность, что создает эксплуатационные проблемы при неравномерном потреблении. Прямое сравнение объема генерации и потребления не может характеризовать энергоэффективность профессионального потребителя. Такая оценка возможна при условной возможности накапливать всю электроэнергию, получаемую

из источников внутренней генерации, но такая ситуация ограничена экономической целесообразностью стоимости хранения энергии. Нецелесообразность другой граничной ситуации, когда вся энергия, вырабатываемая внутренними источниками, направляется в общественную сеть, также обусловлена экономической составляющей — стоимость реализуемой энергии меньше, чем стоимость приобретаемой, к тому же объем реализуемой энергии законодательно ограничен.

Структура электрогенерации от возобновляемых источников профессионального потребителя логически делится на группы по видам — солнечная, гидро, ветро- генерация и т. д. В свою очередь, каждая из групп делится на локализации. Локализация — это указание места генерации и специфических свойств, в частности функции генерации конкретного источника. В модели такие возможности реализованы параметрами, которые могут быть заданы как интегральные характеристики значения генерирующих функций от всех источников одного вида. Для целей прогнозирования параметры могут находиться как значения функции, аппроксимирующей исходные данные по фиксированным аналогичным периодам: временам года, времени суток и т. д. Для целей создания цифрового двойника данные параметры берутся как исходные из базы данных показаний измерительных приборов на конкретной локализации.

Структура потребления определяется аналогичным образом — изначально по видам потребления, которые, в свою очередь, делятся на локализации. При этом каждая точка локализации характеризуется графиком потребления и энергоэффективностью используемого оборудования. По видам потребления могут быть выделены следующие группы — освещение, электродвигатели, нагрев воды,

отопление, холодильное оборудование, насосное оборудование и т. д.

Структура хранения энергии профессионального потребителя реализуется логическим накопителем — абстрактным объединением всех возможных форм накопления энергии, в частности, это могут быть аккумуляторные батареи, тепловые батареи, гидроаккумулирующие устройства, химические накопители и т.д. Наиболее распространённым способом накопления являются аккумуляторные батареи, но рассматриваемая модель позволяет учитывать любые варианты накопления и преобразования энергии, раскладывая логическую группу накопления на локальные точки накопления со своими свойствами и особенностями.

Прогнозировать наложение двух функций — потребления и генерации — без использования имитационной модели весьма трудоёмко, в том числе из-за значимого объёма случайных факторов, влияющих на генерацию от внутренних источников. В свою очередь, имитационная

модель позволяет повысить эффективность эксплуатации энергосетей профессионального потребителя, а также лучше понять структуру их функционирования.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлена имитационная модель микросети сельхозпредприятия, которое за счет внутренней генерации является профессиональным потребителем. Имитационная модель реализована в программном обеспечении AnyLogic. Данный потребитель имеет в своей сети два вида источника генерации — солнечные панели и ветрогенератор. В качестве накопителя энергии в сети используется аккумуляторная батарея. Структура потребителей определена следующими видами: насосное оборудование, отопление, электродвигатели, освещение, холодильники, прочее. В соответствии с требованиями языка Java, лежащего в основе AnyLogic, имена параметров модели заданы на английском языке.

