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 1(8) Март 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. — № 1(8). — 112 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 Седляров (РГУ имени А. Н. Косыгина, Москва, Россия)

Ответственный ученый секретарь

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

Заведующий редакцией

Елена Сергеевна Бородина (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), Н. Н. Кулов (РХО им. Д. И. Менделеева, ИОНХ имени Н.С. Курнакова 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 ЯГПУ), Яровславль, Россия), А. Е. Костанян (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

КОЛОНКА РЕДАКЦИИ

Экология

Л. Н. Ольшанская, Е. Н. Лазарева, Ю. В. Волошкина
Гальваношламы — как источник вторичных ресурсов для получения промышленных
товаров
Химические технологии, науки о материалах
А. В. Митрофанов, С. В. Василевич, Н. С. Шпейнова, З. В. Зарубин Разработка модели аппарата кипящего слоя с рубашкой охлаждения
Н. А. СамойловИнтенсификация процесса адсорбции за счет секционирования объема адсорберов 24
А. Г. Липин, А. А. Липин Сушка геля полиакрилонитрила при инфракрасном подводе теплоты
Ю. С. Шустов, Е. Д. Ефанов Исследование влияния маслоотталкивающией отделки на свойства текстильных материалов для спецодежды сотрудников авторемонтных предприятий
Е. О. Обухов, М. Д. Гаспарян, В. Н. Грунский, Е. Ю. Либерман, С. В. Тищенко, М. Г. Давидханова
Технология керамических высокопористых блочно-ячеистых нанесенных катализаторов с оксидным активным слоем
R. Sh. Abiev Fabrication of foam concrete by use of novel foam generator — vortex jet apparatus: study
of foam concrete properties
Теоретическая и прикладная теплотехника
В. А. Седнев, А. В. Смуров
Оптимизация электротехнических средств для электроснабжения потребителей 94

КОЛОНКА РЕДАКЦИИ

Уважаемые коллеги!

На XVIII конгрессе «Всемирной организации системных исследований и кибернетики» (WOSC2021) «Системный подход и кибернетика, устремленные в будущее человечества», прошедшем в Москве под эгидой ЮНЕСКО, рассматривались подходы к исследованию процессов глобализации с позиций фундаментальных законов развития Природы, Человека и Общества.

Развитие человечества является процессом получения новых знаний о фундаментальных закономерностях развития Природы, Человека и Общества, их освоением — разработкой технологий и созданием на этой основе продукции, обеспечивающей жизнедеятельность. Фундаментальные научные знания являются основой прогресса: они обеспечивают развитие образования, создание новых технологий и развитие культуры. В настоящее время с учетом фундаментальных научных знаний определяются приоритеты и стратегия развития государства, решаются задачи обеспечения суверенитета, конкурентоспособности и национальной безопасности.

Собственно научно-технический прогресс регулируется следующими законами: по мере социально-экономического и научно-технологического развития коммерческая и социальная ценность фундаментальных научных результатов постоянно возрастает; коммерческая стоимость наукоемкой продукции постоянно падает; наука и научные результаты не имеют границ; технологии не могут противоречить законам природы.

Критическая масса новых технологий создает условия для научно-промышленных революций. Как правило, в научно-технологической сфере рассматривают четыре революционных процесса: создание

паровой машины, создание двигателя внутреннего сгорания, возобновляемая энергетика, информационно-коммуникационные технологии. Эти революции стимулировали создание новых общественно-экономических отношений и во многом способствовали формированию устойчивого мирового уклада.

Сейчас можно говорить о пятой — гуманитарно-технологической революции, т. е. о кардинальных изменениях культуры и среды обитания человека вследствие научно-технологического развития. Современная среда обитания должна рассматриваться как система «природа — технологии — информация — культура».

Познание Природы, Человека и Общества и практическая реализация этих знаний способствовали глобальным изменениям мироустройства. Собственно глобализация является процессом формирования единой мировой системы функционирования технологических, социально-экономических и политических систем.

За период своего развития человечество прошло через три этапа глобализации: освоение территорий, создание единой системы базовых ценностей на основе религии, создание единого экономического пространства. Во всех случаях основу развития составляла конкуренция различных систем: человек конкурировал с природой, религии (христианство и ислам) и социально-экономические системы (капитализм и социализм) конкурировали между собой. Однако никакая из конкурирующих систем не одержала победы и эти процессы продолжаются до настоящего времени.

Глобализация 1.0 — освоение пространства с использованием простейших транспортных технологий. Тогда же были заложены основы дискретной (цифровой)

передачи сигналов: световые и флажные семафоры.

Основная идея Глобализации 2.0 заключалась в формировании единой системы ценностей на основе религиозных представлений об основах мироздания. Этот процесс проходил в борьбе между двумя мировыми религиями: христианством и исламом — и сопровождался активными военными действиями. На протяжении длительного периода Церковь доминировала над государствами и, по сути, устанавливала систему государственного управления. Но в XVII в. ситуация изменилась и были заложены основы административно-бюрократической системы государственного управления.

Интенсивное развитие технологий стимулировало развитие капиталистического способа организации производства и формирование новых общественно-экономических отношений, а также кредитно-финансовой системы. В результате сформировались два направления развития капитализма: развитие путем создания новых производств с целью производства товаров массового спроса, и развитие финансовых механизмов и рынков с целью обогащения достаточно узкого круга населения (т.наз. «золотой миллиард»). XX век прошел под флагом конкурентной борьбы социалистической и капиталистической систем. При этом шли процессы экономической глобализации — Глобализация 3.0.

Однако попытка построить однополярный Мир после распада социалистической системы не увенчалась успехом. Превращение финансов в инструмент управления, неконтролируемый рост прибылей крупных компаний привели к нарастанию неравенства в социально-экономическом развитии, что в свою очередь стало причиной многочисленных локальных и глобальных политических и экономических кризисов, военных конфликтов. В итоге

миропорядок перешел в неустойчивое состояние на фоне ускорения научно-технического прогресса. Таким образом была экспериментально доказана несостоятельность экономических подходов, основанных на абсолютизации саморегулирования рынков.

Основу современного этапа глобализации (Глобализация 4.0) составляют наука, технологии, инновации. При этом наряду с формированием новой среды обитания меняется также парадигма развития: от «человек для экономики» к «экономика для человека», а приоритетом развития становится качество жизни. Эти факторы в совокупности позволяют говорить о гуманитарно-технологической революции силе процесса Глобализадвижущей ции 4.0. Конечным результатом станет формирование нового мирового уклада, в котором лидирующее место займут государства (группы государств), обладающие наиболее развитым научно-технологическим комплексом, ориентированным на повышение качества жизни человека.

На смену исчерпавшим свои возможности моделям пришли новые взгляды на перспективы развития человечества. В настоящее время сформировались две конкурирующие теории развития: постиндустриализм и неокапитализм, различающиеся по целям, но базирующиеся на научнотехническом прогрессе.

Теория постиндустриализма определяет приоритетом развития повышение качества жизни человека за счет использования новых технологий. При этом одной из важнейших политических задач государства является организация науки и формы государственной поддержки.

Альтернативная концепция — неокапитализм — исходит из того, что за счет новых, прежде всего, цифровых технологий управление перейдет к транснациональным

корпорациям, а собственно национальные государства отомрут.

Но по какому бы сценарию ни пошло дальнейшее развитие, его основу будут составлять наука, технологии, инновации. Таким образом, можно утверждать, что Мир перешел к новому этапу развития — Глобализация 4.0, базирующемуся на науке и технологиях. Движущей силой

процесса является гуманитарно-технологическая революция. Результатом процесса станет новый мировой уклад. При этом обязательным условием обеспечения устойчивого развития и глобальной безопасности является консенсус основных институтов: политики, общества, бизнеса и науки.

Член-корреспондент РАН, доктор экономических наук, кандидат технических наук, заместитель президента РАН, член Редакционного совета журнала «Промышленные процессы и технологии» Иванов Владимир Викторович

УДК 504.064.4: 658.567

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-7-14

Гальваношламы — как источник вторичных ресурсов для получения промышленных товаров

Л. Н. Ольшанская^{*,1}, Е. Н. Лазарева^{**}, Ю. В. Волошкина^{*}

- * Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Саратов, Россия
- ** Энгельсский технологический институт филиал Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., Энгельс, Россия

Аннотация

Стихийное загрязнение больших территорий разнообразными твёрдыми и жидкими отходами достигло в нашей стране угрожающих масштабов. В связи с этим необходимо в ближайшем будущем создать специальную технологию массовой очистки земельных ресурсов от несанкционированных свалок различного мусора. Образующиеся и накопленные твёрдые промышленные отходы (ТПО) являются источником ценнейших вторичных материальных ресурсов (ВМР: чёрные, цветные, редкие, рассеянные металлы и их соединения). Технологические рекомендации по наиболее рациональному использованию отходов разрабатываются, исходя из их химического состава.

В настоящей работе представлены результаты исследований по извлечению из цинксодержащих отходов оксида цинка и дальнейшего использования его в качестве вторичного ресурса для получения пигмента-наполнителя при изготовлении масляных красок (цинковые белила). Установлены рациональные условия извлечения ZnO (pH среды для выделения гидроксида $Zn(OH)_2$, температура и время его обжига); разработана принципиальная схема для изготовления пигмента—наполнителя.

Ключевые слова

Гальваношлам, гидроксид цинка, утилизация, пигменты-наполнители, оксид цинка, лакокрасочные изделия, технологическая схема получения ZnO.

Введение

В России постоянно увеличивается количество твердых отходов производства, которые свозятся на свалки или полигоны. Из них в лучшем случае подлежат переработке и последующей утилизации 3–5 %. Надежная и современная информация о состоянии проблемы твёрдых промышленных

отходов (ТПО) в нашей стране, к сожалению, отсутствует. По мнению аналитиков «Из всех экологических опасностей страны, опасность, связанная с твердыми коммунальными отходами ... наименее документирована». Известно, что в СССР отходы размещались где попало. Благо делать это позволяли огромные территории страны.

Email: ecos 123@mail.ru

¹ Для переписки

До последнего времени такая ситуация была и в России. Следует отметить, что в России, по сравнению с Японией и рядом западных стран, большинство (~97 %) ТПО свозилось на свалки и на необустроенные в соответствии с требованиями полигоны, из которых 88 % находились в «неудовлетворительном санитарном состоянии» [1, 2]. ТПО представляют собой нестабильную неконтролируемую смесь строительного мусора, пластмассы, металлов, бумаги, пищевых отходов, резины, стекла и др. Вместе с тем доказано, что это богатый источник вторичных материальных ресурсов (ВМР: в том числе чёрных, цветных, редких и рассеянных металлов), а также, бесплатный энергоноситель.

До сих пор сортировка отходов в России практически не проводится. Это во многом обусловлено следующими факторами [3]: дефицит потребительских услуг и товаров; различия в культуре потребления приводили к меньшим, чем в других странах объемам отходов на одного человека; немаловажное значение имеет слабое экологическое законодательство и существовавшая экономическая система, не обеспечивающая эффективное использование ВМР. В то же время в России производятся, импортируются и потребляются сложные продукты развитого промышленного общества, то есть состав и количество отходов все более приближаются к западным.

Процессы, происходящие в России в настоящее время, приводят к резкому росту количества и разнообразию промышленно-коммунальных отходов, объем и состав которых чрезвычайно разнообразны (рисунок 1) [2].

В России большое количество отходов составляют органические (пищевые); металл, на стекло и пластик приходится по $9{\text -}11~\%$; на дерево, текстиль, резину по 4~% и др.

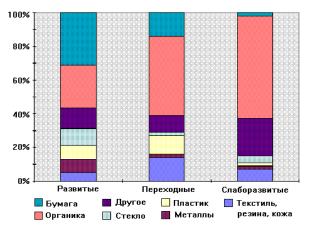


Рисунок 1 — Распределение отходов по категориям в различных странах (в %) [2].

Зарубежный опыт показывает, что рациональная организация переработки отходов даёт возможность использования до 90 % продуктов переработки и утилизации. Технологические рекомендации по наиболее рациональному использованию отходов разрабатываются, исходя из их химического состава. Например, шлаки цветной металлургии содержат до 40 % железа и других ценных металлов; в гальваношламах (ГШ) находятся соединения никеля, цинка, меди, хрома и др. [4].

В настоящее время для России актуальными являются проблемы экологизации производств, переход к малоотходным, а в перспективе к безотходным технологиям; разрабатывается научно обоснованная концепция комплексного использования различных видов отходов, чтобы уже на стадии проектирования, строительства и реконструкции промышленных предприятий применять технические решения по недопущению образования ТПО и необходимости их утилизации. Для этого необходимо внедрение малоотходных энерго- и ресурсосберегающих технологий, позволяющих экономить материалы на каждом цикле производства, минимизировать экологический ущерб, имеющих низкие капитальные затраты и позволяющих получать прибыль.

Целью настоящей работы является разработка технологии переработки и утилизации цинк содержащих отходов с целью извлечения оксида цинка ZnO и использования его в качестве пигмента — наполнителя при изготовлении масляной краски (цинковые белила).

Экспериментальные данные и их обсуждение

Объектами исследования служили отходы линии цинкования предприятия ООО «Сигнал-Недвижимость». Анализы состава гальваношлама показали наличие в их составе соединений железа, цинка, никеля, хрома, и др. (таблица 1, рисунки 2, 3).

Идентификацию соединений в составе ГШ проводили на дериватографе Q-1500 Д в области температур $20 \div 1000$ °C, скорость нагрева 10 °C/мин. в воздушной атмосфере (рисунок 2).

На рисунке 2 характеристические точки в соединениях в составе ГШ отвечают превращениям:

- 1. 32 °С удаление одной молекулы воды из соединения $NiSO_4$ · $7H_2O$ (-1 H_2O);
- $2.~150~^{\circ}\mathrm{C}$ потеря кристаллизационной воды сульфитом хрома $\mathrm{Cr_2(SO_4)_3\cdot 18H_2O}$ ($-12\mathrm{H_2O}\sim t>100~^{\circ}\mathrm{C}$);
 - 3. 197 °С разложение CrO₃ до Cr₂O₃;
 - 4. 230 °С обезвоживание Ni(OH)₂;
- 5. 280 °C ступенчатая дегидратация семиводного сульфата цинка ZnSO₄·7H₂O;

- 6.310 °C перестройка кристаллической решетки $CaSO_4$ с превращением нерастворимого $CaSO_4$ в растворимый;
- 7. 790 °С последующее обезвоживание ${\rm ZnSO_4}$ при $t{>}600$ °С;
- $8.846~^{\circ}{
 m C}$ разложение безводного ${
 m NiSO_4};$
 - 9. 920 °С разложение CaCO₃.

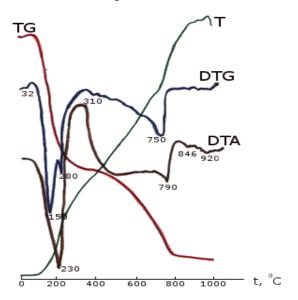


Рисунок 2 — Дериватограмма ГШ ООО «Сигнал-Недвижимость»:

TG — термогравиметрическая кривая;
 T — кривая температуры;
 DTG — дифференциальная

термогравиметрическая скорость изменения массы; DTA — кривая, позволяющая определить изменение энтальпии.

Рентгенофазовый анализ ГШ проводили с помощью рентгеновского дифрактометра «Дрон-3» с Cu_{kx} — излучением и никелевым фильтром (рисунок 3).

Таблица 1 — Состав ГШ (%) ООО «Сигнал-Недвижимость» (г. Энгельс, Саратовской области)

Состав ГШ	Ni^{2+}	Fe^{3+}	Zn^{2+}	Cu^{2+}	$\mathrm{SO_4}^{2 ext{-}}$	Cr^{6+}	Cr^{+3}	Na^{+}	Ca^{2+}
Состав, %	0.01	8.98	21.86	0.21	10.2	3.21	8.63	8.3	3.4

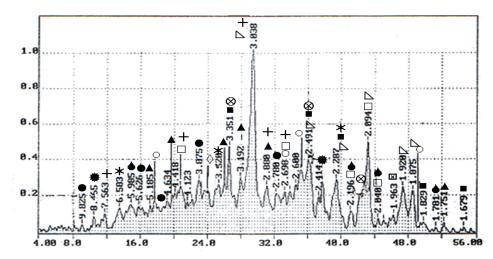


Рисунок 3 – Рентгенограмма гальваношлама ООО «Сигнал-Недвижимость»

Таблица 2 — Последовательный ряд осаждения гидроксидов металлов [5]

Ион	Fe (III)	Cr (lll)	Cu (ll)	Zn (ll)	Fe (ll)	Ni (ll)	Mn (II)	Mg (ll)
pH*	1.5*-4.1**	4.0 – 5.8	5.3 – 6.2	5.4-8.0	6.5 – 9.7	6.7 - 9.5	7.8 – 10.4	9.4-12.4

^{*}первое число — начало осаждения;

Исходный гальваношлам растворяли дистиллированной водой до консистенции сметаны и затем в раствор добавляли концентрированную серную кислоту H_2SO_4 , доводя кислотность до рН=2, при которой достигалось наиболее высокое растворение компонентов гальваношлама и их переход в сульфаты металлов. Полученный раствор, содержащий сульфаты металлов, отделяли фильтрованием от глинисто-песочного осадка и использовали для выделения гидроксида цинка Zn(OH)₂ путём щелочной обработки сульфатных растворов ГШ 40%-м раствором щелочи NaOH в соответствии с последовательным рядом осаждения гидроксидов металлов (таблица 2).

При извлечении $Zn(OH)_2$ в раствор постепенно добавляли щелочь в интервале $pH = 4.0 \div 5.6$ и отделяли и отфильтровывали смесь изумрудного цвета гидроксидов хрома (lll) и меди (ll). При кислотности $pH = 6.2 \div 7.6$ в осадок выпадали белесые кристаллы $Zn(OH)_2$. Их предварительно

высушивали при t = 150 °C и полученный порошок Zn(OH)2 измельчали и прокаливали в муфельной печи ЭКСП-10 при выбранной температуре $t = 600 \pm 5~^{\circ}\mathrm{C}$ в течение 5÷6 часов. При этом был получен оксид ZnO, который исследовали согласно ГОСТ 10503-71 «Краски масляные, готовые к применению» [6] на размер частиц, маслоемкость, плотность частиц, рН водных вытяжек (таблица 3) и применимость в качестве пигмента-наполнителя для изготовления масляной краски (цинковые белила). Порошок оксида цинка имел белый с бежевым оттенком цвет. По данным седиментационного анализа размер частиц составил 10÷40 мкм, при котором не требуется предварительный помол. Более 60 % частиц составляли непористые структуры размером $5 \div 30$ мкм. Это указывает на их низкую маслоемкость и служит важной характеристикой пигментов-наполнителей.

^{**}второе число — полное осаждение гидроксида.

Таблица 3 — Свойства пигментов-наполнителей

Напол-	Кажущаяся	Маслоем-	pH
	плотность,	кость,	вы-
нитель	Γ/cm^3	${ m cm}^3/100\ { m \Gamma}$	тяжки
Kao-	$2.54 \div 2.60$	13÷20	5÷8
лин	2.04, 2.00	10.20	0.0
Мел	$2.69 \div 2.72$	10÷14	9÷10
ZnO	$5.36 \div 5.43$	$23 \div 25$	8÷10

Результаты испытаний показали соответствие свойств оксида ZnO характеристикам традиционно используемх в промышленности пигментов—наполнителей (каолин, мел, слюда и др.).

По ГОСТ 10503-71 готовили цинковые белила и исследовали содержание в них летучих и нелетучих веществ, укрывистость, время высыхания, вязкость и др. (таблица 4). Установлено, что полученные цинковые белила соответствуют требованиям ГОСТ.

Авторами разработана принципиальная технологическая схема производства (рисунок 4) пигмента—наполнителя на основе ZnO, состоящая из широко применяемого в промышленности оборудования. Здесь применяются: транспортер (1), бункера для дозировки гальваношлама (2), ванны кислотной и щелочной обработок (3, 9), центрифуги (10) для отделения образующихся гидроксидов, обжиговая печь (11), бункера готового пигмента (12), который направляется на фасовку.

Проведенная нами эколого-экономическая оценка показала, что при производстве краски можно получить экономическую (расширение производства, увеличение ассортимента продукции, количества рабочих мест, прибыль и др.) и экологическую выгоду — уменьшение площадей для организации полигонов и свалок, снижение отрицательного влияния отходов гальваношламов на окружающую среду и здоровье населения.

Таблица 4 — Характеристики красок (цинковые белила) требованиям ГОСТ 10503-71

Характери-		ржание еств, % нелетучих	Услов- ная вяз- кость, с	Степень перетира, мкм	Укры- вис- тость, Γ/M^2	Время высыхания, ч	Относитель-
ZnO	4.9	95.1	61.3	32	59.3	22.8	0.063
ГОСТ [6]	до 20	≥ 60.0	65-140	≤ 70	≤ 170	24.0	≥ 0.05

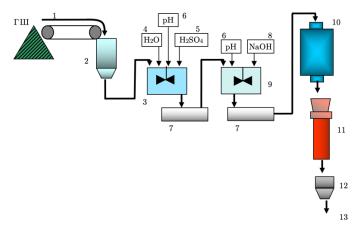


Рисунок 4 — Принципиальная технологическая схема получения пигмента-наполнителя на основе ZnO: 1 — транспортер; 2 — дозатор; 3 — ванна кислотной обработки; 4 — дозатор воды; 5 — дозатор кислоты; 6 — pH-метры; 7 — шнеки-питатели; 8 — дозатор щелочи; 9 — ванна щелочной обработки; 10 — центрифуга; 11 — печь обжига; 12 — бункер готовой продукции; 13 — на фасовку

Заключение

Проведённые исследования показали, что из цинк содержащих гальваношламов можно получать качественные пигменты— наполнители для производства краски (цинковые белила).

На данном этапе на основе проведенных исследований установлены рациональные режимы извлечения ZnO: pH ocaждения гидроксида цинка составила 6.2÷7.6; температура дегидратации — 600±2 °C. Определены основные характеристики пигмента-наполнителя: дисперсность частиц 10-20 мкм: маслоемкость $23-25 \text{ } \Gamma/100 \text{ } \Gamma;$ кажущаяся плотность 5.36-5.43 г/см³ и для цинковых белил: относительная твердость покрытий 0.063; укрывистость 59.3 г/м²; время высыхания краски 22.8 ч; содержание летучих веществ 4.9; условная вязкость 61.3 с; степень перетира 32 мкм. Установлено их соответствие требованиям ГОСТ на получение лакокрасочных покрытий.

Предложена принципиальная технологическая схема для извлечения оксида цинка из отходов гальванических производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Родионов А. И., Клушин В. Н., Систер В. Г. Технологические процессы

экологической безопасности (Основы энвайронменталистики). М: Высшая школа, 2008, 801 с.

- [2]. Гринин А. С., Новиков В. Н. Промышленные и бытовые отходы: хранение, утилизация, переработка. М.: Изд–во ФАИР-ПРЕСС, 2002, 332 с.
- [3]. Булгаков С. Н. Новые технологии комплексной переработки твердых коммунальных отходов дублирующая сырьевая экономика. Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2007, № 6(101), с. 62–64
- [4]. Ольшанская Л. Н., Лазарева Е. Н., Егоров В. В. и др. Технологические аспекты утилизации тяжелых металлов и их соединений из гальваношламов для вторичного применения: монография. Саратов: СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2017, 127 с. ISBN 978-5-9907991-5-8.
- [5]. Лурье Ю. Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1971, 454 с.
- [6]. ГОСТ 10503-71. Краски масляные, готовые к применению. Технические условия. Введен 1971.05.08. М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1971, IV, 27 с.

Ольшанская Любовь Николаевна — д-р хим. наук, профессор, профессор кафедры «Экология и техносферная безопасность», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А. (Российская Федерация, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77).

Лазарева Елена Николаевна — канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры «Естественные и математические науки», Энгельсский технологический институт — филиал Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (Российская Федерация, 413100, Саратовская обл., Энгельс, пл. Свободы, д. 17, к. 3).

Волошкина Юлия Викторовна — магистрант 1 курса кафедры «Экология и техносферная безопасность», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А. (Российская Федерация, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77).

Galvanic sludge as a source of secondary resources for industrial goods

L. N. Olshanskaya*,1, E. N. Lazareva**, Yu. V. Voloshkina*

* Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov Russia

** Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,

Engels, Saratov region, Russia

Abstract

Spontaneous pollution of large areas with a variety of solid and liquid waste has reached alarming proportions in our country. In this regard, it is necessary in the near future to create a special technology for the mass cleaning of land resources from unauthorized dumps of various garbage. The generated and accumulated solid industrial wastes are a source of the most valuable secondary material resources (SMR: ferrous, non-ferrous, rare, scattered metals and their compounds). Technological recommendations for the most rational use of waste are developed based on their chemical composition.