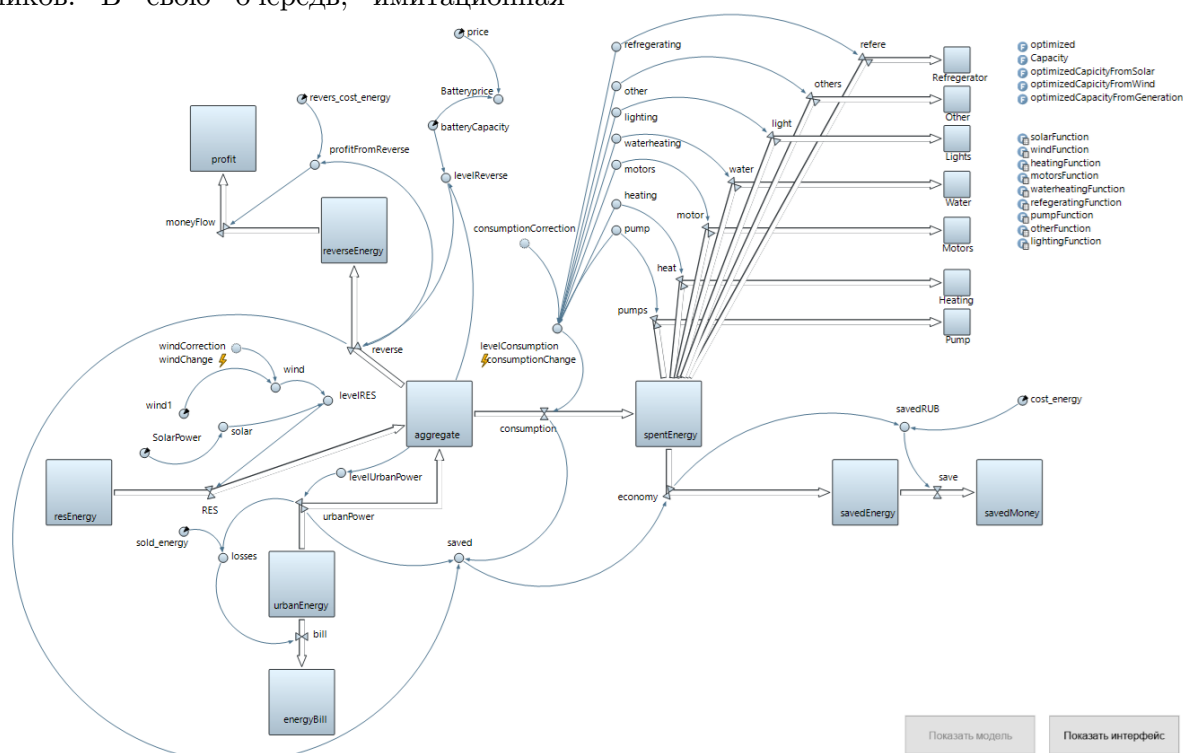


Рисунок 2 — Имитационная модель микросети профессионального потребителя, реализованная в программном обеспечении AnyLogic

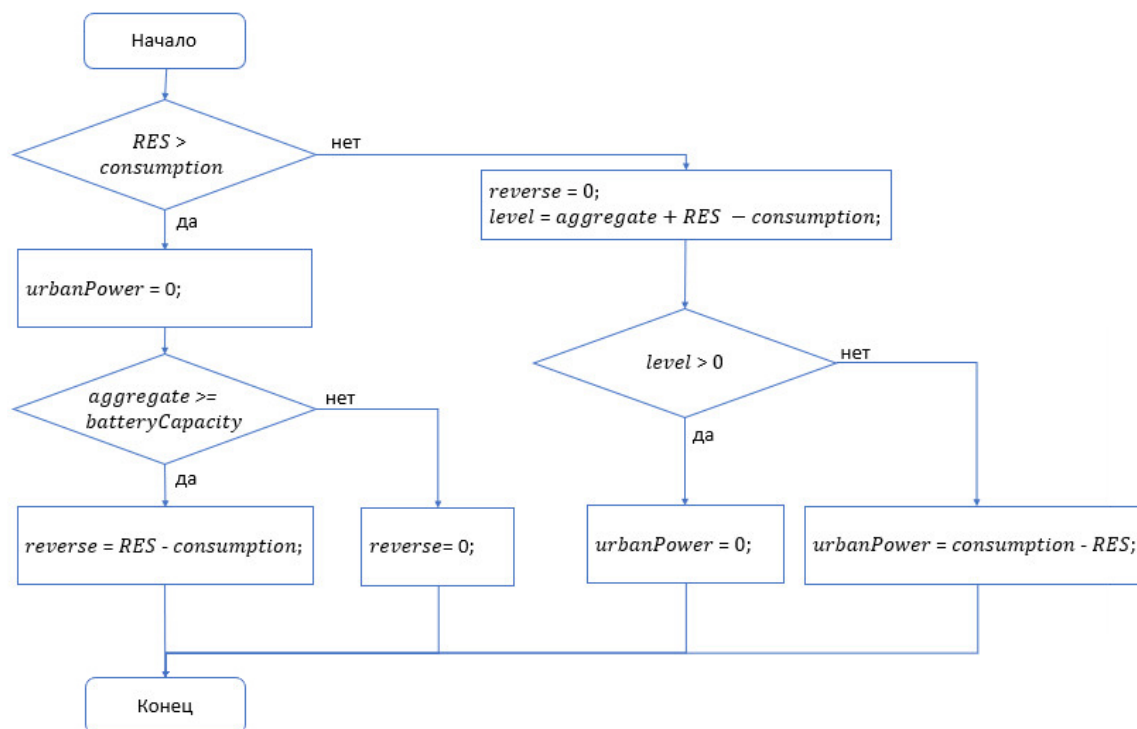


Рисунок 3 — Блок-схема определения зависимых параметров для расчета накопителя *aggregate*