This paper presents the results of studies on the extraction of zinc oxide from zinc-containing waste and its further use as a secondary resource for obtaining a filler pigment in the manufacture of oil paints (zinc white). Rational conditions for the extraction of ZnO (pH of the medium for the extraction of $Zn(OH)_2$ hydroxide, temperature and time of its firing) have been established; a schematic diagram for the manufacture of pigment-filler have been developed.

Keywords

Galvanic sludge, zinc hydroxide, recycling, filler pigments, zinc oxide, paints and varnishes, ZnO production flow chart.

REFERENCES

[1]. Rodionov A. I., Klushin V. N., Sister V. G. Tekhnologicheskiye protsessy ekologicheskoy bezopasnosti (Osnovy envayronmentalistiki) [Technological processes of ecological safety (Fundamentals of environmental studies)]. Moscow, Higher school Publ., 2008, 801 p. (In Russ.)

[2]. Grinin A. S., Novikov V. N. Promyshlennyye i bytovyye otkhody:

khraneniye, utilizatsiya, pererabotka [Industrial and household waste: storage, utilization, processing]. Moscow, FAIR-PRESS Publishing House, 2002, 332 p. (In Russ.)

[3]. Bulgakov S. N. Novyye tekhnologii kompleksnoy pererabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov — dubliruyushchaya syr'yevaya ekonomika [New technologies for complex processing of solid

¹ Corresponding author Email: ecos123@mail.ru

municipal waste — duplicating raw materials economy]. Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka [Building materials, equipment, technologies of the XXI century], 2007, No. 6(101), p. 62–64. (In Russ.)

[4]. Olshanskaya L. N., Lazareva E. N., Egorov V. V. et al. Tekhnologicheskiye aspekty utilizatsii tyazhelykh metallov i ikh soyedineniy iz gal'vanoshlamov dlya vtorichnogo primeneniya: monografiya [Technological aspects of utilization of heavy metals and their compounds from galvanic sludge for secondary use: monograph]. Saratov, Yuri Gagarin

State Technical University of Saratov Publ., 2017, 127 p. ISBN 978-5-9907991-5-8. (In Russ.)

- [5]. Lurie Yu. Yu. Spravochnik po analiticheskoy khimii [Handbook of analytical chemistry]. Moscow, Chemistry Publ., 1971, 454 p. (In Russ.)
- [6]. GOST 10503-71. Kraski maslyanyye, gotovyye k primeneniyu. Tekhnicheskiye usloviya [Oil paints, ready to use. Specifications]. Introduced 1971.05.08. Moscow, Gosstandart of the USSR: Publishing house of standards, 1971, IV, 27 p.

Olshanskaya L. N. — Dr. Sc. (Chem.), Professor, Department of Ecology and Technosphere Safety, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (Polytechnic st., 77, Saratov, 410054, Russian Federation).

Lazareva E. N. — Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Professor, Department of Natural and mathematical sciences, Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (Svoboda sq., 17, bldg. 3, Engels, 413100, Russian Federation).

Voloshkina Yu. V. — undergraduate student, Department of Ecology and Technosphere Safety, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (Polytechnic st., 77, Saratov, 410054, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гальваношламы — как источник вторичных ресурсов для получения промышленных товаров / Л. Н. Ольшанская, Е. Н. Лазарева, Ю. В. Волошкина // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 1(8). С. 7–14.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-7-14

Please cite this article as:

Olshanskaya L. N., Lazareva E. N., Voloshkina Yu. V. Galvanic sludge as a source of secondary resources for industrial goods. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 1(8), pp. 7–14.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-7-14

УДК 66.045.1

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-15-23

Разработка модели аппарата кипящего слоя с рубашкой охлаждения

А. В. Митрофанов^{*,1}, С. В. Василевич^{**}, Н. С. Шпейнова^{*}, З. В. Зарубин^{*}

- * Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина, Иваново, Россия
- ** Белорусская государственная академия авиации, Минск, Республика Беларусь

Аннотация

Целью работы является разработка одномерной математической модели функционирования аппарата кипящего слоя с рубашкой охлаждения. В статье изложены основные положения предлагаемой математической модели аппарата кипящего слоя с рубашкой охлаждения и результаты численных экспериментов. Для описания основных процессов при функционировании установки использован математический аппарат цепей Маркова. Аппарат представлен цепью ячеек, а необходимые характеристики процессов организованы в векторы состояния. Изменение объекта фиксируется в дискретные моменты времени и описывается с использованием рекуррентных вычислительных процедур. Известные критериальные зависимости использованы для идентификации параметров модели, но расчет ведется с учетом состояния каждой ячейки цепи. Таким образом, аппарат рассматривается как система с распределенными характеристиками, что повышает достоверность описания процессов переноса.

Ключевые слова

Псевдоожиженный слой, теплообмен, газовзвесь, численное моделирование, рубашка охлаждения.

Введение

Аппараты, использующие технику псевдоожижения зернистых сред, широко распространены в различных отраслях материального производства [1–2]. Тем не менее, вопросы прогнозирования параметров работы подобной аппаратуры остаются весьма острыми [1–3], тем более что описанию подлежит не только явление псевдоожижения, но (даже в большей степени) целевой процесс, в ходе которого изменяются свойства фаз и характеристики всей системы. Кроме того, расчет процессов

осуществляется в некоторой последовательности, учитывающей иерархию и взаимообусловленность отдельных процессов [3–4].

Приняв во внимание описанные общие соображения, оказывается возможным построить различные модели процессов в псевдоожиженном слое, отличающиеся степенью декомпозиции объекта [5–6]. При этом в моделях, где масштаб моделирования предполагает декомпозицию до уровня отдельных частиц, возникают значительные трудности с параметрической

Email: and2mit@mail.ru

¹ Для переписки:

идентификацией многих параметров (например, характеристик контактного взаимодействия частиц и др.) и вычислительной громоздкостью расчетных процедур, что ограничивает их применимость в инженерной практике [6–8]. Поэтому инженерные справочники в основном дают указания к описанию аппаратов как объектов с однородным распределением свойств [3–4], что упрощает расчеты, но, естественно, снижает информативность методик.

Указанные трудности побуждают разрабатывать простые и вместе с тем информативные модели, отличающиеся некоторым компромиссным (мезоскопическим) масштабом моделирования [6–7].

Целью настоящей работы является развитие предложенного ранее подхода к описанию химико-технологической аппаратуры с псевдоожиженным слоем на основе теории цепей Маркова для описания гидромеханики слоя и межфазного теплообмена газ-частицы [7–9]. Задачей настоящего исследования является распространение указанного подхода на случай псевдоожижения частиц, где целевой процесс состоит в обеспечении теплообмена между газовзвесью и охлаждаемым корпусом аппарата.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения

Для построения математической модели в настоящей работе применяется математический аппарат теории счетных цепей Маркова [7–9]. Расчетная схема процесса проиллюстрирована на рисунке 1.

Алгоритм сборки моделей псевдоожижения на основе теории цепей Маркова подробно изложен в предыдущих работах [7–10]. Поэтому в настоящей статье акцент будет сделан не на описании гидромеханики слоя (наиболее подробно описан в работах [7,10]), а на формировании представлений о теплообмене между слоем и

поверхностями теплообмена, так как именно решение этих вопросов определяет новизну построений.

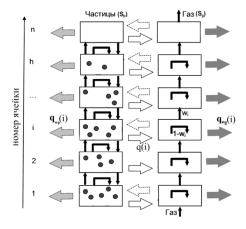


Рисунок 1 — расчетная схема моделирования псевдоожижения и теплообмена

При использовании ячеечной методологии теории цепей Маркова пространство аппарата представляется набором из конечного числа n объемов с идеальным смешением свойств (ячеек цепи Маркова). Поиск решения осуществляется в одномерной постановке задачи, поэтому для конкретного момента времени изменение свойств фиксируется только при переходе от одной ячейки цепи к другой (каждая ячейка характеризуется высотой Δx). Состояние аппарата описывается наборами параметров, записанных в векторы состояния ${f S}$ (содержат массы фаз в ячейках) и Q (описывают распределение теплоты фаз по ячейкам). Изменение состояния системы определяется в дискретные моменты времени $t_k = (k-1) \Delta t$, где Δt — интервал времени между наблюдениями; к — номер временного шага. Таким образом, состояние системы описывается четырьмя векторами состояния: $\mathbf{S}_{\mathbf{g}}$ и $\mathbf{S}_{\mathbf{p}}$, $\mathbf{Q}_{\mathbf{g}}$ и $\mathbf{Q}_{\mathbf{p}}$ (индексы "д" и "р" относят вектор к газовой или твердой фазам соответственно). Переход системы из одного состояния в следующее описывается рекуррентными матричными соотношениями:

$$\mathbf{S}_{p}^{k+1} = \mathbf{P}_{p}^{k} \cdot \mathbf{S}_{p}^{k}, \tag{1}$$

$$\mathbf{S}_{g}^{k+1} = \mathbf{P}_{g}^{k} \cdot \mathbf{S}_{g}^{k} + \mathbf{S}_{f}, \tag{2}$$

где \mathbf{S}_{f} — вектор поступления газа под газораспределительное устройство, $\mathbf{P}_{\mathrm{p}}^{\ k}$ и $\mathbf{P}_{\mathrm{g}}^{\ k}$ — матрицы переходных вероятностей для соответствующих фаз, которые являются основными операторами модели, описывающей движение фаз при формировании слоя. Формирование этих матриц подробно описано в работах [7–10], а процедуры идентификации численных значений входящих в них вероятностей переходов частиц и газа из ячейки в ячейку наиболее подробно описаны в работе [7].

Наиболее существенными для настоящей работы являются следующие общие замечания: за время Δt допускается переход некоторой доли частиц (или газа) в соседнюю ячейку, при этом для газа принят режим идеального вытеснения, а для частиц возможны перемещения и вперед, и назад. Скорость фильтрации газа в ячейках зависит от присутствия частиц, а сами содержания частиц поставлены в соответствие скоростям газа, что делает модель нелинейной. Для идентификации всех параметров модели необходимы зависимости для расчета коэффициента сопротивления частиц и коэффициента макродиффузии, который определяет случайный заброс частиц в соседние ячейки (перемешивание в модели слоя). Для проведения численных экспериментов эти параметры были установлены постоянными (коэффициент сопротивления установлен равным 0.9, а коэффициент макродиффузии равным $0.005 \text{ m}^2/\text{c}$).

Расчетные процедуры (1)–(2) позволяют описывать формирование аксиального распределения твердой фазы и поля скоростей газа с учетом переменной по высоте порозности слоя [7–10]. Эти знания необходимы для описания теплового состояния фаз в аппарате с учетом межфазного теплообмена и дополнительных

источников и стоков теплоты. Балансовые соотношения можно записать в следуюшем виде:

$$\mathbf{Q}_{p}^{k+1} = \mathbf{P}_{p}^{k} \cdot \mathbf{Q}_{p}^{k} + \mathbf{q}^{k} - \mathbf{q}_{wp}^{k}, \tag{3}$$

$$\mathbf{Q}_{\mathrm{g}}^{k+1} = \mathbf{P}_{\mathrm{g}}^{k} \cdot \mathbf{Q}_{\mathrm{g}}^{k} + \mathbf{Q}_{\mathrm{f}} - \mathbf{q}^{k} - \mathbf{q}_{wg}^{k}, \qquad (4)$$

где $\mathbf{Q}_{\mathrm{p}}^{\ \mathrm{k}}$ и $\mathbf{Q}_{\mathrm{g}}^{\ \mathrm{k}}$ — матрицы содержания теплоты в твердой и газовой фазах соответственно, $\mathbf{P}_{\mathrm{p}}^{\ \mathrm{k}}$ и $\mathbf{P}_{\mathrm{g}}^{\ \mathrm{k}}$ — матрицы переходных вероятностей для соответствующих фаз, которые описывают перемещение теплоты вместе с частицами и газом, q — вектор теплоты, которой обмениваются газ и частицы, \mathbf{Q}_{f} — вектор подачи теплоты, содержащейся в поступающем под газораспределительное устройство ожижающем агенте, \mathbf{q}_{wg} и \mathbf{q}_{wp} — векторы теплоты, передающейся газу и частицам соответповерхности теплообмена ственно от (стенки аппарата).

Соотношения (3)–(4) являются достаточно очевидными балансовыми уравнениями. При этом идентификация некоторых слагаемых не вызывает затруднений (например, при известном расходе воздуха и заданных параметрах его теплофизического состояния оценка величины \mathbf{Q}_{f} не представляет трудностей). Идентификация других слагаемых менее однозначна. Так, оценка количества теплоты \mathbf{q}_{i} , которой обмениваются частицы и газ в і-й ячейке за время Δt , может быть выполнена как [7]:

$$q_i^k = \alpha_i^k \cdot \mathbf{F}_i^k \cdot \Delta t \cdot (T_{p,i}^k - T_{q,i}^k), \tag{5}$$

где α — коэффициент межфазного теплообмена (зависит от режима обтекания частиц потоком в ячейке), \mathbf{F} — поверхность теплообмена, которая зависит от содержания частиц в ячейке, T_p и T_g — температуры частиц и газа.

Коэффициент теплоотдачи газ-частицы α, который определяется дифференцированно для і-й ячейки (является локальным), рассчитывается по известным корреляционным зависимостям для определяемых критериев теплообмена [3]:

$$Nu_i^k = 0.016 \cdot \left(\frac{Re_i^k}{\varepsilon_i^k}\right) \cdot \Pr^{0.33},$$
 при $\frac{Re_i^k}{\varepsilon_i^k} < 200;$ (6)

$$Nu_i^k = 0.4 \cdot \left(\frac{Re_i^k}{\varepsilon_i^k}\right) \cdot \Pr^{0.33},$$
 при $\frac{Re_i^k}{\varepsilon_i^k} > 200.$ (7)

Теплота, которая передается от частиц и газа в аппарате к его стенке, рассчитывается также с использованием некоторого эффективного коэффициента теплоотдачи α_w , который отдельно рассчитывается для каждой рассматриваемой ячейки. Определяемый критерий теплообмена может быть рассчитан как [3]:

$$Nu_{w,i}^{k} = Nu_{g,i}^{k} \cdot \left[1 + 6.7 \cdot \left(\frac{\mu \cdot c_{p}}{c_{q}}\right) \cdot \left(Re_{i}^{k}\right)^{1/3}\right], \quad (8)$$

где $\mathrm{Nu_g}$ — число Нуссельта для процесса теплообмена газ-стенка, $\mathrm{Re_0}$ — число Рейнольдса для процесса движения газа в пустом сечении аппарата, μ — динамическая вязкость ожижающего агента, $\mathrm{c_p}$ и $\mathrm{c_g}$ — теплоемкости материала зерен сыпучей среды и ожижающего агента.

Зависимость (8) позволяет оценить общее количество теплоты, отдаваемое газовзвесью стенке, однако, с точки зрения модельных представлений (3)–(4) необходимо каким-то образом разделить эту теплоту между частицами и газом, составляющими среду внутри аппарата. Наиболее простым допущением, на наш взгляд, будет предположить, что теплота qw распределяется долями, зависящими от порозности:

$$q_{wp,i}^k = q_{w,i}^k \cdot (1 - \varepsilon_i^k), \tag{9}$$

$$q_{wg,i}^k = q_{w,i}^k \cdot \varepsilon_i^k, \tag{10}$$

где ε_i — порозность в i-й ячейке, которая легко рассчитывается при известном распределении фаз по цепи, q_w — общее

количество теплоты, которым обмениваются стенка с поверхностью $F_{\rm w}$ и газовзвесь с температурой $T_{\rm s}$:

$$q_{w,i}^k = \alpha_{w,i}^k \cdot \mathbf{F}_{w,i}^k \cdot \Delta t \cdot (T_w^k - T_{s,i}^k), \tag{11}$$

где α_w — коэффициент межфазного теплообмена, $\mathbf{F_w}$ — поверхность обмена, T_w (полагается постоянной) и T_s — температуры стенки и газовзвеси.

Таким образом соотношения (5)–(11) позволяют выполнить замыкание системы общих балансовых уравнений (1)–(4) и провести вычислительные эксперименты с получением достоверных в качественном отношении результатов.

Результаты

На рисунках 2–5 представлены результаты численных экспериментов с моделью. Поскольку свойства дисперсной фазы полагаются неизменными, то все представленные расчеты выполнены для одной гидромеханической ситуации (фиктивная скорость воздуха составляет 4 м/с при диаметре аппарата 10 см, ожижаемый материал — монофракция модельного материала с диаметром зерен 1 мм). Пример распределения содержания частиц по высоте аппарата показан на рисунке 2.

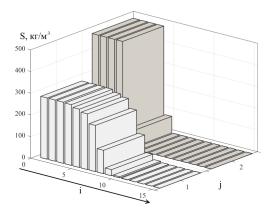


Рисунок 2 — распределение модельного зернистого материала по высоте аппарата (j = 1 - псевдоожиженное состояние, j = 2 - рахлонасыпанное состояние)

На рисунке 3 показано установившееся распределение температур фаз при условии, что температура стенки равна

температуре ожижающего агента (30 °C). Установившееся распределение температур является очевидным в данном случае и здесь приводится только для демонстрации качественной непротиворечивости модели. В тех ячейках цепи, где содержание материала равно нулю, температуре твердой фазы также присваивается нулевое значение (этим вычислительным эффектом объясняется падение температуры в последней ячейки цепи).

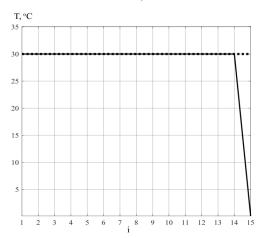


Рисунок 3 — распределение температур фаз по высоте аппарата при $T_w = T_{g,1} = 30~^{\circ}\mathrm{C}$ (пунктирная линия — температура газа, сплошная линия — температура частиц)

На рисунке 4 показано установившееся распределение температур фаз при условии, что температура стенки выше (100 °C) температуры ожижающего газа (30 °C). Из рисунка следует, что ожижающий газ, поступивший с температурой 30 °C, по мере прохождения вдоль аппарата нагревается до 80 °C, при этом температура охлаждаемого сыпучего материала не может опуститься ниже 53 °C (с учетом перемешивающих возможностей слоя).

Обратная ситуация проиллюстрирована на рисунке 5, который характеризует режим, при котором температура стенки зафиксирована на 30 °C, а температура ожижающего агента составляет на входе в аппарат 100°C. Температура ожижающего агента снижается по мере продвижения

вдоль аппарата, при этом материал охлаждается только до 77...80 $^{\circ}$ C.

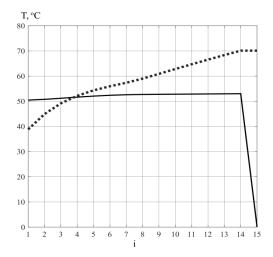
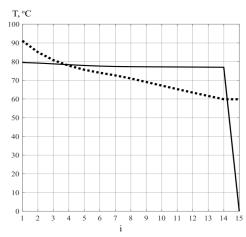


Рисунок 4 — распределение температур фаз по высоте аппарата при

$$T_{\rm w}=100~{\rm ^{\circ}C}$$
 и $T_{\rm g,1}=30~{\rm ^{\circ}C}$ (пунктирная линия — температура газа, сплошная линия — температура частиц)



 $\begin{tabular}{ll} {\bf Pucyhok} \ 5 & — {\it pacnpege} \end{tabular} \begin{tabular}{ll} {\it pacnpege} \end{tabular} \$

$$T_{\rm w}=30~^{\circ}{\rm C}$$
 и $T_{\rm g,1}=100~^{\circ}{\rm C}$ (пунктирная линия — температура газа, сплошная линия — температура частиц)

Обсуждение полученных результатов

Полученные в ходе численных экспериментов с предложенной моделью результаты показывают, во-первых, качественную непротиворечивость модели и ее высокую информативность (она позволяет фиксировать неоднородность пространственных характеристик процессов

теплообмена и псевдоожижения даже в сравнительно небольших аппаратах). Прогностические возможности предложенной модели должны подкрепляться надежными процедурами параметрической идентификации, при этом совершенно не очевидно, что имеющиеся эмпирические зависимости будут пригодны для использования, так как получены они в основном путем обработки не локальных, а интегральных параметров процессов.

Заключение

Предложенная математическая модель функционирования аппарата псевдоожиженного слоя с рубашкой охлаждения дает возможность рассчитывать аппарат как объект с распределенными параметрами, что повышает адекватность описания процессов переноса. При должном качестве организации параметрической идентификации и проведении необходимых экспериментальных процедур для исследования локальных параметров теплообмена модель может быть рассмотрена как достоверная научная основа расчета теплообменной аппаратуры с кипящим слоем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Псевдоожижение. Под. ред. Дэвидсона И. Ф., Харрисона Д. Пер. с англ. М.: Химия, 1974, 728 с.
- [2]. Smith P. G. Applications of fluidization to food processing. UK: Blackwellscience, 2007, 243 p.
- [3]. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. І. Под. ред. Островского Г. М. СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2004, 848 с.
- [4]. Кафаров В. В., Дорохов И. Н. Системный анализ процессов химической технологии. Топологический принцип формализации. М.: Наука, 1979, 394 с.

[5]. Sturm M., Wirtz S., Scherer V., Denecke J. Coupled DEM-CFD simulation of pneumatically conveyed granular media. *Chemical Engineering & Technology.* 2010, vol. 33, no.7, pp. 1184–1192.

DOI: 10.1002/ceat.201000162

- [6]. Li J. et. al. From Multiscale Modeling to Meso-Science. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, 484 p.
- [7]. Mitrofanov A. V., Mizonov V. E., Tannous K., Ovchinnikov L. N. A Markov chain model to describe fluidization of particles with time-varying properties. *Particulate Science and Technology*, 2018, vol. 36, no. 2, pp. 244–253.

DOI: 10.1080/02726351.2016.1243180

[8]. Mizonov V., Mitrofanov A., Camelo A., Ovchinnikov L. Theoretical Study of Particulate Flows Formation in Circulating Fluidized Bed. *Recent Innovations in Chemical Engineering*, 2018, no. 11(1), pp. 20–28.

DOI: 10.2174/2405520410666170620105102

- [9]. Mizonov V. E., Mitrofanov A. V. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology. Advances in engineering research. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2020, pp. 1–74.
- [10]. Митрофанов А. В., Мизонов В. Е., Шпейнова Н. С. и др. Опытно-теоретическое исследование аксиального распределения частиц твердой фазы в кипящем слое. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2021, т. 64, № 4, с. 349–362.

DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-4-349-362

Митрофанов Андрей Васильевич — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры прикладной математики, Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина (Российская Федерация, 153003, Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34).

Василевич Сергей Владимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент, Белорусская государственная академия авиации (Республика Беларусь, 220096, Минск, ул. Уборевича, д. 77).

Шпейнова Наталия Сергеевна — аспирант кафедры прикладной математики, Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина (Российская Федерация, 153003, Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34).

Зарубин Захар Викторович — заместитель начальника учебно-методического управления, Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина (Российская Федерация, 153003, Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34).

Development of a model of a fluidized bed apparatus with a cooling jacket

A. V. Mitrofanov^{*,1}, S. V. Vasilevich^{**}, N. S. Shpeynova^{*}, Z. V. Zarubin^{*}

* Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia

Abstract

The aim of the paper is to develop a one-dimensional mathematical model of the functioning of the fluidized bed apparatus with a cooling jacket. The article presents the main provisions of the proposed mathematical model of a fluidized bed apparatus with a cooling jacket and the results of numerical experiments. To describe the main processes in the operation of the setup, the mathematical apparatus of Markov chains is used. The apparatus is represented by a chain of cells, and the necessary characteristics of the processes are organized into state vectors. The evolution of the object is registered at discrete points in time and described using recurrent computational procedures. Known criterion dependencies are used to identify the model parameters, but the calculation is carried out taking into account the state of each cell of the chain. Thus, the device is considered as a system with distributed characteristics, which increases the reliability of the description of the transfer processes.

Keywords

Fluidized bed, heat exchange, gas suspension, numerical modeling, cooling jacket.