Основным накопителем, характеризующим динамику генерации/потребления в рамках данной микросети, является накопитель *aggregate*. Текущее изменение состояния накопителя определяется формулой:

$$\frac{d(\text{aggregate})}{dt} = \text{RES} + \text{urbanPower} - \text{consumption} - \text{reverse},$$

где *RES* — суммарная генерация от внутренних источников, *urbanPower* — суммарное потребление из общей энергосистемы, *consumption* — суммарная мощность потребителей в текущий момент времени, *reverse* — мощность, возвращаемая профессиональным потребителем в электросеть общественного пользования.

Зависимые параметры *reverse* и *urbanPower* определяются по алгоритму, представленному на рисунке 3, где *batteryCapacity* — ёмкость аккумуляторной

батареи в ваттах, *level* — величина, характеризующая достаточность текущего заряда для покрытия мгновенного потребления.

Параметр *RES* определяется как сумма текущей генерации солнечных панелей (*solar*) и ветрогенераторов (*wind*). Которые в свою очередь представлены в качестве функций от времени суток и времени года. Для каждой из функций введены стохастические коэффициенты, распределенные по закону Симпсона, которые позволяют моделировать работу реальной системы.

Параметр *consumption* — определяется как величина мгновенной потребляемой мощности по всем видам потребителей. Каждый из видов представляет собой суммарное потребление всех входящих в данный вид потребителей, каждый из которых уже определяется функцией потребления в зависимости от времени суток и/или других факторов. В представленной на рисунке 2 модели используется

единственный поправочный коэффициент *consumptionCorrection*, однако в случае необходимости коэффициенты могут быть введены на уровне видов потребителей и даже применительно к каждому конкретному потребителю.

Накопители *resEnergy*, *reverseEnergy*, *spentEnergy*, *urbanEnergy* — введены для накопительной оценки каждого из логических классов энергии: произведенной внутренними источниками генерации, переданной в сети общего пользования, израсходованной и выбранной из сети общего пользования соответственно. Единицы измерения данных накопителей — ватты. Накопители *profit*, *energyBill*, *savedMoney* — позволяют оценить выгоду от возвращенной в сеть общего пользования энергии, стоимость энергии, купленной из сети общего пользования, и общую экономию. Единицы измерения этих накопителей — рубли. Наличие агрегирующих накопителей не является обязательным для функционирования модели, а сделано исключительно для удобства анализа получаемых в процессе исполнения модели результатов.

В общем случае параметры предлагаемой модели представлены в таблице 1. Параметры, отмеченные как множественные, могут существовать в модели в любом количестве. Параметры, отмеченные как целевые показатели, использовались для проведения оптимизационных экспериментов. Перечисленные параметры для модели должны быть дополнены корректирующими коэффициентами. При этом данные коэффициенты могут быть как независимыми, так и иметь функциональную зависимость между собой или от параметров модели. В частности, в реализованной модели предлагается функция,

характеризующая погодную специфику конкретного района — она может определяться как статистическими данными наблюдений, так и задаваться явным образом. Эта функция оказывает влияние сразу на несколько параметров модели: определяет интенсивность внутренней генерации (*solar*, *wind*) и меняет потребность в обогреве и охлаждении (*heat*, *refere*). Ещё одним специфическим, для имитационных моделей, дополнением модели является график, характеризующий рабочие периоды для каждого из видов оборудования. Большинство энергоёмкого оборудования работает в периодических интервалах в соответствии с трудовым расписанием, что может быть реализовано таким графиком.

Заключение

Предложенная модель позволяет выполнить целый ряд оптимизационных экспериментов в зависимости от исходных параметров. В частности, для предприятия, модель которого представлена на рисунке 2, проведены следующие эксперименты:

- поиск минимального объёма аккумуляторных батарей при известной мощности потребителей, графике потребления, а также условий внутренней генерации, при минимизации затрат на электроэнергию;
- определение минимальной суммарной мощности внутренней генерации при известной мощности потребителей, графике потребления с целью сведения затрат на электроэнергию к нулю;
- определение минимально допустимой стоимости аккумуляторных батарей при известной мощности потребителей, графике потребления, на условиях гарантированной окупаемости батарей за счет возвратной энергии за 5 лет;