^{**} Belarusian State Academy of Aviation, Minsk, Republic of Belarus

¹ Corresponding author Email: and2mit@mail.ru

REFERENCES

- [1]. Psevdoozhizheniye [Pseudo-Fluidization]. Ed. Davidson I. F., Harrison D. Moscow: Khimiya Publ., 1974, 728 p. (In Russ.)
- [2]. Smith P. G. Applications of fluidization to food processing. UK: Blackwell-science, 2007, 243 p.
- [3]. Novyy spravochnik khimika i tekhnologa. Protsessy i apparaty khimicheskikh tekhnologiy [Handbook of Chemist and Technologist. Processes and apparatus of chemical technology]. Part I. Ostrovsky G. M. (ed.). St. Petersburg: ANO NPO "Professional" Publ., 2004, 848 p. (In Russ.)
- [4]. Kafarov V. V., Dorokhov I. N. Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii. Topologicheskiy printsip formalizatsii [System analysis of chemical technology processes. Topological principle of formalization]. Moscow: Nauka Publ., 1979, 394 p. (In Russ.)
- [5]. Sturm M., Wirtz S., Scherer V., Denecke J. Coupled DEM-CFD simulation of pneumatically conveyed granular media. *Chemical Engineering & Technology.* 2010, vol. 33, no. 7, pp. 1184–1192. DOI: 10.1002/ceat.201000162
- [6]. Li J. et. al. From Multiscale Modeling to Meso-Science. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, 484 p.
- [7]. Mitrofanov A. V., Mizonov V. E., Tannous K., Ovchinnikov L. N. A Markov

chain model to describe fluidization of particles with time-varying properties. *Particulate Science and Technology*, 2018, vol. 36, no. 2, pp. 244–253.

DOI: 10.1080/02726351.2016.1243180

[8]. Mizonov V., Mitrofanov A., Camelo A., Ovchinnikov L. Theoretical Study of Particulate Flows Formation in Circulating Fluidized Bed. *Recent Innovations in Chemical Engineering*, 2018, no. 11(1), pp. 20–28.

DOI: 10.2174/2405520410666170620105102

- [9]. Mizonov V. E., Mitrofanov A. V. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology. Advances in engineering research. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2020, pp. 1–74.
- [10]. Mitrofanov A. V., Mizonov V. E., Shpeynova N. S., Vasilevich S. V., Kasatkina N. K. Opytno-teoreticheskoye issledovaniye ak-sial'nogo raspredeleniya chastits tverdoy fazy v kipyashchem sloye. Experimental and Theoretical Study of the Axial Distribution of Solid Phase Particles in a Fluidized Bed]. Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obyedineniy SNG. [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc], 2021, 64 (4), pp. 349–362. (In Russ.) DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-4-349-362

Mitrofanov A. V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Department of Applied Mathematics, Ivanovo State Power Engineering University (Rabfakovskaya st., 34, Ivanovo, 153003, Russian Federation).

Vasilevich S. V. — Cand. Sc (Eng), Assoc. Professor, Belarusian State Academy of Aviation (Uborevicha st., 77, Minsk, 220096, Republic of Belarus).

Shpeynova N. S. — Postgraduate student, Department of Applied Mathematics, Ivanovo State Power Engineering University (Rabfakovskaya st., 34, Ivanovo, 153003, Russian Federation).

Zarubin Z. V. — Deputy Head of the Educational and Methodological Department, Ivanovo State Power Engineering University (Rabfakovskaya st., 34, Ivanovo, 153003, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Разработка модели аппарата кипящего слоя с рубашкой охлаждения / А. В. Митрофанов, С. В. Василевич, Н. С. Шпейнова, З. В. Зарубин // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. N_2 1(8). С. 15 – 23.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-15-23

Please cite this article as:

Mitrofanov A. V., Vasilevich S. V., Shpeynova N. S., Zarubin Z. V. Development of a model of a fluidized bed apparatus with a cooling jacket. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 1(8), pp. 15-23.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-15-23

УДК 66.023

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-24-38

Интенсификация процесса адсорбции за счет секционирования объема адсорберов

H. A. Самойлов*,1

* Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Аннотация

Рассмотрено направление интенсификации химико-технологических адсорбционных процессов, основанное на разделении слоя адсорбента на секции. Секционирование приводит к улучшению гидродинамической обстановки и созданию за счет этого резервов, обеспечивающих в пределах сохранения объема технологической аппаратуры увеличение четкости разделения, производительности по перерабатываемому сырью, энерго- и ресурсосбережение. В непрерывных адсорбционных процессах секционирование позволяет сформировать и вовлечь в технологический процесс дополнительные зоны контакта фаз, в периодических — увеличить динамическую активность адсорбента. Приведены элементы расчета и примеры конструкций аппаратов с совершенствованием их рабочего пространства за счет его секционирования.

Ключевые слова

Секционирование, адсорбция, активность адсорбента, массообмен, гидродинамика, теплопередача, массообменные аппараты, эффективность секционирования.

Введение

Проблема интенсификации адсорбционных процессов решается в разнообразных по методологии направлениях: выравнивание поля концентраций извлекаемого компонента в свободном пространстве слоя адсорбента каким-либо механическим приемом [1, 2] или физическим воздействием на сплошную или дисперсную фазу системы [3], подбором технологических параметров ведения процесса [4, 5], совершенствованием структуры сорбента [6].

В промышленности адсорбционные процессы осуществляют в конструктивно довольно разнообразных аппаратах с цилиндрическим корпусом, которые можно

разделить на три класса: адсорберы с движущимся слоем адсорбента (гиперсорберы), с псевдоожиженным (кипящим) и стационарным (неподвижным) слоем адсорбента [7], причем последние применяются наиболее часто в силу простоты конструктивного и технологического оформлениия.

В отличие от других массообменных процессов (ректификация, абсорбция и др), в которых массообмен реализуется на контактных устройствах (тарелках, насадках) по всей высоте аппарата, адсорбционный процесс обычно протекает в слое адсорбента относительно небольшой высоты, называемом зоной массопередачи. В связи

 $Email:\ naum.samoilow@yandex.ru$

 $^{^{1}}$ Для nepenucku:

с этим необходимо решить задачу: каким образом разместить адсорбент в аппарате, чтобы разделяющие свойства адсорбента проявились наиболее эффективно, и при этом уменьшить расход дорогостоящего адсорбента в промышленных условиях. Довольно полезным приемом решения такой задачи оказалось секционирование слоя адсорбента в аппарате

В настоящей статье рассмотрены некоторые перспективные направления секционирования технологических аппаратов и новые конструктивные решения этой задачи.

Секционирование массообменных аппаратов с движущимися потоками взаимодействующих масс

По своей сущности массообменные колонные аппараты в процессах ректификации, абсорбции, жидкостной экстракции с разнообразными контактными устройствами (тарелками) — секционированы, однако при исследовании и моделировании работы систем массообменных колонн с частично и полностью связанными потоками, позволяющими существенно снизить энергозатраты на реализацию процесса, А. А. Кондратьев [8] пришел к парадоксальному на первый взгляд выводу, что возможен расчет, а следовательно и реализация таких систем, при секционировании массообменного аппарата не только горизонтально (полотнами массообменных тарелок), но и вертикально — сплошными перегородками, проходящими внутри колонны и сквозь условных теоретических тарелок при сохранении количества взаимодействующих фаз. Суть его идеи заключалась в том, что при вертикальном секционировании колонны в ней увеличивалось число ступеней контакта фаз и, как следствие, росла четкость разделения [9]. Подобный результат достигался за счет

того, что потоки двух фаз в зоне секционирования распределялись по секциям таким образом, что суммарная масса потоков в горизонтальном сечении колонны обычной и секционированной совпадали, но качество разделения было разным. Особенно положительно влияло это секционирование на процесс, когда физико-химические свойства разделяемых компонентов (константы фазового равновесия, относительные летучести, коэффициенты разделения) существенно разнятся, что особенно характерно для процесса адсорбции целевого компонента, когда очищаемый поток практически не сорбируется.

Сущность эффекта секционирования рассмотрим на примере сравнения расчетов обыкновенной массообменной колонны — гиперсорбера с проведением стадий адсорбции и регенерации адсорбента за счет теплоподвода в одном аппарате и его секционированного варианта в процессе извлечения бутана и изопентана из потока плохо сорбируемого этана с получением в процессе разделения сырья трех фракций: этановой (фракция 1), бутановой (фракция 2) и изопентановой (фракция 3), с коэффициентами разделения компонентов C_2 , C_4 и C_5 57, 3.5 и 1 при составе исходного сырья по этим компонентам соответственно 85, 10 и 5 % масс (рисунок 1).

Отборы конечных продуктов разделения приняты равными потенциальному содержанию компонентов в исходной смеси. Принятая эффективность работы классического гиперсорбера соответствует 18 теоретическим ступеням адсорбции. Исходная смесь вводится на VII ступень адсорбции (счет с верха колонны), отбор легкой фракции 1 осуществляют с верхней, тяжелой фракции 3 с нижней и промежуточной фракции 2 с XI_L ступени адсорбции из восходящего потока газа (рисунок 1,6).

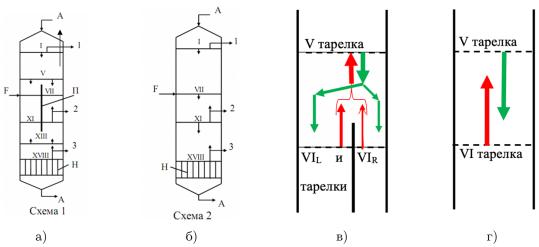


Рисунок 1 — Принципиальные схемы гиперсорберов (а,б) секционированного (схема 1) и классического (схема 2) типов и соответствующие им встречные неравновесные потоки между V и VI ступенями адсорбции (в,г)

I—XVIII — номера ступени адсорбции; F — исходная смесь; A — адсорбент; Π — разделительная перегородка; H — нагреватель (зона десорбции); 1, 2 и 3 — получаемые фракции

Расчет секционированного аппарата выполняется по классической схеме «от тарелки к тарелке», в которой учтено разделение нисходящего потока или объединение восходящего потока на границах секции. При этом расходы потоков в аппарате до секционирования и после секционирования в любом месте сечения в целом остаются одинаковыми, этот принцип позволяет разделять контактные устройства перегородкой на две секции, создавая две теоретические тарелки вместо одной. Так, например, при перемещении адсорбента, насыщающегося сорбируемыми примесями из V-й ступени адсорбции (j) в VI-ю ступень (j+1) (рисунок 1в), разделение потока адсорбента на границе двух ступеней описывается уравнениями:

$$G_j = G_{j+1,R} + G_{j+1,L}, (1)$$

$$G_j c_{j,i} = G_{j+1,R} c_{j,i} + G_{j+1,L} c_{j,i},$$
 (2)

$$\frac{G_{j+1,R}}{G_{j+1,L}} = S_R / S_L, \tag{3}$$

где G, с и S — соответственно масса адсорбента, концентрация в нем і-го компонента газового потока, S — площадь нормального сечения соответствующей секции

справа (R) и слева (L) от разделительной перегородки.

Принятые для расчетов величины расходов восходящего потока газа и адсорбированного газа в нисходящем потоке адсорбента по ступеням адсорбции приведены в таблице 1 (эти величины обеспечиваются кратностью подачи адсорбента и подводом тепла через нагреватель в зоне десорбции), составы конечных продуктов разделения даны в таблице 2.

Из итогов расчета видно, что новый способ адсорбции в сложной колонне позволяет повысить четкость разделения по границе между компонентами промежуточной и тяжелой фракций за счет того, что в секционированном гиперсорбере фракционирование осуществляется на 25 теоретических тарелках вместо 18 в классическом аппарате при их одинаковых размерах. Дополнительные семь теоретических тарелок позволили резко снизить содержание примесей в бутановой фракции с 17.18% до 13.99% и в изопентановой фракции с 18.53% до 9.5% при незначительном увеличении примеси бутана в этановой фракции на 0.69%.

Таблица 1 — Расход восходящего потока газа и адорбированного газа по ступеням

адсорбции, кг на 100 кг исходной смеси

адсороции, кг на 100 кг исходнои смеси							
	Cx	ема 1*		Схема 2			
Восходящий		Восходящий Адсорбированный		Восходящий	Адсорбированный		
поток газа		газ		поток газа	газ		
85		12		85	12		
9	7	14		97	14		
9	9	1	5	99	15		
10	00	1	6	100	16		
10)1	16		101	16		
98	3	6 10		101	16		
98	3	10 10		101	20		
2	3	10	10	5	20		
2	3	10	10	5	20		
2	3	10	10	5	20		
2	13	10	10	15	20		
2	13	10	10	15	20		
15		20		15	20		
15		20		15	20		
15		20		15	20		
15		20		15	20		
15		20		15	20		
20			0	20	0		
	Восхо, поток 8 9 9 10 10 98 98 2 2 2 2 1 1 1	Сходящий поток газа 85 97 99 100 101 98 3 98 3 2 3 2 3 2 13 2 13 15 15 15 15	Схема 1* Восходящий поток газа Адсорбил газа 85 1 97 1 99 1 100 1 101 1 98 3 6 98 3 10 2 3 10 2 3 10 2 3 10 2 13 10 2 13 10 2 13 10 15 2 15 2 15 2 15 2 15 2 15 2 15 2 15 2 15 2	Схема 1* Восходящий поток газа Адсорбированный газ 85 12 97 14 99 15 100 16 101 16 98 3 6 10 98 3 10 10 2 3 10 10 2 3 10 10 2 3 10 10 2 13 10 10 2 13 10 10 15 20 15 20 15 20 15 20 15 20 15 20 15 20 15 20 15 20 15 20	Схема 1* Схема 1* Схема 1* Схема 1* Схема 1* Восходящий поток газа 85 12 85 97 14 97 99 15 99 100 16 100 101 16 101 98 3 6 10 101 98 3 10 10 5 2 3 10 10 5 2 3 10 10 5 2 3 10 10 5 2 13 10 10 15 2 13 10 10 15 2 13 10 10 15 15 20 15 15 20 15 15 20 15 15 20 15 15 20 15 15 20		

^{*} В схеме 1 для ступеней контакта VI-XII цифры левой колонки ($_{L}$) соответствуют зоне ввода исходной смеси, правой ($_{R}$) — зоне вывода промежуточной фракции

Таблица 2 — Составы конечных продуктов разделения адсорбера, % масс.

Продукты разделе-	Volumerove	Содержание компонента		
кин	Компонент	Схема 1	Схема 2	
	Этан	98.91	99.6	
Фракция 1	Бутан	1.09	0.4	
	Изопентан	_	_	
	Этан	9.25	7,92	
Фракция 2	Бутан	86.01	82.82	
	Изопентан	4.74	9.26	
	Этан	_	_	
Фракция 3	Бутан Изопентан	9.50 90.50	18.53 81.47	

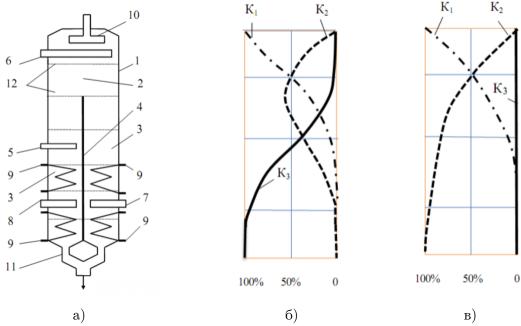


Рисунок 2 — Схема адсорбера непрерывного действия (а) и распределения концентраций компонентов K1, K2, K3 в газовой фазе в левой (б) и правой (в) секциях адсорбера для разделения трехкомпонентной смеси

Секционирование гиперсорбера с дробным подводом тепла позволяет сформировать в аппарате хроматографические секции. На рисунке 2 изображена схема адсорбера непрерывного действия, разработанная для разделения трехкомпонентной смеси на три продукта, каждый из которых представляет собой концентрат одного из компонентов в движущемся слое.

В корпусе адсорбера 1 размещены адсорбционные 2 и хроматографические секции 3, разделенные вертикальной пластиной 4. Между адсорбционной и первой хроматографической секциями располагается распределительная тарелка 5 для ввода исходного сырья. В верхней части корпуса 1 расположена аккумулирующая тарелка 6 для вывода очищенного газа, в нижней части каждой хроматографической секции расположены аккумулирующие тарелки 7 и 8 для вывода целевых фракций. Хроматрографические секции включают змеевики 9 для подачи теплоносителя: верхний — для десорбции легкой нижний примеси, для десорбции основного извлекаемого компонента. Корпус адсорбера снабжен устройствами 10 и 11 для ввода свежего и вывода отработанного адсорбента и колосниковыми тарелками 12 для выравнивания потока.

Адсорбент через устройство 10 вводится в адсорбер и вступает в противоточный контакт с сырьем, содержащим три компонента, вводимым через распределительную тарелку 5. При этом в адсорбент из сырьевого потока преимущественно переходят наиболее легко адсорбируемые второй и третий компоненты. В том месте адсорбционной секции 2, где концентрации извлекаемых компонентов в адсорбенте наиболее существенно различаются между собой, происходит разделение потока адсорбента на два потока при помощи пластины 4. Часть потока адсорбента направляется в хроматографическую секцию 3, в которой происходит концентрирование второго компонента в потоке газа за счет подвода тепла в верх теплообменного устройства 9. Вторая часть потока адсорбента продолжает оставаться

адсорбционной секции и контактирует с исходным сырьем, обогащаясь преимущественно третьим компонентом, а затем переходит в другую хроматографическую секцию, в которой происходит концентрирование третьего компонента в потоке газа за счет подвода тепла в верхнюю часть теплообменного устройства 9. Выделившиеся в хроматографических секциях фракции, содержащие преимущественно второй и третий компоненты, отводят соответственно через аккумулирующие тарелки 7 и 8. Наличие хроматографической секции позволяет регулировать качество промежуточного продукта (второго) по содержанию в нем первого компонента за счет ступенчатого подвода тепла в теплообменные устройства 9. Неадсорбированные компоненты выводят через аккумулирующую тарелку 6 и формируют фракцию, содержащую преимущественно первый компонент. Отработавший адсорбент выводят из адсорбера через устройство 11.

При разработке ряда конструкций секционированных колонных аппаратов было обосновано специфическое расположение секционирующей перегородки (размещение ее в верхней, нижней или центральной части аппарата в зависимости от назначения аппарата), доказано, что число секционирующих перегородок в аппарате на два меньше числа фракций или компонентов, на которое делится исходное сырье. Рассмотрена ситуация, когда можно регулировать качество разделения сырья на необходимое число фракций за счет вертикального перемещения перегородок в слое адсорбента без остановки процесса. Продольное секционирование противоточных массообменных аппаратов во всех рассмотренных случаях принудительно формирует дополнительную зону массообмена в части аппарата, где необходимо той

повысить качество получаемого продукта [10, 11].

Секционирование адсорбционных аппаратов с псевдоожиженным слоем адсорбента

Одним из недостатков аппаратов с движущимся слоем адсорбента является затормаживание массопереноса из-за резкого падения концентрации адсорбтива в пограничной пленке очищаемого потока вблизи гранул адсорбента [12]. Выравнивание концентрации адсорбтива в объеме потока обеспечивается при гидромеханическом или механическом перемешивании (псевдоожижении) слоя адсорбента. Однако этот прием достаточно эффективен при невысокой степени извлечения адсорбируемой примеси из исходного сырья, когда его концентрация на выходе продукта из адсорбера существенна и сорбционная активность адсорбента значительна. В тех же случаях, когда необходима высокая степень очистки технологического потока или конечного продукта процесса, при низкой выравниваемой концетрации адсорбата в аппарате активность адсорбена становится весьма низкой, а сам процесс малоэффективным (рисунок 3).

Разделение адсорбера на несколько вертикальных или горизонтальных секций [13], через которые противотоком (рисунок 4a) или прямотоком (рисунок 4b) перемещаются адсорбент и очищаемый поток, позволяет аналогично каскаду реакторов интенсифицировать реализацию адсорбщионного процесса за счет того, что в последовательности адсорберов в каждой последующей секции концентрация адсорбируемого компонента постепенно снижается: в первой секции по ходу потока она лишь несколько меньше исходной C_0 , а в последней равна допустимой конечной концентрации C_{κ} .

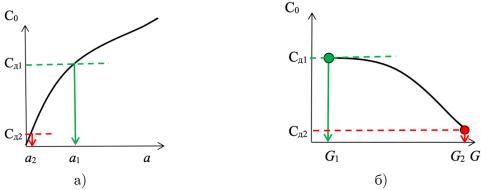


Рисунок 3 — Зависимость активности адсорбента a (a) и его загрузки в адсорбер с кипящим слоем адсорбента G (б) от допустимой концентрации адсорбируемой примеси в сырье C_0 и очищенном продукте $C_{\pi 1}$ и $C_{\pi 2}$ ($C_{\pi 1} >> C_{\pi 2}$)

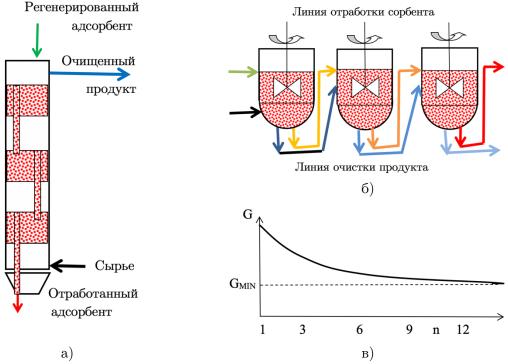


Рисунок 4 — Вертикальное (а) и горизонтальное (б) секционирование адсорбера с псевдоожиженным слоем адсорбента и влияние числа секций n на загрузку адсорбента G в аппарат (в)

В силу этого в последней секции активность адсорбента будет такой же низкой, как и в единичном адсорбере с псевдоожиженным слоем адсорбента, зато во всех предыдущих секциях эффективность процесса адсорбции будет значительно выше (рисунок 4в).

Это позволяет существенно уменьшить загрузку адсорбента в секционированный адсорбер по сравнению с единичным

аппаратом с кипящим слоем адсорбента. Кроме того, в последнюю секцию обычно поступает наиболее активный адсорбент после его регенерации, что способствует увеличению глубины очистки.

Секционирование адсорбционных аппаратов со стационарным слоем адсорбента

Процесс адсорбции примесей из очищаемого потока в адсорбционных аппаратах со стационарным слоем адсорбента характеризуется тем, что акт сорбции происходит только на небольшом по длине участке слоя, называемом зоной массопередачи, в которой концентрация извлекаемой примеси изменяется от сырьевой до проскоковой. Зона массопередачи перемещается вдоль слоя по мере насыщения адсорбента, поэтому эксплуатационная динамическая активность сорбента по извлекаемой примеси a_{∂} , когда зона массопередачи переместится к выходу очищаемого потока из адсорбера и наступит проскок примеси, всегда ниже статической активности a_c , поскольку в концевой части слоя адсорбента часть слоя еще сохраняет адсорбционную активность, но по условиям технологии исключается из адсорбционного процесса (рисунок 5а).

Интенсифицировать работу адсорбента за счет увеличения коэффициента эффективности сорбционного процесса $K_e = a_0/a_c$ возможно при установке в слое адсорбента вертикальных плоских или коаксиальных перегородок, секционирующих слой адсорбента таким образом, что высота слоя адсорбента по ходу очищаемого потока газа или жидкости увеличивается при постоянстве нормальных сечений сорбента во всех секциях (рисунок 5) [14–16].

При увеличении числа секций n увеличивается путь прохождения очищаемого потока по аппарату, т. е. растет высота слоя адсорбента [17, 18]:

$$H_n = H_1 \cdot n, \tag{4}$$

где H_1 , H_n — путь прохождения потока в адсорбере сквозь слой сорбента соответственно без секционирования и с числом секций n, м.

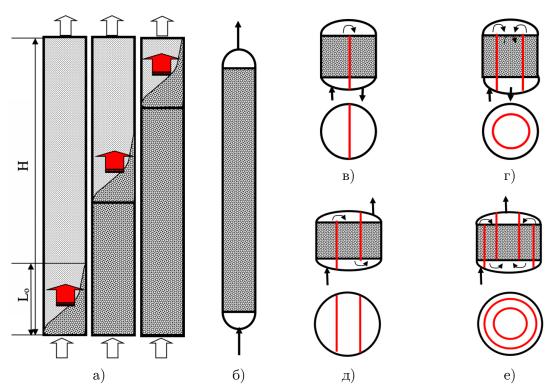


Рисунок 5 — Перемещение длины зоны массопередачи L₀ и насыщение адсорбента по высоте адсорбера H (a) и принципиальная схема односекционного адсорбера (б), двухсекционного (в, г) и трехсекционного (д,е) адсорберов с перегородками: адсорберы с пластинчатыми (в, д) и коаксиальными (г, е) перегородками

Одновременно с высотой слоя адсорбента растет и скорость потока:

$$W_n = W_1 \cdot n, \tag{5}$$

где W_1 , W_n — скорость прохождения очищаемого потока по аппарату без секционирования и с числом секций n, соответственно, м/с.

Длина зоны массопередачи L_{θ} зависит от скорости потока согласно [18]:

$$L_0 = B\sqrt{W},\tag{6}$$

Применительно к условиям работы секционированного адсорбера соотношение (6) примет вид:

$$\frac{L_{01}}{L_{0n}} = \sqrt{\frac{W_1}{W_n}},\tag{7}$$

Длина зоны L_0 массопередачи может быть рассчитана по уравнению [18]:

$$L_0 = H_1 \frac{a_e - a_b}{a_e - (1 - f)a_b},\tag{8}$$

где f — фактор симметричности выходной кривой динамики адсорбции.