Таблица 1 — Параметры имитационной модели

Параметр	Роль в цифровом двойнике	Роль в модели	Целевой показатель	Несколько объектов	Единица измерения
Мощность локальной точки генерации энергии	Показание измерительных приборов на конкретной локальной точке генерации	Задается характеристиками оборудования	Да	Да	Ватт
Суммарная мощность внутренней генерации	Рассчитывается как сумма мощностей генерирующих устройств	Рассчитывается как сумма мощностей генерирующих устройств	Да	Нет	Ватт
Объем локального накопителя энергии	Фактический объем локального накопителя энергии	Задается характеристиками локального накопителя энергии	Да	Да	Ватт
Суммарный объем накопителя энергии	Фактический суммарный объем накопителя энергии	Рассчитывается как суммарный объем локальных накопителей энергии	Да	Нет	Ватт
Потребляемая мощность	Показания измерительных приборов на конкретном виде оборудования	Задается характеристиками оборудования с учетом поправочных коэффициентов	Нет	Да	Ватт
Суммарная потребляемая мощность конкретным видом оборудования	Сумма показаний измерительных приборов на всех единицах оборудования одного вида	Рассчитывается как суммарное потребление по конкретному виду оборудования	Нет	Нет	Ватт
Суммарная потребляемая мощность всеми видами оборудования	Сумма всех показаний по всем видам оборудования	Рассчитывается как суммарное потребление по всему оборудованию.	Нет	Нет	Ватт
Стоимость энергии из сети общего пользования	Стоимость энергии для микросети	Стоимость энергии для микросети	Нет	Нет	Рубль
Цена продажи энергии в сеть общего пользования	Стоимость продажи энергии в сеть общего пользования	Стоимость продажи энергии в сеть общего пользования	Да	Нет	Рубль
Стоимость накопителя энергии	Фактическая стоимость оборудования для накопления энергии	Ожидаемая стоимость исходя из параметров накопителя	Да	Нет	Рубль
Стоимость локальной точки генерации энергии	Фактическая стоимость локальной точки генерации энергии	Ожидаемая стоимость исходя из параметров и вида генерации	Нет	Да	Рубль

Каждый эксперимент состоял из 50 тысяч симуляций без графического интерфейса с возможностью вывода статистических данных. Целевой параметр выводится в отдельную процедуру и иллюстрируется на итоговом графике. В модели реализована возможность просмотреть эксперимент, показавший самые высокие значения по целевым характеристикам, а также просмотреть эксперименты в доверенной области 10% от оптимального значения.

Модель имеет высокий потенциал к прогнозированию, что обусловлено её имитационной природой. Фактически цифровой двойник, имеющий достоверные сведения в реальном времени, может прогнозировать состояние энергосистемы на различные временные интервалы, взяв за основу тенденции, полученные в аналогичный период по каждому из влияющих коррекционных коэффициентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Ежеквартальный информационный обзор рынка ВИЭ в России II квартал (апрель – июнь) 2023 // Ассоциация развития возобновляемой энергетики (АРВЭ) URL: https://rreda.ru/upload/iblock/94f/jztdm2ih6dwxh99bwyphk3iws01qj1gb9/202307_RREDA_quarterly_report_q_2_2023.pdf (дата обращения: 01.11.2023).
- [2]. Карпенко С. М., Карпенко Н. В., Сахаров В. Е. Моделирование электропотребления на основе данных с переменной структурой. *Энергобезопасность и энергосбережение*, 2021, № 3, с. 13–17. DOI: 10.18635/2071-2219-2021-1-13-17
- [3]. Марьясин О. Ю., Огарков А. А. Имитационное моделирование и оптимизация энергопотребления офисного здания. *Имитационное моделирование. Теория и практика: Сборник трудов восьмой Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности*, Санкт-Петербург, 18–20 октября 2017 года, Санкт-Петербург: НП «НОИМ», 2017, с. 480–484.
- [4]. Бабина О. И., Сравнительный анализ имитационных и аналитических моделей. *Имитационное моделирование. Теория и практика: Сборник трудов первой Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности*, Санкт-Петербург, 21–23 октября 2009 года, Санкт-Петербург, 2009, с. 73–77.
- [5]. Макова А. С. Перспективы развития имитационного моделирования. *Современные наукоемкие технологии*, 2014, № 7–1, с. 59–60.
- [6]. Акатьев В. А., Тюрин М. П., Бородин Е. С. Повышение энергоэффективности при производстве, передаче и потреблении электроэнергии. *Энергобезопасность и энергосбережение*, 2020, № 6, с. 8–17. DOI: 10.18635/2071-2219-2020-6-8-17.
- [7]. Modeling Intelligent Control Systems based on a Digital Platform for the Management of Distributed Energy Systems (Anylogic Conference 2021) // AnyLogic URL: <https://www.anylogic.ru/upload/pdf/alc-2021/intelab-modeling-intelligent-control-systems.pdf> (дата обращения: 01.11.2023).
- [8]. A Digital Twin for highly efficient & sustainable districts (Anylogic Conference 2022) // AnyLogic URL: <https://www.anylogic.com/upload/pdf/alc-2022/eifer-presentation.pdf> (дата обращения: 01.11.2023).
- [9]. Virtual Demonstration of Decentralized Energy Management // YouTube URL: <https://www.youtube.com/watch?v=EXqqiDRxQRo> (дата обращения: 01.11.2023).