Записав (8) для условий работы обычного адсорбера с высотой H_1 и n-секционированного адсорбера с высотой H_n получим уравнение для расчета коэффициента эффективности:

$$K_e = \frac{a_b}{a_e} = \frac{H_n - L_0 \cdot \sqrt{\frac{W_n}{W_1}}}{H_n - L_0 \cdot (1 - f) \cdot \sqrt{\frac{W_n}{W_1}}}.$$
 (9)

Поскольку высота зоны массопередачи практически не зависит от высоты слоя адсорбента и пропорциональна \sqrt{W} , а при секционировании W растет пропорционально высоте n—секционированного аппарата, то секционирование приводит к росту K_e , что интенсифицирует адсорбционный процесс за счет соответствующего приближения a_b к величине a_e . Коэффициент эффективности работы адсорбента зависит от числа секций в аппарате, фактора симметричности выходной кривой, соотношения H_n/L_0 и, в пределе, $K_e \rightarrow 1$ при $H_n/L_0 \rightarrow \infty$ (рисунок 6).

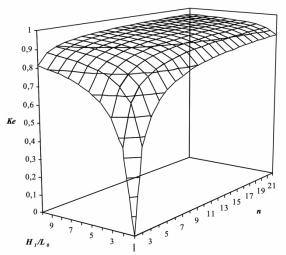


Рисунок 6 — Зависимость коэффициента эффективности (Ke) от числа секций в адсорбере (n) и отношения высоты слоя адсорбента к высоте зоны массопередачи (H1/ L0) при значении фактора симметричности выходной кривой f=0.5.

В соответствии с (9), с увеличением высоты слоя адсорбента H и H/L_{θ} , полнота реального использования потенциальной емкости адсорбента a_e возрастает (рисунок 6), но удельная интенсивность работы адсорбента на единицу массы его в адсорбере M наиболее велика в диапазоне $H/L_{\theta}=1.5$ -2.5 с максимумом при $H/L_{\theta}=2$ (рисунок 7), который наиболее целесообразно использовать при безнагревной короткоцикловой адсорбции [19].

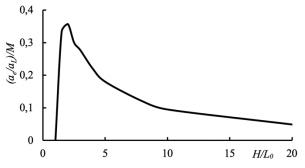


Рисунок 7 — Зависимость удельной интенсивности работы адсорбента от соотношения H/L_{θ} при f=0.4.

Для определения оптимального соотношения высоты слоя H к его диаметру D в адсорбере в качестве критерия оптимальности R был принят минимум

капитальных затрат на сооружение адсорбера. Задача оптимизации размеров слоя адсорбента решалась методом неопределенных множителей Лагранжа [19]. Формируемая при этом функция Лагранжа F имеет вид, например, для адсорбера со сферическими днищами:

$$F = (\pi DL + 1.25\pi D^2)\delta\rho\Sigma + \lambda(V_c - \pi D^2L/4) = max$$
(10)

где: δ — толщина корпуса, ρ — плотность материала корпуса, Σ — суммарные приведенные затраты на 1 т корпуса, учитывающие стоимость проектирования, материалов, транспортных и строительно-монтажных работ и изготовления аппарата, λ — неопределенный множитель Лагранжа, V_c — объем слоя, загружаемого в корпус адсорбента.

Решение уравнения (10) в этом случае дает оптимальное соотношение $H/D=2.5\mathrm{D}$ при полной высоте адсорбера 3.5D. Аналогичное решение для адсорбера с коническими днищами высотой 0.25D приводит к оптимальному соотношению H/D=1.65D при полной высоте адсорбера 2.15D.

Секционированные при помощи вертикальных перегородок вертикальные адсорберы при большой суммарной высоте слоя адсорбента и скорости потока имеют значительное гидравлическое сопротивление и при очистке низконапорных технологических потоков удобнее пользоваться секционированными кольцевыми адсорберами с малой толщиной слоя адсорбента и горизонтальным перемещением сквозь него очищаемого потока [20], при этом секции разделены между собой при помощи набора кольцевых и дисковых пластин (рисунок 8).

Кольцевой адсорбер со слоем адсорбента, всего в два раза превышающим длину зоны массопередачи, разделенным на четыре секции (рисунок 8б), при значении фактора симметричности выходной кривой f=0.5 будет иметь

производительность по очищаемому потоку в 1.3 раз больше, чем односекционный (рисунок 8a) при одинаковой загрузке адсорбента.

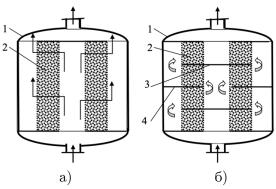


Рисунок 8 — Односекционный (а) и четырехсекционный (б) кольцевой адсорбер: 1 — корпус; 2 — кольцевая катализаторная корзина; 3 — дисковая перегородка, 4 — кольцевая перегородка

Заключение

Весьма перспективно использование секционированных адсорберов как вертикального, так и кольцевого типа в процессах безнагревной короткоцикловой адсорбции, например, в процессах очистки и осушки природного газа, когда стадия адсорбции протекает при высоком давлении, а стадия регенерации адсорбента — при сбросе давления, что позволяет в десятки раз уменьшить продолжительность адсорбционного цикла и высоту слоя адсорбента и, соответственно, загрузку адсорбента в адсорбер.

Именно в такой ситуации, когда высота слоя лишь в 2–3 раза больше длины зоны массопередачи, коэффициент эффективности увеличивается до 0.7–0.8 при делении адсорбера на 2–3 секции. При необходимости извлекать из потока газа несколько примесных компонентов раздельно можно эффективно использовать технологическую линию из нескольких последовательно обвязанных блоков короткоцикловой адсорбции, в каждом из которых используется адсорбент, селективно извлекающий из потока газа необходимый

компонент [21, 22]. В этом случае адсорбер каждого блока линии может рассматриваться как единичная секция. Возможно также совмещение в одном аппарате адсорбционной секции с секцией реализации иного массообменного процесса, например, абсорбции [23].

Таким образом, секционирование адсорбционного пространства достаточно перспективно для любых вариантов реализации адсорбционного процесса в химической технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Rahimi M. R., Mosleh S. Intensification of Sorption Processes. Active and Passive Mechanisms. 1-st Edition, Elsevier. November 23, 2021. ISBN: 9780128214114.
- [2]. Бузетти К. Д., Иванов М. В. Интенсификация процесса периодической адсорбции в аппаратах с интенсивным перемешиванием. Дельта науки, 2019, №1, с. 6–10.
- [3]. Шарапова А. В. Применение ультразвука для интенсификации сорбционной очистки сточных вод. Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского, 2013, №1(1), с. 109–111.
- [4]. Luo L. Intensification of Adsorption Process in Porous Media. Heat and Mass Transfer Intensification and Shape Optimization. Luo, L. (eds), Springer, London, 2013, pp. 19–43.

DOI: 10.1007/978-1-4471-4742-8 2

[5]. Marcinek A., Guderian J. & Bathen D. Process intensification of the high-purity nitrogen production in twin-bed Pressure Swing Adsorption plants. *Adsorption*, 2021, 27, pp. 937–952.

DOI: 10.1007/s10450-020-00291-8

[6]. Reza F., Webley P. Optimum structured adsorbents for gas separation

- processes. Chemical Engineering Science, 2009, vol. 64, Issue 24, 16 December, pp. 5182–5191. DOI: 10.1016/j.ces.2009.08.029
- [7]. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники. М.: Химия. 1984, 592 с.
- [8]. Кондратьев А. А. Схемы соединения простых ректификационных колонн в сложные колонны со связанными тепловыми потоками. Сборник тезисов докладов 4-ой Всесоюзной конференции по ректификации. Уфа, 1978, с. 271–274.
- [9]. Кондратьев А. А., Самойлов Н. А. Ректификационные колонны с промежуточной тепло- и массообменной секцией. Журнал прикладной химии, 1997, Т. 70, N 9, с. 1535–1542.
- [10]. Кондратьев А. А., Самойлов Н. А., Кондратьев Ю. А., Сидоров Г. М. Разделение смесей адсорбцией в сложных колоннах со связанными потоками. Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2011, № 3, с. 258–263.
- [11]. Кондратьев А. А., Кондратьев Ю. А., Самойлов Н. А., Сидоров Г. М. Сложные колонны для разделения смесей адсорбцией. Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011, № 3, с. 264–271.
- [12]. Sunil J. Kulkarni, Ravi W. Tapre. Mass Transfer Studies on Fluidized Bed Adsorption Column for Phenol Adsorption. *International Journal of Science and Research* (*IJSR*), 2013, vol. 2, is. 12, pp. 101–104.
- [13]. Натареев С. В. Моделирование и расчет процессов химической технологии. Под. ред. В. Н. Блиничева; Иваново: Иван. гос. хим.—технол. ун—т, 2009, 144 с.
- [14]. Samoilov N. A, Ibulaev R. G. Analysis of the Operation of a Sectioned Adsorber with a Moving Adsorbent Bed. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2003, vol. 37, № 4, pp. 358–364.

- [15]. Samoilov N. A. Some Features of Operation of Sectioned Adsorbers. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils.* 2002, vol. 38, № 4, pp. 237–244.
- [16]. Samoilov N. A. Development of New Adsorber Designs. Chemical and Petroleum Engineering, 2002, vol. 38, N 7-8, pp. 437–443.
- [17]. Самойлов Н. А., Ибулаев Р. Г. Продольное секционирование адсорбционных аппаратов как метод интенсификации их работы. *Известия ВУЗов. Нефть и газ*, 2007, № 2, с. 79–83.
- [18]. Самойлов Н. А. Феноменология адсорбции. Теоретические и практические аспекты адсорбционной очистки и осушки технологических потоков. Уфа: Изд. ГУП НЕФТЕХИМПЕРЕРАБОТКА, 2014, 268 с.
- [19]. Samoilov N. A. Determination of optimal dimensions of adsorbent layers and adsorder for process of short-cycle heat-free

- adsorption (PSA Process). Chemical and Petroleum Engineering, 2019, vol. 55, \mathbb{N}^{2} 1–2, pp. 108–113.
- [20]. Патент №2683738 РФ. Кольцевой адсорбер. Мнушкин И. А., 2019.
- [21]. Патент №2626354 РФ. Способ разделения газового потока на отдельные компоненты или фракции. Мнушкин И. А., 2017.
- [22]. Патент №2627849 РФ. Способ разделения газового потока на отдельные компоненты или фракции. Мнушкин И. А., 2017.
- [23]. Boyadjiev C., Boyadjiev B. An Absorption-Adsorption Apparatus for Gases Purification from SO₂ in Power Plants. *Open Access Library Journal*, 2017, May, e3546, pp. 1–7.

DOI: 10.4236/oalib.1103546

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).

Intensification of the adsorption process by partitioning the volume of adsorbers

N. A. Samoilov*,1

* Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia

Abstract

The direction of intensification of chemical-technological adsorption processes based on the separation of the adsorbent layer into sections is considered. Partitioning leads to an improvement in the hydrodynamic situation and the creation of reserves due to this, ensuring, within the limits of preserving the volume of technological equipment, an increase in the clarity of separation, productivity for processed raw materials, energy and resource conservation. In continuous adsorption processes, partitioning makes it possible to form and involve additional phase contact zones in the technological process, in periodic ones — to increase the dynamic activity of the adsorbent. Calculation elements and examples of apparatus designs with the improvement of their workspace due to its partitioning are given.

Keywords

Partitioning, adsorption, adsorbent activity, mass transfer, hydrodynamics, heat transfer, mass transfer devices, partitioning efficiency.

REFERENCES

- [1]. Rahimi M. R., Mosleh S. Intensification of Sorption Processes. Active and Passive Mechanisms. 1-st Edition, Elsevier. November 23, 2021. ISBN: 9780128214114.
- [2]. Buzetti K. D., Ivanov M. V. Intensifikaciya processa periodicheskoj adsorbcii v apparatax s intensivnym peremeshivaniem [Intensification of the process of periodic adsorption in apparatuses with intensive mixing]. Del`ta nauki [Delta Science], 2019, №1, pp. 6–10. (In Russ.).
- [3]. Sharapova A. V. Primenenie ul`trazvuka dlya intensifikacii sorbcionnoj ochistki stochny`x vod [Application of ultrasonic for intensification of sorption treatment of wastewater]. Vestnik Nizhegorodskogo

- universiteta im. N. I. Lobachevskogo [Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N. I. Lobachevsky], 2013, №1(1), pp. 109-111. (In Russ).
- [4]. Luo L. Intensification of Adsorption Process in Porous Media. Heat and Mass Transfer Intensification and Shape Optimization. Luo, L. (eds), Springer, London. 2013, pp. 19–43.

DOI: 10.1007/978-1-4471-4742-8 2

[5]. Marcinek A., Guderian J. & Bathen D. Process intensification of the high-purity nitrogen production in twin-bed Pressure Swing Adsorption plants. *Adsorption*. 2021, 27, pp. 937–952.

DOI: 10.1007/s10450-020-00291-8

Email: naum.samoilow@yandex.ru

¹ Corresponding author:

- [6]. Reza F., Webley P. Optimum structured adsorbents for gas separation processes. *Chemical Engineering Science*, 2009, vol. 64, Issue 24, 16 December, pp. 5182–5191. DOI: 10.1016/j.ces.2009.08.029
- [7]. Kel`cev N. V. Osnovy adsorbcionnoj texniki [Fundamentals of adsorption technology]. M.: Khimiya. [Moskow, Chemistry Publ.], 1984, 592 p. (In Russ.).
- [8]. Kondrat'ev A. A. Sxemy soedineniya prostyx rektifikacionnyx kolonn v slozhnye kolonny so svyazannymi teplovymi potokami [Schemes for connecting simple distillation columns into complex columns with associated heat flows]. Sb. tezisov dokladov 4-oj Vsesoyuznoj konferencii po rektifikacii. [Abstracts of the 4th All-Union conference on rectification]. Ufa, 1978, pp. 271–274. (In Russ.).
- [9]. Kondrat'ev A. A., Samoilov N. A. Rektifikacionnye kolonny s promezhutochnoj teplo- i massoobmennoj sekciej [Distillation columns with intermediate heat and mass transfer section]. *Zurnal prikladnoj himii*, 1997, vol. 70, no. 9, pp. 1535–1542. (In Russ).
- [10]. Kondrat'ev A. A., Samoilov N. A., Kondrat'ev Yu. A., Sidorov G. M. Razdelenie smesej adsorbciej v slozhnyh kolonnah so svyazannymi potokami [Separation of mixtures by adsorption in complex columns with coupled flows]. Elektronnyj nauchnyj zhurnal «Neftegazovoe delo» [Electronic scientific journal «Oil and Gas Business»], 2011, no. 3, pp. 258–63. (In Russ)
- [11]. Kondrat'ev A. A., Kondrat'ev Yu. A., Samoilov N. A., Sidorov G. M. Slozhnye kolonny dlya razdeleniya smesej adsorbciej [Complex columns for separation of mixtures by adsorption]. Elektronnyj nauchnyj zhurnal «Neftegazovoe delo» [Electronic scientific journal «Oil and Gas Business»], 2011, no. 3, pp. 264–271. (In Russ).

- [12]. Sunil J. Kulkarni1, Ravi W. Tapre. Mass Transfer Studies on Fluidized Bed Adsorption Column for Phenol Adsorption. *International Journal of Science and Research* (*IJSR*), 2013, vol. 2, is. 12, pp. 101–104.
- [13]. Natareev S. V. Modelirovanie i raschet processov ximicheskoj texnologii [Modeling and calculation of chemical technology processes]. Ed. V. N. Blinichev. Ivanovo: Ivan. state chem.-technol. un-t Publ., 2000, 144 p. (In Russ.).
- [14]. Samoilov N. A, Ibulaev R. G. Analysis of the Operation of a Sectioned Adsorber with a Moving Adsorbent Bed. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering.* 2003, vol. 37, Nº4, pp. 358–364.
- [15]. Samoilov N. A. Some Features of Operation of Sectioned Adsorbers. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils.* 2002, vol. 38, № 4, pp. 237–244.
- [16]. Samoilov N. A. Development of New Adsorber Designs. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2002, vol. 38, N 7-8, pp. 437–443.
- [17]. Samoilov N. A., Ibulaev R. G. Prodol`noe sekcionirovanie adsorbcionny`x apparatov kak metod intensifikacii ih raboty [Longitudinal sectioning of adsorption apparatuses as a method of intensifying their work]. Izvestiya VUZov. Neft` i gaz. [Proceedings of universities. Oil and gas], 2007, № 2, pp. 79–83. (In Russ.).
- [18]. Samoilov N. A. Fenomenologiya adsorbcii. Teoreticheskie i prakticheskie aspekty` adsorbcionnoj ochistki i osushki texnologicheskix potokov [Phenomenology of adsorption. Theoretical and practical aspects of adsorption purification and drying of process flows]. Ufa: Publ. GUP NEFTEXKHIMPERERABOTKA, 2014, 268 p. (In Russ.).
- [19]. Samoilov N. A. Determination of optimal dimensions of adsorbent layers and adsorder for process of short-cycle heat-free

adsorption (PSA Process). Chemical and Petroleum Engineering, 2019, vol. 55, N 1–2, pp. 108–113.

- [20]. Mnushkin I. A. Kol'cevoj adsorber [Ring adsorber]. Patent RF, no.2683738, 2019. (In Russ).
- [21]. Mnushkin I. A. Sposob razdeleniya gazovogo potoka na otdel'nye komponenty ili frakcii [A method for separating a gas stream into separate components or fractions]. Patent RF, no. 2623354, 2017. (In Russ).
- [22]. Mnushkin I.A. Sposob razdeleniya gazovogo potoka na otdel'nye komponenty ili frakcii [A method for separating a gas stream into separate components or fractions]. Patent RF, no. 2627849, 2017. (In Russ).
- [23]. Boyadjiev C., Boyadjiev B. An Absorption-Adsorption Apparatus for Gases Purification from SO₂ in Power Plants. *Open Access Library Journal*, 2017, 4 (may), e3546, pp. 1–7.

DOI: 10.4236/oalib.1103546

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:

Интенсификация процесса адсорбции за счет секционирования объема адсорберов / Н. А. Самойлов // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 1(8). С. 24 – 38. DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-24-38

Please cite this article as:

Samoylov N. A. Intensification of the adsorption process by partitioning the volume of adsorbers. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 1(8), pp. 24 – 38.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-24-38

УДК 66.021.3

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-39-48

Сушка геля полиакрилонитрила при инфракрасном подводе теплоты

А. Г. Липин*, **А.** А. Липин*, 1

* Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново. Россия

Аннотация

Гидролизованный полиакрилонитрил синтезируют в виде водных растворов, представляющих собой легкоподвижные полимерные гели. Такие гели имеют недостаточно стабильные характеристики и ограниченную область применения. Полимеры, полученные в твердом виде, удобны при транспортировке, имеют высокое содержание основного вещества и обладают широким спектром потребительских свойств. Заключительной стадией производства является весьма энергоемкий процесс сушки, осложняющийся высокой адгезионной способностью гелей.

Проведены исследования кинетики процесса сушки геля гидролизованного полиакрилонитрила в условиях инфракрасного подвода теплоты. Получены кривые сушки и температурные зависимости. На основе обработки экспериментальных данных предложено уравнение для расчета парциального давления водяных паров над гелем полиакрилонитрила.

Выполнены экспериментальные исследования сушки геля полиакрилонитрила на ленточной терморадиационной сушилке лабораторного масштаба в непрерывном режиме. Для сушки в промышленном масштабе рекомендована ленточная инфракрасная сушилка со сплошной металлической лентой.

Предложена математическая модель процесса сушки геля полиакрилонитрила в ленточной терморадиационной сушилке с излучающей панелью, обогреваемой топочными газами. Математическая модель позволяет прогнозировать влагосодержание и температуру материала, температуру и влагосодержание воздуха на выходе из сушилки, а также температуру отработанных топочных газов.

Ключевые слова

Сушка, моделирование, полимерный гель, терморадиационная сушилка, кинетика сушки

Введение

Водорастворимые полимеры применяются во многих областях техники и технологии. Наибольшее практическое применение находят водорастворимые производные

целлюлозы (метилцеллюлоза, этилцеллюлоза, сульфаты целлюлозы и др.), поливиниловый спирт, полимеры и сополимеры акриловой и метакриловой кислот и окиси этилена [1, 2]. Они используются как

¹ Для переписки: Email: lipin.a@mail.ru

высокоэффективные коагулянты и флокулянты, для стабилизации эмульсий и суспензий, в качестве защитных коллоидов, структурообразователей почв, загустителей, пленкообразователей, диспергаторов, стабилизаторов буровых растворов, агентов, снижающих гидравлическое сопротивление при течении жидкостей по трубопроводам и др. [3].

Понизители водоотдачи буровых растворов стабилизируют дисперсную систему, снижают проницаемость фильтрационной корки и, в зависимости от состава, могут влиять на реологические свойства бурового раствора. К ним относятся: карбоксиметилцеллюлоза, модифицированный крахмал, полиакриламид, гидролизованный полиакрилонитрил (гипан) и др. [4, 5].

Гипан синтезируют в виде 10–15%-х водных растворов, представляющих собой легкоподвижные полимерные гели. Такие гели имеют недостаточно стабильные характеристики и ограниченную область применения. Они неэкономичны при транспортировке и неудобны при приготовлении рабочих растворов. Полимеры, полученные в твердом виде, имеют преимущества перед гелями. Они удобны при транспортировке, имеют высокое содержание основного вещества и обладают широким спектром потребительских свойств. Заключительной стадией производства является весьма энергоемкий процесс сушки, осложняющийся высокой адгезионной способностью гелей, и условием сохранения всех ценных свойств целевого продукта [6].

В промышленности в основном используют конвективный способ сушки. Однако данный способ не позволяет достигать высокой интенсивности сушки, а при повышении температуры сушильного агента приводит с деструкции материала и потере его потребительских качеств.

Одним из перспективных методов интенсификации процесса термообработки коллоидных влажных материалов является использование радиационного энергоподвода при помощи инфракрасных излучателей [7-10]. Основное достоинство радиационной сушки по сравнению с конвективной — возможность получения больших тепловых потоков. Большой тепловой поток вызывает возникновение больших температурных градиентов в материале, что не всегда допустимо по его свойствам. Поэтому задача определения рациональных способов и режимов сушки водорастворимых полимеров с учетом их свойств и особенностей является актуальной.

Данная работа включает в себя экспериментальные и теоретические исследования процесса обезвоживания полимерного геля гидролизованного полиакрилонитрила, которые проводятся с целью получения в сухой выпускной форме бурового реагента — понизителя водоотдачи бурового раствора.

Поскольку исходный продукт имеет высокое влагосодержание целесообразно рассмотреть возможность применения сушки с инфракрасным подводом теплоты, так как ИК-излучение позволяет обеспечить высокие значения удельного теплового потока.

Экспериментальные исследования

На лабораторной установке проведены исследования кинетики процесса сушки геля гипана в условиях инфракрасного подвода теплоты. Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. В металлическую кювету площадью 15 см² помещались образцы геля гипана. Толщина слоя геля регулировалась изменением массы навески. Кюветы устанавливались на электронные весы с использованием подставки. Для защиты весов от неблагоприятного воздействия ИК-излучения использовался теплозащитный экран. Отсчет

времени процесса сушки начинался с момента включения электрического излучателя. Через определенные промежутки времени фиксировалась масса образца. Температура геля измерялась бесконтактным способом с помощью ИК-термометра АКИП-9302. Процесс сушки проводился до достижения постоянного веса образца.

На рисунке 1 приведены кривые сушки (1, 3) и температурные кривые (2, 4) для тонкого слоя геля гипана в условиях инфракрасного подвода теплоты. Плотность потока инфракрасного излучения составила $12000~\mathrm{Bt/m}^2$. Вид данных кривых показывает, что основное количество влаги (до 90~%) удаляется в период постоянной скорости сушки, когда скорость удаления влаги лимитируется интенсивностью подвода теплоты. Время сушки образцов составляло 8– $10~\mathrm{Muh.}$, в зависимости от толщины слоя геля.

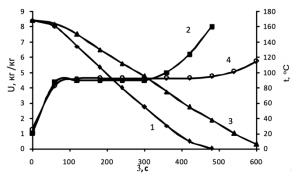


Рисунок 1 — Зависимости влагосодержания (1, 3) и температуры (2, 4) от времени процесса сушки. Толщина слоя геля, м: $1, 2 - 1.4 \cdot 10^{-3}, 3, 4 - 2.1 \cdot 10^{-3}$

Кроме того, в тех же условиях были проведены опыты по испарению воды. Совместная обработка результатов экспериментов позволила получить значения коэффициента массоотдачи и зависимость парциального давления водяных паров над гелем полимера от температуры и влагосодержания. Эти величины необходимо знать при проведении расчета процесса сушки.

Обработка экспериментальных данных по зависимости убыли массы навески воды от времени позволила рассчитать значение коэффициента массоотдачи в условиях естественной конвекции и инфракрасного подвода теплоты $\beta_{\rm p}{=}3,9{\cdot}10^{-7}~{\rm kr/(m^2\cdot c\cdot \Pi a)}.$ Расчет коэффициента массоотдачи проводился по формуле:

$$\beta_{\rm p} = \frac{i_{\rm b}}{(P_{\rm hac}(t_{\rm mcn}) - P_{\rm f}) \cdot F} \quad , \eqno(1)$$

где F — площадь поверхности испарения, численно равная площади кюветы; $i_{\scriptscriptstyle B}$ — массовый поток испаряемой воды.

Движущая сила процесса в формуле (1) выражена как разность парциальных давлений насыщенных паров воды при температуре испарения и водяных паров в окружающем воздухе.

Давление водяных паров над раствором полимера ниже, чем над водой, и может быть представлено зависимостью:

$$p_{M} = p_{Hac}(t_{M}) \cdot \psi(U). \tag{2}$$

Входящий в эту формулу поправочный коэффициент $\psi(U)$, зависящий от влагосодержания геля, был определен путем обработки опытных данных по сушке геля. Значение коэффициента определялось по уравнению:

$$\psi = (W/(\beta_{\rm p} \cdot F) + P_{\rm r})/P_{\rm Hac}, \tag{3}$$

где W — массовый поток испаряющейся из геля воды, $\kappa \Gamma/c$.

$$W = \frac{\Delta m_{\text{геля}}}{\Delta \tau} = \frac{m_1 - m_2}{\tau_2 - \tau_1},\tag{4}$$

где $m_1, \, m_2$ — масса навески геля в момент времени $\tau_1, \, \tau_2, \,$ соответственно.

Весь временной интервал процесса сушки геля разбивался на временные шаги $\Delta \tau$, для каждого из которых рассчитывался массовый поток испаряющейся из геля воды. Далее по формуле (3) рассчитывалось значение коэффициента $\psi(U)$. В графической форме полученные результаты представлены на рисунке 2.

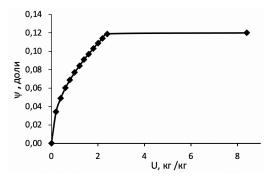


Рисунок 2 — Зависимость поправочного коэффициента от влагосодержания U

Математическая обработка полученных данных позволила рекомендовать следующие формулы для расчета поправочного коэффициента:

$$y = 0.12$$
 при $U \ge 2.4$, (5)

$$y = 0.077U^{0.5}$$
 при $U < 2.4$. (6)

Реализация непрерывного процесса терморадиационной сушки гипана проводились на лабораторной установке, схема которой приведена на рисунке 3.

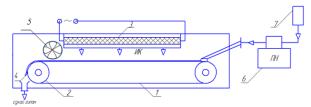


Рисунок 3 — Схема лабораторной установки: 1 — металлическая лента; 2 — привод (электродвигатель); 3 — электрический излучатель; 4 — нож; 5 — вентилятор; 6 — перистальтический насос; 7 — емкость с гелем

Гель гипана равномерно дозировался на медленно движущуюся поверхность металлической ленты с помощью перистальтического насоса. Расход геля регулировался скоростью подачи и диаметром капилляра. Скорость движения регулировалась напряжением на клеммах электродвигателя. Мощным источником ИК-излучения являлся электрический излучатель. Для предотвращения перегрева в конце зоны сушки продукт обдувался холодным воздухом с помощью вентилятора.

На рисунке 4 представлены графики изменения относительной влажности геля по длине сушильной камеры лабораторной установки. Указана безразмерная координата Y=y/L. Средняя плотность потока инфракрасного излучения составила 10200 Bт/м^2 . Толщина слоя геля $2.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Влажность материала на выходе из сушилки составила 1, 4, 8 % при скоростях движения ленты 2.9; 3.1; 3.24 см/мин. Требование по максимально допустимой влажности для данного продукта 5%. Температура материала на выходе из сушильной камеры не превышала 140 °C, что допустимо для данного полимера.

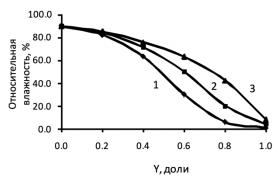


Рисунок 4 — Изменение относительной влажности по длине сушилки. Скорость движения ленты, см/мин: 1-2.9; 2-3.1; 3-3.24

В промышленной сушилке в качестве источника ИК излучения целесообразно применить панели с газовым обогревом. На рисунке 5 приведена схема такого аппарата. Сушилка, которая работает следующим образом: гель гипана распределяется по поверхности медленно движущейся металлической ленты 1. Природный газ и горячий воздух поступают в топку 4. Продукты сгорания (высокотемпературные газы) направляются на обогрев излучающей поверхности 6. В результате поверхность панели становится мощным источником ИК-излучения.

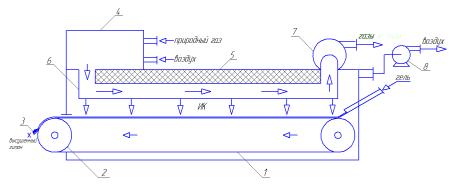


Рисунок 5 — Схема ленточной терморадиационной сушилки:

1 — металлическая лента; 2 — приводной барабан; 3 — нож; 4 — топка с камерой сгорания; 5 — теплоизоляционный слой; 6 — излучающая панель; 7 — дымосос; 8 — вентилятор.

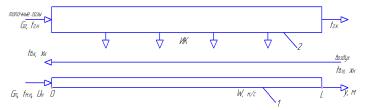


Рисунок 6 — Расчетная схема: 1 — слой материала, 2 — излучающая панель

Сухой полимер удаляется с ленты с помощью ножа 3. Для предотвращения перегрева продукта подается холодный воздух, который движется навстречу потоку геля и удаляется из зоны сушки с помощью вентилятора 8. Для удаления отработанных топочных газов предусмотрен дымосос 7.

Математическое моделирование процесса сушки

В процессе инфракрасной сушки продукт подвергается воздействию ИК-излучения высокой плотности, что может привести к его перегреву и снижению

качественных показателей. Поэтому прогнозирование профиля температуры материала по длине сушилки является актуальной задачей. На рисунке 6 представлена расчетная схема установки.

При газовом обогреве температура излучателя изменяется по длине сушилки. Расчет изменения температуры излучающей панели $T_{\rm u}$, топочных газов $t_{\rm r}$, влагосодержания U и температуры $t_{\rm u}$ высушиваемого материала, температуры $t_{\rm c}$ и влагосодержания воздуха x по длине y сушильной камеры осуществляется путем решения системы уравнений (7)–(13).

$$\alpha_{\rm r}(T_{\rm r} - T_{\rm M}) = c_{12} [(T_{\rm M}/1\,00)^4 - (T_{\rm M}/1\,00)^4, \tag{7}$$

$$d t_{\Gamma}/d y = -\alpha_{\Gamma} B(t_{\Gamma} - t_{\mu})/(G_{\Gamma}c_{\Gamma}), \tag{8}$$

$$\frac{dt_{_{\rm M}}}{dy} = \frac{c_{12}[(T_{_{\rm H}}/100)^4 - (T_{_{\rm M}}/100)^4] B + r^* \frac{dU}{dy} G_{_{\rm \Pi}} + \alpha_{_{\rm C}}(t_{_{\rm C}} - t_{_{\rm M}}) B}{G_{_{\rm \Pi}}(c_{_{\rm \Pi}} + c_{_{\rm B}}U)}, \tag{9}$$

$$dU/dy = \beta_{\rm p} B(p_{\rm M} - p_{\rm c})/G_{\rm II}, \tag{10}$$

$$dt_c/dy = \left[\alpha_c(t_c - t_w) + \alpha_c(t_c - t_w)\right] \cdot B/(G_R c_R), \tag{11}$$

$$dx/dy = \beta_{\rm p}(p_{\rm m} - p_{\rm c}) \cdot B/G_{\rm B}, \tag{12}$$

$$p_{M} = p_{Hac}(t_{M}) \cdot \psi(U). \tag{13}$$

В этих уравнениях: аг, ас — коэффициенты теплоотдачи от топочных газов к излучающей панели и от материала к воздуху в сушильной камере; с12 — коэффициент взаимоизлучения; В — ширина ленты; c_{Γ} , c_{B} , c_{Π} — теплоёмкости, соответственно, топочных газов, воды и сухого полимера; r* — теплота парообразования; G_п — массовый расход полимера; G_г — расход топочных газов; t_c — температура воздуха в сушильной камере; рм, рс — парциальное давление паров воды над поверхностью слоя геля и в воздухе; β_p — коэффициент массоотдачи; рнас — давление насыщенных паров воды; $\psi(U)$ — эмпирический коэффициент, учитывающий снижение парциального давления водяных паров при уменьшении влагосодержания.

Краевые условия для уравнений:

при
$$y=0\ t_{\scriptscriptstyle \Gamma}=t_{\scriptscriptstyle \Gamma H},\, t_{\scriptscriptstyle M}=t_{\scriptscriptstyle M H},\, U=U_{\scriptscriptstyle H};$$
 при $y=L\ t_c=t_{\scriptscriptstyle C H},\, x=x_{\scriptscriptstyle H}.$

Движущая сила процесса сушки здесь выражена как разность парциальных давлений водяных паров над материалом и в окружающем воздухе.

Парциальное давление водяных паров над материалом можно рассчитать как произведение давления насыщенных паров воды при температуре испарения на поправочный коэффициент (уравнение 13).

Давление насыщенных паров воды определяется по формуле:

$$P_{\text{Hac}} = 617 \cdot \exp(17.25 \cdot t_{M}/(t_{M} + 238)).$$
 (14)

Парциальное давление водяных паров в воздухе, находящемся в сушильной камере, рассчитывается по уравнению:

$$P_c = P_{ann} \cdot x_c / (0.622 + x_c).$$
 (15)

Решение системы уравнений математического описания процесса сушки осуществлялось численным методом. Поскольку начальные параметры высушиваемого материала и воздуха известны на противоположных сторонах сушильной

камеры, задавалось некоторое оценочное значение температуры воздуха на выходе из аппарата: $t_{\Gamma} = t_{\Gamma,K}$ при y = 0. В итоге прогнозируются влагосодержание и температура материала на выходе из сушилки и температура и влагосодержание воздуха на входе в аппарат. Проверяется соответствие заданного $t_{r,H}$ и рассчитанного $t_r(L)$ значений начальной температуры воздуха. Если / $t_{r,h} - t_r(L)/>\varepsilon$, где ε — заданная погрешность вычислений, то изменяется принятое значение температуры воздуха на выходе из аппарата и вычисления повторяются. В противном случае расчет заканчивается. Для уточнения значения $t_{r.к}$ используется метод половинного деления. Конечное влагосодержание воздуха на каждой итерации определяется из соотношения материального баланса по испаренной влаге.

Результаты

На рисунках 7, 8 приведены расчетные графики изменения температуры высушиваемого геля, излучающей панели, топочных газов и влагосодержания материала.

Анализ показывает, что температура материала не превышает $114~^{\circ}$ С, что ниже границы начала деструктивных изменений. При начальной температуре топочных газов 800, 850 и $900~^{\circ}$ С достигается конечное влагосодержание материала, соответственно, 40, 4.3 и $1.1~^{\circ}$

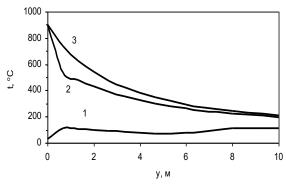


Рисунок 7 — Температурные профили: 1 — материала, 2 — излучателя, 3 — топочных газов. Начальная температура топочных газов 900 °C

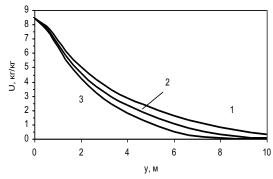


Рисунок 8 — Профили влагосодержания. Начальная температура топочных газов, °C: 1-800; 2-850; 3-900

Заключение

Проведены экспериментальные исследования сушки геля гипана на твердых подложках и на ленточной терморадиационной сушилке. Получены данные по кинетике сушки геля гипана. Установлено, что основное количество влаги (до 90 %) удаляется в периоды прогрева и постоянной скорости сушки, когда скорость удаления влаги лимитируется интенсивностью подвода теплоты.

Получена зависимость поправочного коэффициента, учитывающего понижение давления водяных паров над поверхностью геля гипана от влагосодержания геля.

Для сушки геля гипана можно рекомендовать ленточную инфракрасную сушилку со сплошной металлической лентой. В качестве источника ИК излучения целесообразно применить панели с газовым обогревом.

Предложена математическая модель процесса сушки геля гипана в ленточной терморадиационной сушилке с излучающей панелью, обогреваемой топочными газами. Математическая модель позволяет прогнозировать влагосодержание и температуру материала, температуру и влагосодержание воздуха на выходе из сушилки, а также температуру отработанных топочных газов. Математическая модель может быть использована для выбора рациональных значений основных параметров

процесса: производительности по полимеру, температуры и расхода топочных газов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Николаев А. Ф., Охрименко Г. И. Водорастворимые полимеры. Л.: Химия, 1979.
- [2]. Куренков В. Ф. Водорастворимые полимеры акриламида. Соросовский образовательный журнал, 1997, № 5, с. 48-53.
- [3]. Говарикер В. Р., Висванатхан Н. В., Шридхар Дж. Полимеры. М.: Наука, 1990.
- [4]. Novoskoltseva O. A., Loiko N. G., Nikolaev Y. A., et al. Interpolyelectrolyte complexes based on hydrolyzed polyacrylonitrile for anti-erosion stabilization of soils and ground. *Polymer International*, 2022, vol. 71, no. 6, pp. 697–705.

DOI:10.1002/pi.6289.

- [5]. Фарвазов Н. Р., Конесев Г. В. Преимущества использования полимерных буровых растворов на основе гипана для вскрытия продуктивных пластов. Вестник науки, 2019, Т. 3, № 6(15), с. 462–466.
- [6]. Абрамова Л. И., Байбурдов Т. А., Григорян Э. П. Полиакриламид. М.: Химия, 1992.
- [7]. Зайцев Д. Б., Тимонин А. С. Использование инфракрасного энергоподвода в процессе сушки полиакриламидного геля. *Безопасность труда в промышленности*, 2009, № 9, с. 46–51.
- [8]. Лебедев В. В., Липин А. Г., Кириллов Д. В. Сушка полимерного геля, сопровождающаяся усадкой материала. *Известия ВУЗов. Химия и химическая технология*, 2009, Т. 52, № 12, с. 102–105.

- [9]. Лебедев В. В., Липин А. Г., Кириллов Д. В. Моделирование процесса сушки водорастворимого полимера в терморадиационной сушилке. Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение, 2010, № 1, с. 57–62.
- [10]. Kent R. Energy Management in Plastics Processing: Strategies, Targets, Techniques, and Tools, Third Edition, Elsevier, 2018.

DOI: 10.1016/C2017-0-02035-9.

Липин Александр Геннадьевич — д–р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химической технологии, Ивановский государственный химико-технологический университет (Российская Федерация, 153000, Иваново, Шереметевский пр., д. 7).

Липин Андрей Александрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры процессов и аппаратов химической технологии, Ивановский государственный химико-технологический университет (Российская Федерация, 153000, Иваново, Шереметевский пр., д. 7).

Infrared drying of polyacrylonitrile gel

A. G. Lipin*, A. A. Lipin*,1

* Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russia

Abstract

Hydrolyzed polyacrylonitrile is synthesized in the form of an aqueous solution, which are easily movable polymer gels. Such gels have insufficiently stable characteristics and limited application area. Polymers produced in a solid form are easy to transport, have a high content of the main substance and have a wide range of consumer properties. Thus, the final stage of the polymer production is a very energy-intensive drying process, complicated by the high adhesive capacity of gels.

The kinetics of the infrared drying of hydrolyzed polyacrylonitrile gel was studied. Drying curves and temperature dependences were obtained. Based on the processing of experimental data the equation for calculating the partial pressure of water vapor over the polyacrylonitrile gel was proposed.

Experimental studies of polyacrylonitrile gel drying on a laboratory-scale infrared belt dryer, which operates in a continuous mode, were performed. An infrared belt dryer with a continuous metal belt was recommended as industrial scale dryer.

A mathematical model of the polyacrylonitrile gel drying in an infrared belt dryer with a radiant panel heated by flue gases was proposed. The mathematical model enables to predict the moisture content and temperature of the material, the temperature and moisture content of the air at the outlet from the dryer as well as the temperature of the flue gases.

Keywords

Drying, modelling, polymeric gel, infrared dryer, drying kinetics.

REFERENCES

- [1]. Nikolaev A. F., Ohrimenko G. I. Vodorastvorimye polimery [Water-soluble polymers]. Leningrad, Khimija Publ., 1979. (In Russ.)
- [2]. Kurenkov V. F. Vodorastvorimye polimery akrilamida [Water-soluble polymers of acrylamide]. Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal [Soros Educational Journal], 1997, no. 5, pp. 48–53. (In Russ.)
- [3]. Govariker V.R., Visvanathan N.V., Shridhar Dzh. Polimery [Polymers]. Moscow, Nauka Publ., 1990. (In Russ.)
- [4]. Novoskoltseva O. A., Loiko N. G., Nikolaev Y. A., et al. Interpolyelectrolyte complexes based on hydrolyzed polyacrylonitrile for anti-erosion stabilization of soils and ground. *Polymer International*, 2022, vol. 71, no. 6, pp. 697–705. DOI: 10.1002/pi.6289.
- [5]. Farvazov N. R., Konesev G. V. Preimushhestva ispol'zovanija polimernyh

Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 1(8)

¹ Corresponding author: Email: lipin.a@mail.ru

burovyh rastvorov na osnove gipana dlja vskrytija produktivnyh plastov [Advantages of using hypane-based polymer drilling muds to uncover productive formations]. *Vestnik nauki* [Science Bulletin], 2019, vol. 3, no. 6(15), pp. 462–466. (In Russ.)

- [6]. Abramova L. I., Bajburdov T. A., Grigorjan Je. P. Poliakrilamid [Polyacrylamide]. Moscow, Khimija, 1992. (In Russ.)
- [7]. Zajcev D. B., Timonin A. S. Ispol'zovanie infrakrasnogo jenergopodvoda v processe sushki poliakrilamidnogo gelja [Using infrared energy supply in the drying of polyacrylamide gel]. Bezopasnost' truda v promyshlennosti [Labor safety in industry], 2009, no. 9, pp. 46-51. (In Russ.)
- [8]. Lebedev V. V., Lipin A. G., Kirillov D. V. Sushka polimernogo gelja, soprovozhdajushhajasja usadkoj materiala

- [Drying of polymeric gel that accompanied by material shrinkage]. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol*, 2009, vol. 52, no. 12, pp. 102-105. (In Russ.)
- [9]. Lebedev V. V., Lipin A. G., Kirillov D. V. Modelirovanie processa sushki vodorastvorimogo polimera v termoradiacionnoj sushilke [Modeling of water-soluble polymer drying in a thermo-radiation dryer]. Sovremennye naukoemkie tehnologii. Regional'noe prilozhenie [Modern knowledge-based technologies. Regional application], 2010, no. 1, pp. 57–62. (In Russ.)
- [10]. Kent R. Energy Management in Plastics Processing: Strategies, Targets, Techniques, and Tools, Third Edition, Elsevier, 2018. DOI: 10.1016/C2017-0-02035-9.

Lipin A. G. — Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Processes and Devices of Chemical Technology, Ivanovo State University of Chemistry and Technology (Sheremetevskiy av., 7, Ivanovo, 153000, Russian Federation).

Lipin A. A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Processes and Devices of Chemical Technology, Ivanovo State University of Chemistry and Technology (Sheremetevskiy av., 7, Ivanovo, 153000, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Сушка геля полиакрилонитрила при инфракрасном подводе теплоты / А. Г. Липин, А. А. Липин // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 1(8). С. 39 – 48. DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-39-48

Please cite this article as:

Lipin A. G., Lipin A. A. Infrared drying of polyacrylonitrile gel. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 1(8), pp. 39 – 48.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-39-48

УДК 677.017

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-49-55

Исследование влияния маслоотталкивающией отделки на свойства текстильных материалов для спецодежды сотрудников авторемонтных предприятий

Ю. С. Шустов^{*,1}, Е. Д. Ефанов^{*}

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

Аннотация

Сотрудники авторемонтных предприятий в своей производственной деятельности подвергаются воздействию различных вредных видов масел. В качестве объектов исследования были взяты семь образцов тканей различных производителей, используемых для изготовления рабочей одежды сотрудников авторемонтных предприятий. В процессе эксплуатации ткани подвергаются многократным стиркам. В работе рассмотрены изменения физико-механических свойств рассматриваемых тканей, а также их стойкость к воздействию моторного и трансмиссионного масел, и получены зависимости этих характеристик от количества стирок.

Ключевые слова

Текстильные материалы, авторемонтные предприятия, маслоотталкивание, стирка, опытная носка.

Введение

В последние десятилетия в нашей стране происходит рост автопарка, что ожидаемо вызывает рост потребностей в услугах по техническому обслуживанию и ремонту автомобилей.

Сотрудники авторемонтных предприятий в своей производственной деятельности подвержены комплексному воздействию вредных и опасных производственных факторов: в первую очередь обладающих свойствами физического и химического воздействия на организм человека. Для защиты от воздействия данных факторов необходимо использовать средства индивидуальной защиты и, в первую

В качестве объектов исследования выбраны ткани специального назначения, отличающиеся по составу и структурным характеристикам, имеющие необходимые для целей исследования масловодоотталкивающие отделки. При выборе объектов исследования учтен анализ отечественного рынка специальной одежды и результаты опроса работников авторемонтных предприятий. Характеристики объектов исследования приведены в таблице 1.

Email: shustov-yus@rguk.ru

очередь, спецодежду, которая будет обладать всем комплексом предъявляемых к ней требований в течение всего нормативного срока эксплуатации, что далеко не всегда достижимо вследствие ее ускоренного изнашивания.

 $^{^{1}}$ Для nepenucku:

-Taбπипа 1- Xana	ктеристика объект	рицепополом по

	77			
Номер	Наименование	Сырьевой состав	Поверхностная плот-	Страна про-
образца	ткани	Сырьсьой состав	ность, Γ/M^2	исхождения
1	«Союз-5»	80% ПЭ, $20%$ ХЛ	195	РΦ
2	«Форман»	67% ПЭ, $33%$ ХЛ	256	Бельгия
3	«Твил»	65% ПЭ, $35%$ ХЛ	216	KHP
4	«Премьер stand- ard 210» (арт. 81423)	65% ПЭ, 35% ХЛ	214	РФ
5	«Грета» (арт. 4С5-КВ)	53% ХЛ, 47% ПЭ	214	Беларусь
6	«Консул Анти- стат» (арт. С-181«А» ЮГ)	65% ХЛ, 35% ПЭ, антистатическая нить	219	РΦ
7	«Саржа» (арт. С38ЮД)	100% ХЛ	252	РФ

Анализ режимов труда и отдыха пользователей спецодежды показал, что максимальное количество циклов стирки, которым подвержена данная спецодежда в годичном исчислении — 50. Режим мокрых обработок соответствовал ГОСТ Р 57877 и рекомендациям производителей тканей по уходу за изделиями из них.

Для всех образцов исследуемых текстильных материалов характерно в той или иной степени снижение эксплуатационных показателей (разрывная нагрузка, разрывное удлинение, стойкость к проколу, стойкость к истиранию по плоскости) в процессе многократных стирок.

Утрата в процессе многократных стирок защитной отделки и постепенное разрушение структуры тканей вызывают снижение мастоотталкивающих свойств с ростом количества стирок, вплоть до полной утраты защитной функции хлопчатобумажным образцом.

Значения основного для тканей данного назначения гигиенического показателя — воздухопроницаемости, с ростом числа стирок увеличиваются. При этом наилучшими характеристиками обладает

хлопчатобумажный образец. Образец «Форман» не соответствует требованиям нормативно-технической документации к данному виду текстильных материалов и не может быть использован для пошива летней специальной одежды для защиты от общепроизводственных загрязнений и механических воздействий.

В качестве агрессивных сред применялись полусинтетическое моторное масло и синтетическое масло для автоматических трансмиссий. В качестве критериев оценки действия автомобильных эксплуатационных материалов на ткани специального назначения были применены разрывная и раздирающая нагрузки.

Комбинированное действие многократных стирок и автомобильных эксплуатационных материалов обуславливает снижение прочности тканей специального назначения. При этом наименьшая потеря прочности характерна для образцов Премьер standard 210 (32.4% для ткани после многократных стирок, 35.1~% после действия трансмиссионного масла и 36.2~% после действия моторного масла) и Грета (24.6~%, 34.9% и 35.9~% соответственно). Наибольшая потеря прочности наблюдается у хлопчатобумажного образца Саржа (43.5%, 44.7% и 46,.3%).