[10]. Страхова Н. А., Лебединский П. А. Имитационное моделирование как инструмент анализа энергоэффективности теплогенерирующих предприятий. *Инженерный вестник Дона*, 2013, № 4(27), с. 155.

[11]. Борщёв А. В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика. *Exponenta PRO: Математика в приложениях*, 2004, № 3-4, с. 38-47.

[12]. Отрубянников Е. В., Орлов О. Я. Отдельное здание как микросеть в концепции Smartgrid. *Инновационное развитие*

техники и технологий в промышленности: Сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием, Москва, 17–20 апреля 2023 года, Т. №3, Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», 2023, с. 212–215.

Отрубянников Егор Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1)

Пустовойт Павел Александрович — аспирант, кафедра энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1)

Маркин Евгений Михайлович — аспирант, кафедра энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1)

Simulation model of the professional consumer's energy balance

E. V. Otrubyannikov^{*,1}, P. A. Pustovoyt^{*}, E. M. Markin^{*}

**The Kosygin State University of Russia, Moscow, Russia*

Abstract

The paper presents a simulation model of the energy balance of a professional consumer. The possibilities for detailing this kind of models, as well as the universality of the approach, are shown. The use of a system-dynamic approach is justified and an analysis of existing models is carried out. A simulation model of a professional consumer enterprise is demonstrated, implemented in AnyLogic software. The main parameters of the model are determined, the possibilities of correction coefficients and the functions that determine them are shown. It is shown that forecasting two functions, consumption and generation, without using a simulation model is unpromising, including some random factors, primarily due to uneven generation from the main sources of internal generation, as well as due to the time difference generation peaks and consumption peaks. The possibilities of transitioning the model to a digital twin are shown, as well as the potential of the model for optimization and forecasting.

Keywords

Professional consumer, simulation model, system dynamic model, enterprise energy balance, microgrid.

REFERENCES

[1]. Ezhekvartal'nyi informatsionnyi obzor rynka VIE v Rossii II kvartal (aprel' – iyun') 2023 // Assotsiatsiia razvitiia vozobnovliaemoi energetiki (ARVE). [Quarterly information review of the renewable energy market in Russia II quarter (April–June) 2023]. URL: https://rreda.ru/upload/iblock/94f/jztdm2ih6dwxh99bwypk3iw s01qj1gb9/202307_RREDA_quarterly_report_q_2_2023.pdf (data obrashcheniia: 01.11.2023). (In Russ.)

[2]. Karpenko S. M., Karpenko N. V., Sakharov V. E. Modelirovanie elektropotrebleniia na osnove dannykh s peremennoi strukturoi. [Modeling power consumption based on data with variable structure]

Energobezopasnost' i energosberezhenie [Energy security and energy saving], 2021, № 3, pp. 13–17. (In Russ.)

DOI: 10.18635/2071-2219-2021-1-13-17

[3]. Mar'iasin O. Iu., Ogarkov A. A. Imitatsionnoe modelirovanie i optimizatsiia energopotrebleniia ofisnogo zdaniia. Imitatsionnoe modelirovanie. [Simulation modeling and optimization of energy consumption of an office building]. *Teoriia i praktika: Sbornik trudov vos'moi Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po imitatsionnomu modelirovaniu i ego primeneniui v nauke i promyshlennosti*, [Simulation modeling. Theory and practice: Collection of proceedings of the Eighth All-Russian

¹ Corresponding author:

Email: otrubyannikov-ev@rguk.ru

Scientific and Practical Conference on Simulation Modeling and its Application in Science and Industry], Sankt-Peterburg: NP «NOIM» Publ., 2017, pp. 480–484. (In Russ.)