Зависимость разрывной нагрузки тканей после воздействия автомобильных эксплуатационных материалов по основе и утку с высокой степенью точности определяется линейной функцией:

$$y = -ax + b \tag{1}$$

где y — разрывная нагрузка, H; x — количество стирок; $a,\ b$ — расчетные коэффициенты.

Также в работе исследована проницаемость автомобильных эксплуатационных материалов для тканей специального назначения. В качестве методики исследования был выбран метод, приведенный в ГОСТ 12.4.268.

Результаты определения проницаемости автомобильных масел приведены на рисунках 1 и 2.

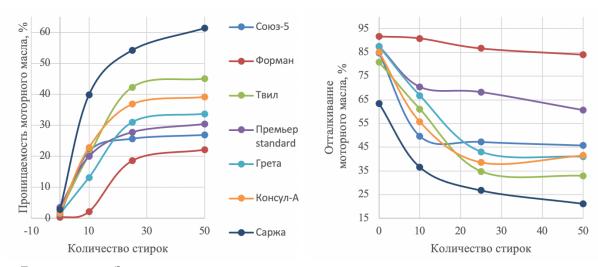


Рисунок 1 — Зависимость проницаемости и отталкивания моторного масла от количества стирок

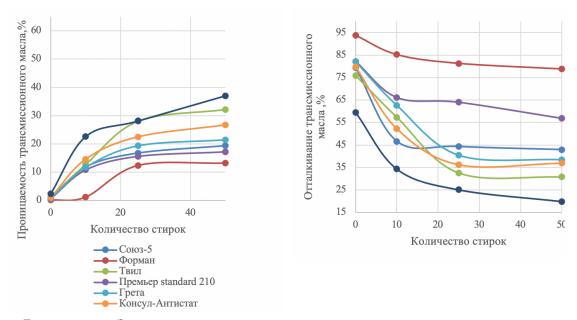


Рисунок 2 — Зависимость проницаемости и отталкивания трансмиссионного масла от количества стирок

С увеличением количества стирок для всех исследуемых материалов увеличивается коэффициент проникновения и снижается коэффициент отталкивания. При этом изменения данных показателей происходят в диапазоне 0-25 стирок с последующей стабилизацией данного процесса для обеих тестовых жидкостей. Это взаимоувязано с утратой тканями защитных отделок и снижением стабильности их структуры вследствие комбинации изнашивающих факторов многократных стирок. Наибольшее проникновение и, соответственно, наименьшая сопротивляемость характерны для хлопчатобумажного образца.

Для опытной носки были отобраны костюмы, выполненные из образцов «Грета»

и «Премьер standard 210». Значения ОПК текстильных материалов определялись после 5 и 50 стирок. Анализ экспериментальных данных показал, что воздействие автомобильных эксплуатационных материалов и многократных стирок хорошо коррелируется с результатами опытных носок, что позволяет снизить затраты на проведение опытных носок, заменив их на лабораторное исследование кинетики износа текстильных материалов.

После 5 стирок, для которых нормируется изменение ряда показателей, а также после истечения нормативного срока эксплуатации, были проведены исследования показателей для данных текстильных материалов, результаты которых приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Сравнительный анализ результатов лабораторных и производственных испытаний

		5 стирок	(50 стирок		
Наименова- ние образца	Наименование показателя	Лабораторный износ	Опыт- ная носка	Лабораторный износ	Опыт- ная носка	
	Разрывная нагрузка, Н					
	Основа*	1024/962/996	952	847/720/732	719	
	Уток*	622/621/618	614	443/440/436	426	
	Маслоотталкивание, ед.	5	5	3	3	
«Премьер	Стойкость к проколу, Н	29.4	30.2	28.4	24.6	
standard 210» (арт. 81423)	Воздухопроницаемость, $\text{дм}^3/\text{м}^2\text{c}$	38.8	48.3	52.5	53.2	
	Стойкость к истиранию, циклы	14572	14316	9780	9512	
	Усадка после стирки, %					
	Основа	0.8	0.8	1.0	0.8	
	Уток	1.0	0.8	1.0	1.0	
	Разрывная нагрузка, Н					
	Основа	1404/1352/1348	1356	904/882/898	880	
	Уток	684/668/672	632	512/498/506	502	
	Маслоотталкивание, ед.	5	5	3	3	
"D (Стойкость к проколу, Н	28.3	27.6	27.1	27.8	
«Грета» (арт. 4С5-КВ)	Воздухопроницаемость, ${\rm дм}^3/{\rm m}^2{\rm c}$	38.4	39.7	54.3	56.3	
	Стойкость к истиранию, циклы	9760	9668	8112	8214	
	Усадка после стирки, %					
	Основа	1.2	1.2	2.0	2.2	
	Уток	0.8	1.0	1.0	1.4	

^{*}Исходная ткань/моторное масло/трансмиссионное масло

Установлено, что для моделирования лабораторного износа целесообразно использовать сочетание воздействия многократных стирок и автомобильных масел. Заключение

Установлено, автомобильные ОТР масла оказывают существенное влияние на характеристики физико-механические тканей специального назначения. Комбинированное воздействие многократных стирок и автомобильных эксплуатационных материалов (моторное и трансмиссионное масло) приводят к снижению разрывных и раздирающих нагрузок тканей для спецодежды. Наибольшая потеря прочности после действия автомобильных масел и стирок характерна для образца «Саржа». Наиболее устойчивы к действию данных агрессивных сред образцы «Форман» и «Грета»

С увеличением числа стирок для всех исследуемых материалов увеличивается коэффициент проникновения и снижается коэффициент отталкивания. При этом изменения данных показателей происходят в диапазоне 0–25 стирок с последующей стабилизацией данного процесса для обеих тестовых жидкостей

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Ефанов Е. Д., Плеханова С. В., Законодательные требования к тканям для пошива специальной одежды. Сборник материалов Всероссийской научной студенческой конференции Инновационное развитие легкой и тектисльной промышленности (ИНТЕКС-2018), 2018, с. 137—139
- [2]. Чернышева Г. М., Давыдов А. Ф., Чернышев М. В., Ефанов Е. Д. Влияние масел на ткани для спецодежды работников нефтеперерабатывающих заводов. Сборник материалов международной научно-технической конференции Дизайн, технологии и инновации в техстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2016), 2016, с. 105–107
- [3]. Ефанов Е. Д., Шустов Ю. С. Исследование изменений специализированных показателей качества тканей для специальной одежды работников авторемонтных предприятий в процессе эксплуатации. Инновации и инвестиции, 2021, \mathbb{N} 4, с. 166–171.

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

Ефанов Евгений Дмитриевич — аспирант, кафедра материаловедения и товарной экспертизы, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

Study of the influence of oil-repellent finishing on the properties of textile materials for workwear of employees of auto repair enterprises

Yu. S. Shustov^{*,1}, E. D. Efanov^{*}

* The Kosygin State University of Russia, Moscow, Russia

Abstract

Employees of car repair enterprises in their production activities are exposed to various harmful types of oils. As objects of study, seven samples of fabrics from various manufacturers were taken, used for the manufacture of work clothes for employees of car repair enterprises. During operation, fabrics are subjected to repeated washings. The paper considers changes in the physical and mechanical properties of the fabrics under consideration, as well as their resistance to the effects of motor and transmission oils, and the dependences of these characteristics on the number of washes are obtained.

Keywords

Textile materials, car repair enterprises, oil repellency, washing, experimental wear.

REFERENCES

[1].Efanov E. D., Plekhanova S. V. Zakonodatel'nyye trebovaniya k tkanyam poshiva spetsial'nov dlya odezhdy [Legislative requirements for fabrics for sewing special clothing. Sbornik materialov Vserossiyskoynauchnoystudencheskoy konferentsii Innovatsionnoye razvitiye legkoy i tektisl'noy promyshlennosti (INTEKS-2018) [Collection of materials of the All-Russian Scientific StudentConferenceInnovative development of light and textis industries (Intex-2018)], 2018, pp. 137–139. (In Russ)

[2]. Chernysheva G. M., Davydov A. F., Chernyshev M. V., Efanov E. D. Vliyaniye masel na tkani dlya spetsodezhdy rabotnikov neftepereraba-tyvayushchikh zavodov [The effect of oils on fabric for overalls of oil refineries. Sbornik materialovmezhdunarodnoynauchno-tekhnicheskoy konferentsii Dizayn, tekhnologii i innovatsii v tekstil'noy ilegkoypromyshlennosti(INNOVATSII-2016) [Collection] ofmaterials of the International Scientific and Technical Conference Design, technology and innovation in textile and light industry (Innovation-2016), 2016, pp. 105-107. (In Russ)

[3]. Efanov E. D., Shustov Yu. S. Issledovaniye izmeneniy spetsializirovannykh pokazateley kachestva tkaney dlya spetsial'noy odezhdy rabotnikov

¹ Corresponding author Email: shustov-yus@rquk.ru

avtoremontnykh predpriyatiy v protsesse ekspluatatsii [Study of changes in specialized fabric quality for special clothing for employees of car repair enterprises during operation]. *Innovatsii i investitsii [Innovation*

and Investments], 2021, no. 4, pp. 166–171. (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).

Efanov E. D. — Postgraduate student, Department of Materials Science and Commodity Expertise, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Исследование влияния маслоотталкивающией отделки на свойства текстильных материалов для спецодежды сотрудников авторемонтных предприятий / Ю. С. Шустов, Е. Д. Ефанов // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 1(8). С. 49 – 55. DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-49-55

Please cite this article as:

Shustov Yu. S., Efanov E. D. Study of the influence of oil-repellent finishing on the properties of textile materials for workwear of employees of auto repair enterprises. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 1(8), pp. 49-55.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-49-55

УДК 66.094.3.097: 666.3-127 DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-56-68

Технология керамических высокопористых блочно-ячеистых нанесенных катализаторов с оксидным активным слоем

Е. О. Обухов^{*}, М. Д. Гаспарян^{*}, В. Н. Грунский^{*,1}, Е. Ю. Либерман^{*}, С. В. Тищенко^{*}, М. Г. Давидханова^{*}

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

Аннотация

В статье представлена технология получения керамических высокопористых ячеистых материалов (ВПЯМ) на основе электрокорунда и фарфоровой массы МГ-27, нанесения на них промежуточных активных слоев из γ -оксида алюминия и диоксида церия и каталитически-активных покрытий на основе оксидов марганца, меди и кобальта. Предварительно исследована активность экспериментальных образцов блочно-ячеистых нанесенных катализаторов в реакции окисления моноксида углерода. Для всех синтезированных катализаторов в интервале температур 100–300 °C определена степень конверсии СО в СО₂.

Ключевые слова

Керамические высокопористые ячеистые материалы (ВПЯМ), промежуточный активный слой, γ-оксид алюминия, диоксид церия, смешанный оксид кобальта, оксид меди, оксид марганца, каталитическое окисление CO, степень конверсии.

Введение

Монооксид углерода является токсичным продуктом неполного сгорания углеводородного топлива 4-го класса опасности по степени воздействия на организм человека с ПДК в воздухе рабочей зоны 20 мг/м³ (около 0.0017 %) [1]. Наиболее целесообразным методом очистки от СО воздуха рабочих помещений, выхлопных газов на транспорте и технологических отходящих газов общепризнан процесс его каталитического окисления. На сегодняшний день разработаны многочисленные

каталитические композиции для конверсии СО в СО2 на основе благородных металлов, оксидов переходных и редкоземельных элементов, перовскитов и т. д., которые традиционно наносятся на гранулированные или сотовые носители [2]. Вышеуказанные материалы различаются не только химическим составом, способами получения, но и температурой «зажигания» катализатора, т. е. температурой начала проявления стабильной активно-В сти. зависимости otрешаемых

¹ Для переписки Email: oxt@muctr.ru

исследовательских или производственных задач можно осуществить выбор композиции с необходимым рабочим температурным интервалом.

В работе [3] отмечено, что наиболее активные катализаторы окисления СО на уровне температуры $200\,^{\circ}$ С имеют нанесенные композиции типа M/γ - Al_2O_3 , где M — Pd, Pt, Au, CuO/CeO_2 , Co_3O_4/CeO_2 , CuO/MnO_x ; γ - Al_2O_3 — материал носителя; а оксиды церия и марганца играют промотирующую роль. В эту же категорию достаточно низкотемпературных можно отнести известный промышленный катализатор окисления CO — гопкалит, в классическом варианте состоящий из оксидов марганца и меди.

Как правило, катализаторы с металлическим активным слоем являются более низкотемпературными, чем оксидные. В проведенных ранее исследованиях катализаторов нового поколения на основе керамических высокопористых блочно-ячеистых носителей для окисления моноксида углерода был синтезирован катализатор с нанесенным на промежуточный активный слой диоксида церия методом химического осаждения активным металлическим кобальтом [4]. Степень конверсии СО с его применением сравнима с данными для палладиевого катализатора и приближается в условиях эксперимента (концентрации CO 10 г/м³, температура 200 °C, расход газа-носителя (50 % об. воздуха +50 % об. N_2) 10 л/мин) к 100 %, а стабильная работа обоих начинается с температуры 150 °C. При этом, поскольку CeO₂ обладает собственной каталитической активностью, наблюдался синергетический эффект промежуточного и конечного активных слоев.

В настоящей работе поставлена задача синтезировать катализаторы на основе керамических ВПЯМ с активным слоем, содержащим оксиды церия, кобальта, меди и марганца, и оценить их активность в процессе окисления моноксида углерода в сравнении с кобальтовым катализатором.

Обоснование выбора составов каталитически активных композиций

Содержащие CeO₂ композиции широко используются в экологическом катализе: окисление CO, селективное окисление CO в токе водорода (PROX-процесс), автомобильные конвекторы (TWC), окисление летучих органических соединений, жидкофазное окисление, топливные элементы (SOFC) и др., что связано с особенностями кристаллической структуры диоксида церия [5].

Диоксид церия обладает кубической гранецентрированной решеткой типа флюорита (пространственная группа Fm3m). Ионы Ce⁴⁺ расположены в вершинах, тетраэдрические пустоты заняты ионами O⁻², середина ребер куба и центр образуют так называемые октаэдрические пустоты, благодаря которым решеточный кислород диоксида церия обладает аномально высокой мобильностью. Это свойство позволяет предполагать протекание процесса окисления CO в присутствии CeO₂ по окислительно-восстановительному механизму с повышенной активностью [6].

В результате миграции решеточного кислорода происходит достаточно легкое образование кислородной вакансии и восстановление ионов Ce^{4+} на поверхности диоксида церия до состояния Ce^{3+} . При этом его флюоритовая структура остается достаточно стабильной при температурах до 400 °C, несмотря на нестехиометричность по кислороду образующихся соединений переменного состава: $\mathrm{Ce}_{11}\mathrm{O}_{20}$, $\mathrm{Ce}_{62}\mathrm{O}_{112}$, $\mathrm{Ce}_{40}\mathrm{O}_{72}$, $\mathrm{Ce}_{39}\mathrm{O}_{70}$, $\mathrm{Ce}_{29}\mathrm{O}_{52}$, $\mathrm{Ce}_{19}\mathrm{O}_{34}$, $\mathrm{Ce}_{9}\mathrm{O}_{16}$ и $\mathrm{Ce}_{7}\mathrm{O}_{12}$ [7].

Повышению содержания высокоподвижных форм O_2 , а также их мобильности, способствует допирование диоксида церия ионами d- и f-элементов c

образованием твердых растворов с флюоритоподобной кристаллической структурой. При выборе допантов используют соединения, имеющие близкое кристаллическое строение.

Различие в ионных радиусах между допантом и церием не должно превышать 15 %, в противном случае существует область ограниченной растворимости. Если допант имеет степень окисления 2+ или 3+, происходит формирование композиций с различными дефектами по следующим схемам:

$$2MO + Ce_{Ce} \rightarrow 2M_{Ce} + CeO_2 + 2V_O$$
 (1)

$$2M_2O_3 + 3Ce_{Ce} \rightarrow 4M_{Ce} + 3CeO_2 + 2V_O$$
 (2)

где M — двух- или трехвалентный катион, Ce_{Ce} — катион церия в позиции церия в кристаллической решетке, M_{Ce} — катион допанта в кристаллической решетке CeO_2 , V_O — вакансия [8]. Наибольший интерес представляют церийсодержащие системы, включающие Mn, Cu и Co.

Высокая каталитическая активность бинарной системы MnO_x-CeO₂ обусловлена образованием дефектной структуры, а именно флюоритоподобных твердых растворов Mn_xCe_{1-x}O₂, в процессе формирования которых происходит генерирование дефектов и анионных вакансий, способствующих повышению подвижности кислорода в кристаллической решетке благодаря редокс-превращениям ${\rm Mn}^{4+}/{\rm Mn}^{3+}$ и $\mathrm{Ce}^{3+}/\mathrm{Ce}^{4+}$, OSC и, как следствие, росту каталитической активности. Марганецсодержащие каталитические системы применяются в сочетании с другими элементами, такими как Cu, Co, Ni и La, для образования манганитов, которые очень активно окисляют СО [9].

Катализаторы CuO/CeO₂ также рассматриваются как перспективные катализаторы удаления CO из загрязненного воздуха при температурах ниже 20 °C, что обусловлено исключительной кислородной накопительной способностью (OSC) композиции [3].

Легирование смешанного оксида Со₃О₄ диоксидом церия способствует повышению активности чистого оксида кобальта. Наиболее высокое значение активности наблюдается для катализатора СеО₂/Со₃О₄. По-видимому, модифицирование диоксидом церия приводит к снижению температуры перехода $\mathrm{Co}^{3+}/\mathrm{Co}^{2+}$, а также повышает устойчивость катализатора к дезактивации водой. Катализаторы СеО2/Со3О4 обеспечивают полную конверсию CO при 110 °C в течение не менее 140 часов, в то время как Со₃О₄ или механическая смесь Со₃О₄ и СеО₂ дезактивируется через 2 часа непрерывной работы [3].

Сильное взаимодействие между высокодисперсными активными центрами Co^{2+} и экспонированным Ce^{3+} на поверхности носителя CeO_2 приводит к образованию окислительно-восстановительного цикла $\mathrm{Ce}^{4+}/\mathrm{Co}^{2+} \leftrightarrow \mathrm{Ce}^{2+}/\mathrm{Co}^{3+}$, что объясняет высокую каталитическую активность данной композиции [10].

Синтез оксидных катализаторов окисления CO на основе керамических ВПЯМ

Синтез высокопористой блочно-ячеистой основы катализаторов проводили известным методом дублирования структуры полимерной матрицы из открытоячеистого пенополиуретана (ППУ) путем пропитки его керамическим шликером с последующей высокотемпературной обработкой [11, 12].

 < 0.5 % масс.). Такой состав «фарфоровых» ВПЯМ является таким же высокопрочным (предел прочности на сжатие до 3.4 МПа) и, в то же время, более технологичным, чем состав, представленный в работе [13], так как не требует введения в связующее спекающих и модифицирующих добавок, а временной технологической связкой является дистиллированная вода.

Высокотемпературный обжиг ВПЯМ после пропитки шликером, отжима и сушки при температуре $120~^{\circ}$ С проводили в лабораторной печи VP 70/17 с выдержкой при температурах $660~^{\circ}$ С (деструкция и удаление ППУ) и $1350~^{\circ}$ С (спекание массы МГ-27). Скорость нагрева до $660~^{\circ}$ С составляла не более $0.8~^{\circ}$ С/мин, далее $\sim 3~^{\circ}$ С/мин.

На рисунке 1 показана микроструктура перемычки образца фарфоровых ВПЯМ.

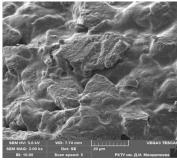


Рисунок 1 — SEM-фотографии поверхности перемычки образца фарфоровых ВПЯМ

На снимке можно видеть зерна наполнителя исходного размера (20–25 мкм) и частицы связующего размером до 10 мкм.

На рисунке 2 приведена дифрактограмма образца фарфоровых ВПЯМ. Фазовый состав материала представлен корундом (76 %), синтезированным при спекании муллитом $(3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 - 23\%)$ и следовыми количествами кварца (< 1 %). Далее на полученную керамическую основу наносятся методом последовательной пропитки и термообработки два промежуточных активных слоя. Первый слой состоит из базового при синтезе катализаторов компонента – у-оксида алюминия (первичный носитель); второй слой — диоксид церия или твердый раствор замещения $Mn_{0.2}Ce_{0.8}O_2$ на основе кристаллической решетки СеО₂ (вторичный носитель).

Последняя стадия синтеза катализаторов — нанесение на носитель каталитически активного покрытия.

Нанесение первичного активного слоя, развивающего поверхность ВПЯМ, проводят по традиционной методике последовательными процессами пропитки водным раствором алюмозоля с содержанием 12~% масс. Al_2O_3 , стабилизированного ионами NO_3^- , и термообработки при температуре не выше $500~^{\circ}\mathrm{C}$.

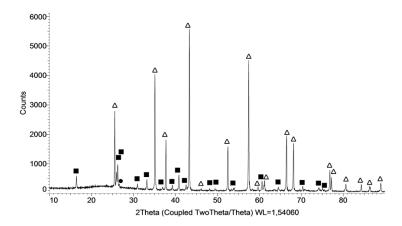


Рисунок 2 — Фазовый состав образца фарфоровых ВПЯМ: Δ - корунд (α-Al2O3), ■ — муллит (3 Al2O3×2SiO2)

Методика получения вторичного носителя и собственно катализаторов конечного заданного состава заключается в проведении аналогичных процессов пропитки и термообработки с использованием выбранного прекурсора активного компонента в определенном температурном режиме.

Прекурсором активного диоксида церия являлся раствор соли Ce(NO₃)₃·6H₂O с концентрацией 0.5 моль/л. Пропитанные образцы сушили при температуре 100-120 °C в течение 30 минут. Далее помещали в предварительно нагретую до 100 °C электропечь. Максимальная температура прокаливания co скоростью нагрева 3 °C/мин составила 600 °C с выдержкой в течение 2 часов.

Для получения бикомпонентного каталитического покрытия в системе CeO_2 - MnO_x пропиточный раствор готовили из смеси нитратов церия (III) и марганца (III) с концентрацией 0.5 моль/л, взятых в объемном соотношении 4:1.

В качестве прекурсоров оксидов меди и кобальта использовали также растворы их нитратов с концентрацией $0.5\ \text{моль/л}$. После пропитки нитратом меди образцы прокаливали при температуре $600\ ^{\circ}\text{C}$ в течение $2\ \text{часов}$, а после импрегнирования

нитратом кобальта прокаливание проводили при температуре 400 $^{\circ}\mathrm{C}$ в течение 2 часов.

Для проведения испытаний по определению каталитической активности синтезированы образцы нанесенных оксидных катализаторов на основе фарфоровых ВПЯМ с различным активным слоем. Их физико-механические характеристики, а также состав и содержание активных композиций приведены в таблице 1.

Плотность пор всех образцов соответствует плотности пор исходного ППУ и составляет 30 ррі (число пор на линейный дюйм); габаритные размеры: диаметр 50 ± 1 мм, высота 50 ± 1 мм; объем каталитического слоя (одного блока) — $98.1~{\rm cm}^3$; доступная внешняя объемная поверхность: $1300-1400~{\rm m}^2/{\rm m}^3$.

На рисунках 3 и 4 приведены результаты определения фазового состава кобальт-цериевого и медно-цериевого катализаторов (образцы N 1 и 4).

Кроме корунда и муллита (материалы керамической основы) на обоих дифрактограммах подтверждается присутствие церианита (CeO_2) с кубической флюоритной решеткой, а также смешанного оксида кобальта Co_3O_4 и тенорита (CuO), соответственно.

Таблица 1 — Физико-механические характеристики синтезированных катализаторов

№ об- разца	Состав и содержание активного слоя, % масс.	Масса,	Средняя плот- ность, $\Gamma/\text{см}^3$	Общая пори- стость, %	Предел проч- ности при сжатии, МПа
1	$6.8 \text{Co}_3 \text{O}_4 / 28 \text{CeO}_2 / 9.2 \gamma \text{-Al}_2 \text{O}_3$	58.2	0.59	82.1	3.5
2	$1.3\mathrm{MnOx}/9.2\mathrm{CeO}_2/9.1\gamma$ - $\mathrm{Al_2O}_3$	44.3	0.45	84.1	3.2
3	$14 CuO/10 CeO_2 \cdot MnOx/9 \gamma - Al_2O_3$	48.4	0.49	83.4	3.4
4	$15.6 \mathrm{CuO} / 13 \mathrm{CeO}_2 / 9.4 \gamma$ - $\mathrm{Al}_2 \mathrm{O}_3$	54.9	0.56	82.8	3.5
5	$3.6 Co_3 O_4/3.2 MnOx/9.6 \gamma$ -Al $_2 O_3$	41.9	0.43	85.1	3.2
6	$14.5 \text{ Ce} 0.8 \text{Mn} 0.2 \text{Ox} / 9.7 \gamma \text{-Al}_2 \text{O}_3$	45.7	0.47	83.6	3.3

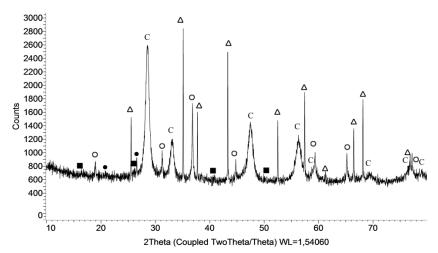


Рисунок 3 — Дифрактограмма образца катализатора $Co_3O_4/CeO_2/\gamma$ - $Al_2O_3/B\Pi$ ЯМ: Δ — корунд (α - Al_2O_3), ■ — муллит (3 $Al_2O_3 \times 2SiO_2$), С — церианит (CeO_2), O — Co_3O_4

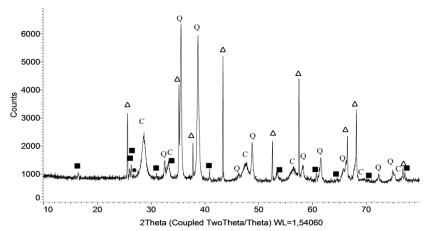


Рисунок 4 — Дифрактограмма образца катализатора $CuO/CeO_2/\gamma$ - $Al_2O_3/B\Pi SM$: Δ — корунд (α - Al_2O_3), ■ — муллит (3 $Al_2O_3 \times 2SiO_2$), С — CeO_2 , Q — тенорит (CuO)

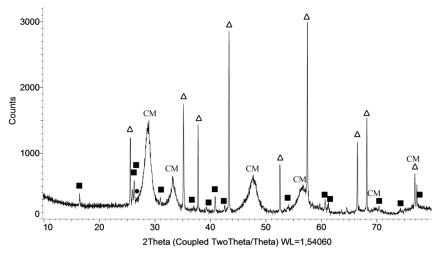


Рисунок 5 — Дифрактограмма образца катализатора $Ce0,8Mn0,2Ox/9,7\gamma$ - $Al2O3/B\Pi ЯМ:$ Δ — корунд (α -Al2O3), ■ — муллит (3 $Al2O3 \times 2SiO2$), CM — твердый раствор Ce(1-x)MnxO(2-d)

На рисунке 5 приведена дифрактограмма образца № 6, на которой присутствуют фазы корунда, муллита и цериймарганцевого твердого раствора.

Рассчитанный по данным РФА состав последнего описывается формулой Ce0.784Mn0.216Ox. Таким образом подтверждается его образование при термообработке керамического носителя смесью растворов нитратов церия и марганца.

Также твердые растворы общего состава $Ce_{(1-x)}Mn_xO_{(2-d)}$ обнаружены на дифрактограммах образцов N 2 и 4.

Оценка активности синтезированных оксидных катализаторов

Предварительные исследования каталитической активности проводились на специализированном сорбционно-каталитическом стенде.

Газовый поток формируется через электронные расходомеры El-flow в узле смешения из баллона со смесью $(0.5\%\mathrm{CO} + \mathrm{N_2})$, концентратора кислорода с

чистотой более 97 % и компрессора (в случае окисления кислородом воздуха).

Предварительно подогретая до температуры эксперимента газовая смесь заданного состава поступает в реактор с испытуемым образцом катализатора, установленный в трубчатой электропечи с терморегулятором. Проба газа после реактора через ротаметр поступает для регистрации в газоанализатор «Каскад-Н 62.2». Эксперименты проводились при начальной концентрации СО $\sim 0.01\text{-}0.08~\%$ об. $(0.11\text{-}0.84~\text{г/m}^3)$ и расходе газа-окислителя 3-12~л/мин.

За меру каталитической активности принимали степень конверсии CO в CO₂, которая рассчитывалась по уравнению:

$$x_{\rm a} = (C_0 - C_{\rm K})/C_0 \tag{3}$$

где x_a — степень конверсии, C_0 и C_k — начальная и конечная концентрации CO.

Результаты экспериментов приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Результаты определения активности катализаторов

№ и состав образца	Темпера- тура, °С	$egin{array}{ll} { m Pacxod} & & & & & & \\ { m O}_2 \ ({ m Bo3-} & & & & & \\ { m дyxa}), & & & & & \\ & { m \pi/muh} & & & & & \end{array}$	$ m Pасход \ газовой \ смеси \ (0.5\%CO+N_2), \ MЛ/МИН $	$C_0,$ Γ/M^3	$C_{\kappa},$ Γ/M^3	$x_{ m a}, \ \%$
	100	6	360	0.32	0.08	75.00
	150	6	360	0.32	0.01	96.88
	150	3	180	0.32	0.00	100.00
	150	2	120	0.32	0.01	96.88
	150	6	180	0.15	0.01	93.33
1	150	6	120	0.11	0.00	100.00
	100	(6)	360	0.32	0.21	34.38
$Co_3O_4/$	150	(6)	360	0.32	0.12	62.50
$ m CeO_2/ \ \gamma ext{-}Al_2O_3/$	200	(6)	360	0.32	0.07	78.13
ВПЯМ	250	(6)	360	0.32	0.02	93.75
	300	(6)	360	0.32	0.00	100.00
	300	(3)	180	0.32	0.00	100.00
	300	(12)	720	0.32	0.00	100.00
	300	(6)	180	0.16	0.00	100.00
	300	(6)	240	0.22	0.00	100.00
	300	(3)	360	0.64	0.11	82.81

Продолжение таблицы 2

	T	T	1	P	objectivae n	
№ и состав образца	Темпера- тура, °С	$egin{array}{ll} { m Pacxog} \\ { m O}_2 \ ({ m Bo3-} \\ { m дyxa}), \\ { m \pi/muh} \end{array}$	$ m Pасход \ газовой \ смеси \ (0.5\%CO+N_2), \ m _{MЛ/MИН}$	${ m C}_0, \ { m {\scriptstyle \Gamma/M}}^3$	$C_{\kappa},$ Γ/M^3	$x_{ m a}, \ \%$
	150	6	360	0.32	0.25	21.88
2	200	6	360	0.32	0.23	28.13
	250	6	360	0.32	0.22	31.25
MnOx/	300	6	360	0.32	0.12	62.50
$\mathrm{CeO}_2/$	300	3	180	0.32	0.12	62.50
γ-Al ₂ O ₃ / ВПЯМ	300	3	90	0.16	0.01	93.75
BHAM	300	1.5	90	0.32	0.02	93.75
	100	6	360	0.32	0.08	75.00
3	150	6	360	0.32	0.05	84.38
	200	6	360	0.32	0.04	87.50
CuO/	250	6	360	0.32	0.03	90.63
CeO_2 ·	300	6	360	0.32	0.02	93.75
MnOx/	300	6	480	0.42	0.03	92.86
γ-Al ₂ O ₃ /	300	3	480	0.84	0.04	95.24
ВПЯМ	300	3	360	0.64	0.02	96.88
	300	3	180	0.32	0.01	96.88
4	100	6	360	0.32	0.03	90.63
	150	6	360	0.32	0.02	93.75
CuO/	150	3	180	0.32	0.01	96.88
$\mathrm{CeO}_2/$	200	6	360	0.32	0.01	96.88
γ -Al $_2$ O $_3/$	200	3	180	0.32	0.01	96.88
ВПЯМ	200	3	360	0.64	0.00	100.00
5	100	6	360	0.32	0.07	78.13
	150	6	360	0.32	0.02	93.75
$\mathrm{Co_3O_4}/$	200	6	360	0.32	0.01	96.88
MnOx/	100	3	360	0.64	0.13	79.69
γ-Al ₂ O ₃ /	150	3	360	0.64	0.01	98.44
ВПЯМ	200	3	360	0.64	0.00	100.00
	100	6	360	0.32	0.14	56.25
6	150	6	360	0.32	0.18	43.75
$\mathrm{Ce}0.8\mathrm{Mn}0.2\mathrm{Ox}/$	200	6	360	0.32	0.13	59.38
γ -Al $_2$ O $_3/$	250	6	360	0.32	0.13	62.50
ВПЯМ	300	6	360	0.32	0.12	71.88
7*	100	6	360	0.32	0.09	93.75
${ m Co/CeO_2/}$	150	3	180	0.32	0.02	96.88
γ-Al ₂ O ₃ /						
ВПЯМ	200	6	360	0.32	0.00	100.00

^{*} образец катализатора № 7 получен восстановлением образца № 1 в токе водорода в смеси с аргоном при температуре 400 °C в течение 3 ч.

	Темпера- тура, °С	Расход О ₂ , л/мин	Расход газовой смеси $(0.5\% { m CO+N_2}),\pi/{ m Muh}$	${ m C}_0, \ { m _{\Gamma/M}}^3$	${\rm C_{\kappa}, \atop \Gamma/M}^3$	<i>x</i> a, %	
	100	0.4	1.6	3.83	3.30	13.84	
	150	0.4	1.6	3.83	0.37	90.34	
	200	0.4	1.6	3.83	0.03	99.22	

Таблица 3 – Определение активности катализатора Co₃O₄/CeO₂/γ-Al₂O₃/ВПЯМ

Для образца катализатора \mathbb{N} 1 проведен дополнительный эксперимент с повышенной концентрацией СО. Результаты приведены в таблице \mathbb{N} 3.

Заключение

Наибольшую активность из исследованных катализаторов в процессе окисления моноксида углерода в условиях эксперимента показали кобальт-цериевый (№ 1) и медно-цериевый (№ 4) катализаторы. В соответствии с [3] они отвечают критерию низкотемпературных со 100 %-й конверсией СО при температурах не выше 200 °С, а при 150 °С стабильно работают с конверсией на уровне 97 %.

Кроме того, катализатор $Co_3O_4/CeO_2/\gamma$ - $Al_2O_3/B\Pi$ ЯМ активно работает при окислении моноксида углерода кислородом воздуха начиная с 200 °C и заканчивая 100 %-ной конверсией СО при температуре 200 °C. Катализатор позволяет достигать практически полного окисления (99.22 %) моноксида углерода с повышенной концентрацией 3.83 г/м³. Катализатор с восстановленным в токе водорода из смешанного оксида металлическим кобальтом (№ 7) не только показал 100 %-ю конверсию СО при температуре 200 °C, но и начало стабильной работы при наименьшей температуре 100 °C. Тем самым подтверждается положение о большей активности металлических катализаторов, чем оксидных, при равной температуре, и тот факт, что первые являются более низкотемпературными.

Однако, рассматривая в целом класс катализаторов окисления моноксида

углерода на основе керамических ВПЯМ с точки зрения их промышленного применения, перспективными можно считать оба типа катализаторов. При несколько меньшей активности оксидные катализаторы не требуют дополнительной технологической стадии восстановления, а активный слой металлических катализаторов со временем частично окисляется.

Физико-химические исследования образцов катализаторов проводились на оборудовании центра коллективного пользования (ЦКП) РХТУ им. Д.И. Менделеева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. ГОСТ 12.1.005-88. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования. 31 с.
- [2]. Крылов О. В. Гетерогенный катализ. М.: ИКЦ «АКАДЕМКНИГА», 2004, 679 с.
- [3]. Royer S., Duprez D. Catalytic Oxidation of Carbon Monoxide over Transition Metal Oxides. *ChemCatChem*, 2011, vol. 3, \mathbb{N}_{2} 1, pp. 24–65.

DOI: 10.1002/cctc.201000378

[4]. Обухов Е. О., Спешилов И. О., Гаспарян М. Д., Ваграмян Т. А., Грунский В. Н. и др. Исследование процесса окисления моноксида углерода на керамических высокопористых блочно-ячеистых катализаторах с кобальтовым активным покрытием. Огнеупоры и техническая керамика, 2019, № 4–5, с. 24–28.

- [5]. Иванов В. К., Щербаков А. Б., Баранчиков А. Е., Козик В. В. Нанокристаллический диоксид церия: свойства, получение, применение. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2013, 284 с.
- [6]. Yi L., Cun W., Yun G., Guanzhong L., Yanqin W. Effects of surface area and oxygen vacancies on ceria in CO oxidation: Differences and relationships. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2010, vol. 316, pp. 59–64. DOI: 10.1016/j.molcata.2009.09.022
- [7]. Trovarelli A., Llorca J. Ceria Catalysts at Nanoscale: How Do Crystal Shapes Catalysis. *ACS Catalysis*, 2017, vol. 7, pp. 4716-4735. DOI: 10.1021/acscatal.7b01246
- [8]. Иванова А. И. Физико-химические и каталитические свойства систем на основе CeO_2 . *Кинетика и катализ*, 2009, т. 50, № 6, с. 831–849.
- [9]. Shi L., Chu W., Qu F., Luo S. Low-temperature catalytic combustion of methane over MnO_x CeO_2 mixed oxide catalysts. *Catalysis Letters*, 2007, vol. 113, N_2 1–2, pp. 59–64. DOI: 10.1007/s10562-006-9012-6

- [10]. Sui C, Xing L, Cai X, Wang Y, Zhou Q, Li M. Co-Supported CeO₂ Nanoparticles for CO Catalytic Oxidation: Effects of Different Synthesis Methods on Catalytic Performance. *Catalysts*, 2020, vol. 10, № 2, p. 243.
- DOI: 10.3390/catal10020243
- [11]. Анциферов В. Н., Беклемышев А. М., Гилев В. Г., Порозова С. Е., Швейкин Г. П. Проблемы порошкового материаловедения. Часть П. Высокопористые проницаемые материалы. Екатеринбург: УрО РАН, 2002, 262 с.
- [12]. Грунский В. Н., Беспалов А. В., Гаспарян М. Д., Стародубцева О. В., Лукин Е. С. Высокопористые проницаемые ячеистые керамические материалы с использованием шликера на основе алюмосиликатных связующих. Огнеупоры и техническая керамика, 2012, № 4–5, с. 45–48.
- [13]. Лукин Е. С., Попова Н. А., Гаспарян М. Д. и др. Состав шихты для высокопористого керамического материала с сетчато-ячеистой структурой / Патент РФ № 2525396. Опубл. 10.08.2014, Бюл. № 22.

Обухов Евгений Олегович — ассистент, кафедра Общей химической технологии, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Гаспарян Микаэл Давидович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры Общей химической технологии, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Грунский Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Общей химической технологии, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Либерман Елена Юрьевна — д-р хим. наук, доцент, кафедра Технологии неорганических веществ и электрохимических процессов, Российский химикотехнологический университет им. Д. И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Тищенко Сергей Васильевич — ведущий инженер, кафедра Общей химической технологии, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Давидханова Мария Григорьевна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры Общей химической технологии, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Technology of ceramic highly porous block-cellular deposited catalysts with an oxide active layer

E. O. Obukhov^{*}, M. D. Gasparyan^{*}, V. N. Grunsky^{*,1}, E. Yu. Liberman, S. V. Tischenko, M. G. Davidkhanova

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

Abstract

The article presents a technology for producing ceramic highly porous cellular materials (HPCM), based on electrocorundum and porcelain mass MG-27, applying intermediate active layers of γ -alumina and cerium dioxide to them and catalytically active coatings based on manganese, copper and cobalt oxides. The activity of experimental samples of block-cellular deposited catalysts in the oxidation reaction of carbon monoxide has been preliminarily studied. For all synthesized catalysts in the temperature range of 100-300 °C. The degree of conversion of CO to CO₂ has been determined.

Keywords

Ceramic high-porous cellular materials (HPCM), intermediate active layer, γ -aluminum oxide, cerium dioxide, mixed cobalt oxide, copper oxide, manganese oxide, catalytic oxidation of CO, degree of conversion.

REFERENCES

- [1]. GOST 12.1.005-88. Vozdukh rabochei zony. Obshchie sanitarno-gigienicheskie trebovaniia. [State standard 12.1.005-88. Work area air. General sanitary and hygienic requirements] 31 p. (In Russ.)
- [2]. Krylov O. V. Geterogennyi kataliz. [Heterogeneous catalysis]. Moscow: IKTs «AKADEMKNIGA», 2004, 679 p. (In Russ.)
- [3]. Royer S., Duprez D. Catalytic Oxidation of Carbon Monoxide over Transition Metal Oxides. ChemCatChem, 2011, vol. 3, N_2 1, pp. 24–65.

DOI: 10.1002/cctc.201000378

[4]. Obukhov E. O., Speshilov I. O., Gasparian M. D., Vagramian T. A.,

Grunskii V.N. et. al. Issledovanie protsessa okisleniia monoksida ugleroda na keramicheskikh vysokoporistykh blochno-iacheistykh katalizatorakh s kobal'tovym aktivnym pokrytiem [Investigation of the process of carbon monoxide oxidation on ceramic highly porous block-cellular catalysts with a cobalt active coating]. Ogneupory i tekhnicheskaia keramika [Refractories and technical ceramics], 2019, \mathbb{N}° 4–5, pp. 24–28. (In Russ.)

[5]. Ivanov V. K., Shcherbakov A. B., Baranchikov A. E., Kozik V. V. Nanokristallicheskii dioksid tseriia: svoistva, poluchenie, primenenie [Nanocrystalline cerium dioxide: properties, preparation, application] Tomsk:

¹ Corresponding author Email: oxt@muctr.ru

Izd-vo Tomckogo un-ta [Publishing House of Tomsk University], 2013, 284 p. (In Russ.)

[6]. Yi L., Cun W., Yun G., Guanzhong L., Yanqin W. Effects of surface area and oxygen vacancies on ceria in CO oxidation: Differences and relationships. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2010, vol. 316, pp. 59–64.

DOI: 10.1016/j.molcata.2009.09.022

[7]. Trovarelli A., Llorca J. Ceria Catalysts at Nanoscale: How Do Crystal Shapes Catalysis. ACS Catalysis, 2017, vol. 7, pp. 4716–4735.

DOI: 10.1021/acscatal.7b01246

- [8]. Ivanova A. I. Fiziko-khimicheskie i kataliticheskie svoistva sistem na osnove CeO₂ [Physicochemical and catalytic properties of systems based on CeO₂]. *Kinetika i kataliz* [*Kinetics and catalysis*], 2009, vol. 50, № 6, pp. 831–849. (In Russ.)
- [9]. Shi L., Chu W., Qu F., Luo S. Low-temperature catalytic combustion of methane over MnOx CeO_2 mixed oxide catalysts. *Catalysis Letters*, 2007, vol. 113, N_2 1–2, pp. 59–64.

DOI: 10.1007/s10562-006-9012-6

[10]. Sui C, Xing L, Cai X, Wang Y, Zhou Q, Li M. Co-Supported CeO2 Nanoparticles for CO Catalytic Oxidation: Effects of Different Synthesis Methods on Catalytic

Performance. Catalysts, 2020, vol. 10, N_2 2, p. 243.

DOI: 10.3390/catal10020243

- [11]. Antsiferov V. N., Beklemyshev A. M., Gilev V. G., Porozova S. E., Shveikin G. P. Problemy poroshkovogo materialovedeniia. Chast' II. Vysokoporistye pronitsaemye materialy [Problems of powder materials science. Part II. Highly porous permeable materials]. Ekaterinburg: UrO RAN [Ural Branch of RAS], 2002, 262 p. (In Russ.)
- [12]. Grunskii V. N., Bespalov A. V., Gasparian M. D., Starodubtseva O. V., Lukin E. S. Vysokoporistye pronitsaemye iacheistye keramicheskie materialy ispol'zovaniem shlikera na osnove aliumosilikatnykh sviazuiushchikh [Highly porous permeable cellular ceramic materials using slip based on aluminosilicate binders. Ogneupory i tekhnicheskaia keramika [Refractories and technical ceramics, 2012, № 4-5, pp. 45–48. (In Russ.)
- [13]. Lukin E. S., Popova N. A., Gasparian M. D. et. al. Sostav shikhty dlia vysokoporisto-go keramicheskogo materiala s setchato-iacheistoi strukturoi [The composition of the mixture for a highly porous ceramic material with a mesh-cellular structure] / Patent RF N_2 2525396. Opubl. 10.08.2014, Biul. N_2 22. [RF patent N_2 2525396 Publ. 08/10/2014, Bulletin N_2 22] (In Russ.)

Obukhov E. O. — Assistant, Department of General Chemical Technology, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya square, 9, Moscow, 125047, Russian Federation).

Gasparyan M. D. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of General Chemical Technology, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya square, 9, Moscow, 125047, Russian Federation).

Grunskiy V. N. — Dr. Sc. (Eng.), Head of Department of General Chemical Technology, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya square, 9, Moscow, 125047, Russian Federation).

Liberman E. Yu. — Dr. Sc. (Chem.), Assoc. Professor, Department of Technology of inorganic substances and electrochemical processes, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya square, 9, Moscow, 125047, Russian Federation).

Tischenko S. V. — Leading Engineer, Department of General Chemical Technology, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya square, 9, Moscow, 125047, Russian Federation).

Davidkhanova M. G. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of General Chemical Technology, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya square, 9, Moscow, 125047, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Технология керамических высокопористых блочно-ячеистых нанесенных катализаторов с оксидным активным слоем / Е. О. Обухов, М. Д. Гаспарян, В. Н. Грунский, Е. Ю. Либерман, С. В. Тищенко, М. Г. Давидханова // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. N 1(8). С. 56 – 68.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-56-68

Please cite this article as:

Obukhov E. O., Gasparyan M. D., Grunskiy V. N., Liberman E. Yu., Tischenko S. V., Davidkhanova M. G. Technology of ceramic highly porous block-cellular deposited catalysts with an oxide active layer. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 1(8). pp. 56-68.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-56-68

УДК 691.32

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-69-93

Fabrication of foam concrete by use of novel foam generator — vortex jet apparatus: study of foam concrete properties

R. Sh. Abiev*,**,1

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

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

Abstract

A new method of foam concrete production by use of vortex jet apparatus (VJA) is studied. The foam produced by VJA exhibits high stability and narrow size distribution of the bubbles' diameter and the latter correlates well with diameters of foam concrete pores. VJA is a compact device allowing to generate foam without compressor, inhausting the air from the ambience resulting from vacuum in the center of vortex flow. Owing to additional opportunities (compared e.g. with usual axial ejector) like ability to suck the air, longer residence time and higher kinetic energy transformed further into dispersion of the bubbles new device lets to control the parameters of the foam and the density of the foam concrete, thus allowing to create foam with smaller diameter of the bubbles and higher stability. A mechanism of large pores isolation during water absorption tests was proposed. Main properties of foam concrete produced in this study: real and apparent densities, open and total porosities, thermal conductivity and thermal capacity, water absorption, compressive and flexural strengths have been measured; their values fully meet the requirements of Russian and French standards. The main part of pores was attributed to the open porosity because of very close values of total and open porosities. Equations characterizing relative mass of water absorbed by the foam concrete and the fraction of open porosity filled with the water were found as functions of apparent density. It was found that foam concrete production with wide range of densities (from approx. 480 till 1640 kg/m³) is easily attainable by means of VJA. Hence, the VJA could be used as an effective tool for foam generation and foam concrete production.

Keywords

Foam concrete, foam generation, foam stability, foam concrete durability, thermal conductivity, water absorption, open porosity, pore structure

This study was carried out as part of a state assignment of the Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (topic no. AAAA-A19-119022290091-8).

¹ Corresponding author Email: abiev.rufat@gmail.com

1 Introduction

Foam concrete (to be more exact - autoclaved aerated concrete (AAC), also known as autoclaved cellular concrete (ACC)) production method was proposed and patented by a Czechoslovakian, Mr. E. Hoffman for the first time in 1889. The aeration was produced by carbon dioxide generated in the reaction between hydrochloric acid and limestone. Powdered aluminium and calcium hydroxide were used as aeration agents in cementing mixtures by Aylsworth & Dyer in the USA in 1914. Later it was perfected in the mid-1920s by the Swedish architect and inventor Dr. Johan Axel Eriksson, working with Professor Henrik Kreüger at the Royal Institute of Technology [1].

Both generation of stable foams and outlooks of foam concrete production are extensively studied in several works. In the recent review of Amran et al. [2] an extended view on the foam (or 'foamed') concrete has been done. Foamed concrete is defined in their work as a light cellular concrete which can be classified as a lightweight concrete (density of 400–1850 kg/m³) with random air-voids created from the mixture of foaming agents in mortar. Some citation from Amran et al. review [2]: "Historically, the Romans first realized that by adding animal blood into a mix of small gravel and coarse sand with hot lime and water and agitating it, small air bubbles were formed making the mix more workable and durable. Over the past 20 years, substantial improvements in production equipment and better superplasticizers, foaming agents have permitted the use of foamed concrete in a larger scale and many efforts have been made to study the characteristics and behavior of foamed concrete comprehensively in order to simplify its usage in structural applications."

Foam concrete possesses following superior properties: 1) low density which allows to save spends to the raw materials,

transportation and operations costs; 2) thermal conductivity; 3) fire resistance; 4) acoustic impedance; 5) easier operations like drilling, sawing etc.

There are two different technologies of foam concrete production in general. First one is known as AAC (autoclaved aerated concrete) or ACC (autoclaved cellular concrete) and produced with the use of gas (hydrogen) generated during any reaction between reactants added into the cement mortar (the most popular are limestone and Aluminum powder for the further reaction between CaO, Al and water). The reactions are known:

$$2Al + 6H2O = 2Al(OH)3 + 3H2;$$

 $2Al + 3Ca(OH)2 = Ca3(AlO3)2 + 3H2;$
 $2Al(OH)3 + Ca(OH)2 = Ca[Al(OH)4]2.$

For the production of autoclaved aerated concrete not only Aluminum, but special equipment – autoclave and additional energy is needed.

The second kind of foam concrete technology uses the mixture of cement, sand and water (cement mortar) with foam prepared beforehand. For this method a foaming agent is only compulsory component. Gas is usually an air blowing with the compressor. In this paper we will show opportunity to avoid the use of compressor and therefore to decrease the total costs of foam concrete production. Autoclave could be also used but for acceleration of foam concrete hardening some special additions could be used.

In this paper we will discuss the fact that not only foaming agents, but the method of foam production, as well as the cement mortar to the foam ratio control the concrete density through a size and distribution of air bubbles created in the cement paste mixture. Foam bubbles are defined in [2] as enclosed air-voids formed due to the addition of foaming agent. The foaming agents are commonly synthetic, protein-based, detergents, glue resins, hydrolyzed protein, resin soap, and

saponin [2], often the waste of food production or farm waste. An extended review of foam concrete preparation was performed in [2]. Some references of [2] are used hereinafter for the analysis the state of art.

The influence of foaming agent on the properties of foam concrete has been studied in [3–6]. The content of the foaming agent has a considerable effect on properties of both fresh and the hardened concrete. It is reported that the excessive foam volume results in a drop in flow [7, 8]. However, the flow is significantly affected by mixing time and therefore with the energy introduced into the flow. As reported, the greater the mixing time, the more is the amount of the entrained air, albeit, prolonged mixing may cause the loss of entrained air by dropping the air content and by destruction of the foam walls dividing the bubbles [9, 10].

As indicated in [2], the stability of foaming agent should be confirmed according ASTM C 869-91 and ASTM C 796-97 test procedures [11–13]. Typical values of the air voids range in most foamed concrete applications is between 6% and 35% of the total volume of final mix [14]. As introduced by ACI 523.3R-93 [15] the foam is produced by blending the foaming agent, water and compressed air (generated by an air-compressor) in pre-calculated proportion ratios in a foam generator calibrated for a discharge rate. Another production process was also introduced by Valore Jr. and by Taylor [16–18]. In their approach, the foam quality was influenced by the dilution ratio of the foaming agent, the process of forming, the compressed air density and pressure, and the adding and blending process with the mortar. In the presented paper we will discuss among the other issues the modified foam generation process, where the air is not to be compressed due to ability of foam generator to suck in the air from the ambient atmosphere.

The foam quality was of great importance because it represented the stability of foamed concrete and also it affected the strength and stiffness of the resultant foamed concrete [19]. In foamed concreting, the compressive strength is mostly affected by the foam content rather than its reliance upon the water/cement ratio [20]. Particularly, the compressive strength of foamed concrete is highly influenced by the type of foaming agent such as by protein based foaming agent more than synthetic foaming agent [4].

However, Wee et al. [21] reported through both experimental and numerical studies, that the inclusion of air bubbles in foamed concrete is more influential on compressive strength than on modulus of elasticity. It was recommended in general to add the foam immediately after its production in a viscous state to guarantee the stability of the foam. Stability can be further achieved by addition of foam stabilizing fluorinated surfactant into the foamed concrete [22]. In the presented work the foam with increased stability was used, therefore this problem is not so acute.

Not only foam content but water/cement and sand/cement ratios as well as quality of water [2] have strong influence on the properties of foam concrete. A water requirement in foamed concrete depends upon the constituents and the use of admixtures. Water content is also governed by the uniformity, consistency and stability of the desired mix [23, 24].

It was reported that low water content caused the mix to be too stiff and bubbles broke during mixing which resulted in an increased density [19, 25]. Similarly, at high water content, the slurry was too thin to hold the bubbles which caused segregation of the foam from the mix and consequently the final density was increased [19]. Hence, some optimal water concentration in the slurry looks as solution to retain bubbles. Valore Jr. [18]

reported that whenever the water/cement ratio was increased the sand proportion should be increased as well. He also noted that the addition of the proper amount of water in a mix should be visualized by consistency rather than by a predetermined water/cement ratio [16, 18].

It was recommended that the water to cement ratio should be minimized because the excessive volume of water causes segregation of foamed concrete during casting which affects the workability performance [26].

In general, the water to cement ratio range was suggested to be from 0.4 to 1.25 or in a range from 6.5% to 14% of the target density [27, 28]. The amount of water must be appropriate to guarantee that the workability of the premixed paste or mortar was acceptable for foamed concrete fresh design mix. Otherwise, the cement would absorb water from the foam and cause rapid degeneration of the foam [11, 28, 29]. As discussed in [2], the optimum water/cement ratio should be limited between 0.5 and 0.6 as suggested by British Cement Association [29].

The role of plasticizers used to improve workability and to stabilize the compatibility of foamed concrete is also discussed in [2]. They are practically defined as water-reducers used to increase the performance of fresh concrete by easing its mobility and plasticity; however, no significant effects on concrete segregation were observed [30, 31]. One of the most popular plasticizers in the foamed concrete production is fluorosurfactant (FS1). As mentioned in [2], the FS1 is generally used to reduce the amount of mixing water and also marginally accelerates the strength gain of the produced foamed concrete. The plasticizers content is approximately between 0.45\% and 5% of foaming agent volume [32].

Fibers used in the foamed concrete are either synthetic or natural fibers, namely: alkali resistant glass, kenaf, steel, oil palm fiber, and polypropylene fiber [14, 33–35]. The

volumetric fraction of these types of fibers range was lying between 0.25% and 0.4% of the total volume of mix design constituents [36]. Previously, it was reported that a significant improvement of mechanical and impact properties was observed when the foamed concrete was reinforced with polypropylene fibers [37, 38]. It was later revealed that the usage of fiber reinforcement could change the typical behavior of foamed concrete from brittle into ductile elastic-plastic [38].

In the review of Amran et al. [2] some recommendations of foamed concrete mix proportion are presented. There are no specific mix proportion methods to obtain targeted properties in foamed concrete. However, some trial and error methods are utilized to design the appropriate mix such as net water content, content of foam by percentage, and binder content. These methods are considered to be sufficient calculation techniques to propose the desired strength [33, 39]. Kearsley [40] proposed the system of two equations in order to calculate the mix proportions based on cement and the foam contents.

There are two techniques that could be used in the process of foam concreting; prefoaming method and mix-foaming method.
The pre-foaming method encompasses generating the base mix (mortar) and stabilizing the preformed aqueous foam independently.
Then, the foam is completely blended into the base mix. The pre-formed foam could be produced by either so-called 'dry' or 'wet' method.

The 'dry' foam is generated by pushing the foaming agent solution over sequences of high density constraints and by pushing compressed air concurrently inside a mixing chamber. The dry foam is quite stable and generates bubbles with sizes smaller than 1 mm. The small sized bubbles facilitate a stable and uniformly blend of foam with the basic material in order to produce pumpable

foamed concrete [6]. The 'wet' foam is generated by spraying the foaming agent solution through a fine mesh, the 'wet' foam bubble size is generally between 2 and 5 mm and the foam produced is somehow less stable compared to the dry foam [41]. In the presented paper we will discuss the opportunity to prepare 'dry' foam by means of other technique.

In the mixed foaming method, the surface active agent is practically mixed along with base-mix constituents specifically cement slurry during the mixing process and the obtained foam results in a cellular structure in the foamed concrete [42].

For the discussion about properties of foam concrete in fresh and matured conditions and the analysis of the influencing factors we recommend to attend to the review of Amran et al. [2] as well as the papers mentioned in their work. It is worth noting to mention that an increase in water/cement ratio and reduction of the foam content proportionally increase the plastic density and reduces the consistency and rheology of foamed concrete [7]. It was reported that the consistency of foamed concrete was reduced when the foam content was added due to a higher volume of air content while addition of superplasticizers increased the rate [12].

An extended overview of foam formation was the topic of Pugh's paper [41]. High stability of foams prepared from detergents, proteins, long-chain fatty acids was shown. As stated in [41], lifetimes increase exponentially with concentration of surfactant and a plot of foam lifetime versus concentration, produces an S-shaped profile. In these systems, the film thinning times are relatively short (compared to the total foam lifetimes) and the stability of these systems is controlled by the balance of interfacial forces which equilibrate, after drainage has been completed. The films are usually fairly thin (within the range of the intermolecular forces), and, in the absence of external disturbances (evaporation, vibrations,

temperature gradients etc.) then the foams can remain stable almost indefinitely.

The motivation of this paper is to study the advantages of recently developed vortex jet apparatus (VJA) [43 - 49] applied for foam generation with following foam concrete production. In our previous research the ability to obtain very stable foam with quite small bubbles has been shown. It is worth noting to mention that the stability of the foam (time of half-decay of the foam in the glass) was approximately 5 times higher (3200-3800 sec) than it is necessary (720 sec)according to Russian Standards (GOST) for the foam used for fire extinguishing with first used foaming agent (PO-6SP) and between 5200 and 8100 second for the foam prepared with the second foaming agent (GreenFroth frother, Italy).

The aims of the paper are to study experimentally the properties of the foam concrete obtained by the new method (first aim) as well as to build up the cause-and-effect relation between the process parameters of the foam concrete production process by means of new method and the main properties of foam concrete (second aim, see also section Theory and calculation for details).

2 Materials and methods

Samples have been produced by means of vortex jet apparatus (section 2.1) in the laboratory at the department of Optimization of Chemical and Biotechnological Equipment of Saint Petersburg State Institute of Technology and further experimental analysis (section 2.2) was made in the Research center of Material Science ('C2MA') of Ecole des mines d'Alès (in 2017 renamed as IMT Mines Alès).

2.1 Description of Vortex jet apparatus (VJA) and its advantages concerning foam preparation

The main feature of the vortex jet apparatus (VJA) [44] (Figure 1) compared with

conventional axial jet devices (ejectors) is that a workflow is fed into tangential inlet 5, whereby the flow is swirled. Moving from the cylindrical zone 2 in the tapered region of a confuser, adjacent to the neck 3, the radius of rotation of the workflow is reduced resulting in increase of the angular velocity as well as the increase of the tangential component of velocity. In addition, due to the tapering shape of the confuser 2 the axial component of velocity at the neck 3 also reaches its maximum.

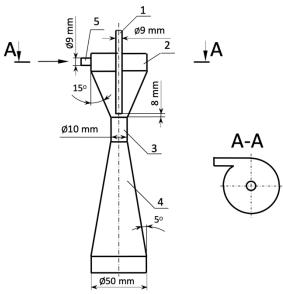


Figure 1 — Schematic of vortex jet apparatus [44]: 1 — nozzle; 2 — confuser; 3 — neck; 4 — diffuser; 5 — tangential inlet

Thus, in the entrance to the neck, axial and circumferential components of the fluid velocity have a maximum value. As a result, the kinetic energy of the flow increases in VJA more rapidly compared to the conventional jet devices (ejectors). Indeed, the specific kinetic energy in a conventional jet devices consists of only the axial velocity component w_a (see Figure 1) $E_{k.eject} = \rho w_a^2/2$. In a vortex jet apparatus, due to the tangential feed of the active flow, in addition to the axial velocity component w_q also acts, therefore the specific kinetic energy in the VJA contains both translator and rotational terms as follows:

 $E_{k,VJA} = \rho \left(w_a^2 + w_\varphi^2 \right)$. Hence the higher is tangential velocity, the larger is difference between specific kinetic energy for VJA, e.g. at typical for water in real VJA values $w_a = 5.46 \text{ m/s}, w_\varphi = 22.38 \text{ m/s}$ and for usual ejector with a straight active phase supply $(w_a = 5.46 \text{ m/s})$ we found

 $E_{k.VJA} = 260.2kPa \gg E_{k.eject} = 9.8kPa.$

Because of the high fluid velocity in the annular gap, in accordance with the energy conservation law, the pressure becomes minimal in this zone. Namely, as shown by our experiments, the local pressure sinks to the value minus 98 kPa (vacuum, or 2 kPa of residual pressure), which leads to the "cold boiling" of liquid (cavitation), and the gas bubbles form a rotating conical cord in the central part of the apparatus.

One of the substantial advantages of VJA is that this device combines two impacts on the foam: so-called condensation method (i. e. creation of the bubbles by means of pressure drop lower that saturation pressure) and dispersing method (by means of high level of shear stresses, elongation of bubbles and some types of instability).

Foam is a disperse system consisting of cells — gas bubbles separated by liquid films. Usually, gas is regarded as the discontinuous phase and the liquid is a continuous phase. Properties of foams are largely determined by the conditions of their production, factors influencing their properties and destruction. There are the following main properties characterizing the foam system: foam-forming ability of the solution; multiplicity; stability (sustainability); dispersion.

Foam is widely used in many industries and in everyday life: foam detergents; in fire-fighting; for the production of hydro and sound insulation, foam concrete; the use of froth flotation for the beneficiation of mineral resources; it is widely used for the manufacture of heat- and sound-insulating materials, etc.

In [46] the application of vortex jet apparatus as a foam generator was investigated. For laboratory studies of VJA foam generating installation was assembled, including glass model of VJA with diameter of the widest part of diffuser and confuser of 50 mm and neck diameter of 10 mm. A copper tube with an inner diameter of 4 mm and outer diameter of 6 mm was used as a nozzle, which was furnished with the sealing unit allowing adjustment of the axial position of the nozzle. The VJA was fed with a 6% solution of foaming agent PO-6SP (synthetic hydrocarbon biodegradable frother). Foam from the VJA was fed into a cylindrical organic glass collector with a diameter of 400 mm and a volume of 30 liters. Foam stability was determined as the time of the destruction of 50% of the volume of foam in the 1 liter laboratory graduated cylinder made of glass. The results of the experiments are presented in Figure 2.

Two types of experiments have been performed: 1) with an immersion of the outlet pipe of the VJA under a layer of water; 2) without immersion. In the first case, a swirling flow moving along the walls of the diffuser in the VJA was formed, and there were additional air suction through the outlet of the VJA, i.e., through the diffuser. It also led to some reduction in performance of liquid (Figure 2).

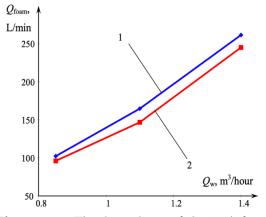


Figure 2 — The dependence of the VJA foam performance on the fluid flow rate:
1 – with immersion of VJA diffuser;
2 – without immersion of VJA diffuser

Research at this stage has led to the following results:

- 1) Vacuum achieved in the VJA allows injecting air into VJA without using compressor, at least for low expansion foam.
- 2) The ratio of the foam, or expansion ratio, or multiplicity (volume of the foam related to the volume of liquid used for foam production) obtained in the VJA in the studied range of feed water flow rates (from 0.85 to 1.4 m³/h) ranged from 7 to 11 and was weakly dependent on the location of the exhaust pipe (immersed under the liquid level or above it).
- 3) It is possible to obtain quite fine foam with high stability in VJA. The stability of the foam obtained in the VJA was higher than 3200 s (at the expansion ratio of the foam of 7), and reaches 3800 s (at the expansion ratio of 11–12). This makes it possible to rely on the preservation of stability of the foam during its transportation through pipelines to process up to several tens of meters that can be used both to extinguish the fire [46], and in the production of foam concrete [49].

Pressure at the input of frother water solution (active phase) was 1.375 bar and at the entrance of air (induced phase) into the nozzle it was in the range of -4 to -4.5 kPa (vacuum). Frother water solution flow rate was kept as high as 1.25 m³/h in all cases.

The conditions of samples' preparation are presented in Tables 1 and 2. Table 3 represents foam concrete mix proportion during experiments. GreenFroth frother (Italy, made from the animal waste) was used for foam production in further experiments.

Table 1 — Conditions of samples' preparation (samples 1–16)

Sample number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Grade of cement			С	EM I	42,5N	(M50	00 D0 ⁵	*)				CEM	I 32,5	N (M	400*)	
Raw weight of the sample, kg	0.385	0.350	0.360	0.155	0.155	0.155	0.420	0.420	0.160	0.160	0.220	0.220	0.220	0.230	0.230	0.230
Raw apparent density, kg/m ³	1500	1370	1400	909	605	909	1640	1640	625	625	098	098	860	006	006	006

^{*}According to Russian State Standards (GOST)

Table 2 — Conditions of samples' preparation (samples 17–28)

			- I	I I								
Sample number	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Grade of cement					CEM I	II 42,5I	N (M50	00 D20	*)			
Raw weight of the sample, kg	0.130	0.130	0.130	0.170	0.170	0.170	0.370	0.370	0.370	0.240	0.240	0.240
Raw apparent density, kg/m3	202	507	202	664	664	664	1445	1445	1445	930	930	930

Table 3 — Foam concrete mix proportion for preparation in VJA

Apparent density, kg/m3	500	600	800	1000
Cement, kg	300	310	320	350
Sand, kg	100	210	400	560
Water, liter	150	160	160	180
Foam, liter	750	680	550	430

2.2 Apparent density

Apparent density was measured by two methods: 1) geometrical method and 2) open porosity method (according to the French National Norms NF P18-459).

Geometrical measurements of the samples dimensions were performed by means of sliding caliper with accuracy of 0.02 mm, their cross-section has been measured at the

both ends of sample and then the mean value has been found for each of them. Before weighing and sizes' measurements the samples have been cut by diamond saw with electrical drive. The weight of the samples has been defined by means of scales 'Mettler PM 2000' (maximum weighing capacity 2100 grams, readability 0.01 gram, reproducibility 0.005 gram). The scales were placed onto stabilized table with stone tabletop. The air in

the room was conditioned: temperature was stabilized at 20.4-20.5 °C, relative humidity was held at 50%. The balance was covered with the carton box from four sides to avoid impact of air flows to the readouts of the device.

The scales has been preloaded with the piece of the concrete (574 grams) for improvement of the precision of measurement (to work in the middle range of the scales). The mass of samples lied between 112 grams and 384 grams.

Open porosity measurements method is described below in the corresponding section.

2.3 Real density

Real density of the bulk solid was measured by means of automatic pycnometer 'micromeritics AccuPyc 1330' of Micromeritics Instrument Corporation, used with helium gas after vacuumization.

The samples have been dried in a drying cabinet at 105 °C within 72 hours, and then milled in the laboratory scale vibrational mill within 8 second till the maximum size of the powder of 0.01 mm has been obtained. Scales used for the mass measurements Sartorius QUINTIX124-1S (maximum weighing capacity 120 grams, readability 0.0001 gram).

Two samples were taken from each powder; the results (mean real density of solid powder) were compared and have been very close (the difference not exceeded 0.3%). For each sample 3 measurements were made, average values and standard deviations were calculated as mean for two sets of 3 measurements.

2.4 Open porosity

Open porosity of the samples was measured according to the French National Norms NF P18-459. Samples with dimensions 40 mm \times 40 mm \times L (L was in the range of 60-70 mm) were dried within 36 hours in the drying cabinet at 90°C. The samples have

been exposed in the vacuum chamber at 25 mbar within 4 hours, and then the water at ambient temperature was fed into the chamber. The samples have been immersed into the water within 24 hours, first under vacuum, and then the pressure was set to the atmospheric level for the full saturation of the pores in the foam concrete structure.

After saturation the samples of foam concrete have been weighed by means of scales 'Mettler PM 2000' mentioned afore in section 2.2 by two different ways: 1) on the scalepan immersed in water (so called hydrostatic weighing) and 2) by usual way after wiping with the wet cloth wringed out to prevent excess wiping of the samples. The results of weighing were calculated according to the NF P18-459 recommendations.

2.5 Total porosity

with Samples dimensions $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times \text{L} \text{ (L} = 60-70 \text{ mm)} \text{ were}$ dried within 36 hours at 90 °C and weighed after cooling down the room temperature (mass of sample M_{dry}). The samples have been exposed in the vacuum chamber at 25 mbar within 4 hours before the tap water was fed into the chamber. The samples have been submerged into the water within 24 hours. It is worth noting to mention that even after 18-19 hours of wetting of the samples some of them were not drown in the vacuum conditions in the chamber. They drowned just when the tap on the vacuum chamber has been opened, allowing the water to penetrate into the pores at ambient (atmospheric) pressure.

After full impregnation the samples have been weighing by two methods: first submerged (drawn) in the water (mass M_{water}) and then after short wiping by wet serviette of extend water (but not the capillary water in the pores) (mass M_{air}).

Scales used for the mass measurements was 'Mettler PM 2000' (for further details of the scales look at the section 2.2).

Totally open porosity of 10 samples with different density has been measured. For this aims pycnovolumetrical tests by automatic pycnometer 'micromeritics AccuPyc 1330' have been performed. Examples were milled within 8 seconds in the vibrational mill till the powder substance and dried within 72 hours at 105°C. For each powder sample 3 measurements of real density ρ_{real} were made, average value and standard deviation were calculated at once. Two samples were taken from each powder; the results were compared for repeatability. Resulting average value and standard deviation were calculated for 6 measurements set.

2.6 Thermal conductivity and thermal capacity

Thermal diffusivity being measured first by means of flash method by means of Linceis XFA device (method of transient thermal diffusivity of the heat impulse created by laser beam). For this aim the discs of foam concrete and usual concrete with thickness of 3 mm and diameter of 25 mm has been cut. Unfortunately, both for concrete and foam concrete the method gave approximately 100 folds smaller values compared with the published in the literature. This effect could be probably attributed to the non-isotropic properties of very thin samples, for which the sizes of the pores are comparable with the thickness of the samples. The other reasons could also have some impact.

For further investigations we have chosen method of transient thermal conductivity measurements using a device 'Neotim FP2C' equipped with a combined thin film sensor including small diameter V-type wire heater (heat source) and a thermocouple. The film sensor was located between two pieces of foam concrete belonging to the same piece of foam concrete (made in the same batch) and therefore having identical properties. Sizes of the pieces were $40\times40\times60$ mm³. Additional load (approx. 0.5 kg) to the upper piece has

been applied to improve the thermal contact between thermocouple and foam concrete pieces. The software supplied with the device has been used for continuous detection of the temperature at the surface between two pieces. To control the stability of the temperature before each measurement test the temperature has been measured with the accuracy of 0.01°C; steady state was postulated if the measured temperature was constant $(\pm 0.01^{\circ}\text{C})$ within at least 1 minute. The power of the heat source was adapted according to the recommendations of the 'Neotim' producer concerning the expected thermal conductivity of samples. Each measurement was repeated 2–4 times to obtain acceptable repeatability. Response curves were analyzed in automatic mode by means of specialized software provided with the device, which has checked until the line in logarithmic scale could be satisfactory described by linear low, corresponding to the regular heating regime.

Totally the thermal conductivity of 14 samples (7 pairs) of different density was measured.

Thermal capacity was measured by means of Diamond DSC Perkin-Elmer device. The samples have been milled to the fine powder before measurements. Eight samples with all the range of densities have been used (numbers 2, 8, 11, 15, 19, 22, 25, 28, see Tables 1 and 2).

2.7 Compressive strength

Compressive strength was measured by use of $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ samples (24 samples with all the range of densities were used) at the testing device launched by oil pump equipped with the QuantX 4 computer program (ver. 4) which allowed to control the instant values of oil pressure and the compressive load. Surface of the load was 16 cm² in all cases, the time of loading varied from 14 to 342 seconds (depending on the strength of the samples), whereas speed of loading was kept constant (0.1 MPa/s for three first

samples and $0.05~\mathrm{MPa/s}$ for all the others). Preload of $0.15\text{--}0.20~\mathrm{kN}$ was used before starting of measurements to ensure the tight contact between the samples' surface and the loading surfaces.

2.8 Flexural strength

Flexural strength test was performed at the Zwick/Z010 testing device with the threepoint bending method (24 samples with all the range of densities were used) at velocity of loading pin of 0.002 mm/s to avoid any shock-like type of loading. The testing device was equipped with textXpert II computer program (Zwick/Roell) which was used to set the parameters of loading and to acquire the instant results of tests, i.e. load, strain and stresses. The sizes of middle cross-section of each specimen at the flexure tests were measured with 0.01 mm accuracy by sliding caliper. The breadth of samples was between 35.9 mm and 39.6 mm and the height was in the range of 35.3 mm and 41.28 mm. Maximal deformations by flexure (related to the height of the middle cross-section) were in the range of 0.534% to 2.390%.