[4]. Babina O. I., Sravnitel'nyi analiz imitatsionnykh i analiticheskikh modelei. Imitatsionnoe modelirovanie. [Comparative analysis of simulation and analytical models]. *Teoriia i praktika: Materialy konferentsii. Sbornik dokladov*, [Simulation modeling. Theory and practice: Collection of proceedings of the first All-Russian scientific and practical conference on simulation modeling and its application in science and industry], Sankt-Peterburg, 2009, pp. 73–77. (In Russ.)

[5]. Makova A. S., Perspektivy razvitiia imitatsionnogo modelirovaniia. [Prospects for the development of simulation modeling] *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, [Modern high technology], 2014, № 7-1, pp. 59–60. (In Russ.)

[6]. Akat'ev V. A., Tiurin M. P., Borodina E. S. Povyshenie energoeffektivnosti pri proizvodstve, peredache i potreblenii elektroenergii. [Increasing energy efficiency in the production, transmission and consumption of electricity]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*, [Energy security and energy saving], 2020, № 6, pp. 8–17. (In Russ.) DOI: 10.18635/2071-2219-2020-6-8-17.

[7]. Strakhova N. A., Lebedinskii P. A. Imitatsionnoe modelirovanie kak instrument analiza energoeffektivnosti teplogeneriruiushchikh predpriatii. [Simulation modeling as a tool for analyzing the energy efficiency of heat generating enterprises]. *Inzhenernyi vestnik Dona*, [Engineering Bulletin of the Don], 2013, № 4(27), pp. 155. (In Russ.)

[8]. Modeling Intelligent Control Systems based on a Digital Platform for the Management of Distributed Energy Systems (Anylogic Conference 2021) // AnyLogic

URL: <https://www.anylogic.ru/upload/pdf/alc-2021/intelab-modeling-intelligent-control-systems.pdf> (date accessed: 01.11.2023).

[9]. A Digital Twin for highly efficient & sustainable districts (Anylogic Conference 2022) // AnyLogic
URL: <https://www.anylogic.com/upload/pdf/alc-2022/eifer-presentation.pdf> (date accessed 01.11.2023).

[10]. Virtual Demonstration of Decentralized Energy Management // YouTube
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=EXqqiDRxQRo> (date accessed: 01.11.2023).

[11]. Borshchev A. V. Prakticheskoe agentnoe modelirovanie i ego mesto v arsene analitika. [Practical agent-based modeling and its place in the analyst's arsenal]. *Exponenta PRO: Matematika v prilozheniiakh*, [Exponenta PRO: Mathematics in Applications], 2004, № 3–4, pp. 38–47. (In Russ.)

[12]. Otrubiannikov E. V., Orlov O. Ia. Otdel'noe zdanie kak mikroset' v kontseptsii Smartgrid. [Individual building as a microgrid in the Smartgrid concept]. *Innovatsionnoe razvitie tekhniki i tekhnologii v promyshlennosti: Sbornik materialov Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii molodykh issledovatelei s mezhdunarodnym uchastiem*, [Innovative development of engineering and technology in industry: Collection of materials of the All-Russian Scientific Conference of Young Researchers with International Participation], Moscow, 17–20 apreliia 2023 goda, T. №3, Moscow: Federal'noe gosudarstvennoe biudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniia «Russian gosudarstvennyi universitet imeni A.N. Kosygina (Tekhnologii. Dizain. Iskustvo)» Publ., 2023, pp. 212–215. (In Russ.)

Otrubyannikov E. V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Pustovoyt P. A. — postgraduate student, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Markin E. M. — postgraduate student, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Имитационная модель энергобаланса профессионального потребителя / Е. В. Отрубянников, П. А. Пустовойт, Е. М. Маркин // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 3(10). С. 88 – 99.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-88-99

Please cite this article as:

Otrubyannikov E. V., Pustovoyt P. A., Markin E. M. Simulation model of the professional consumer's energy balance. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 3(10), pp. 88 – 99.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-3(10)-88-99

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

**Том 3
Выпуск 3(10)**

Декабрь 2023

Выходит 4 раза в год

Формат 60 × 84 1/8. Усл. печ. л. 11,63. Тираж 200 экз.

Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство)

115035, Москва, ул. Садовническая, 33, стр.1
Отпечатано в РИО ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина»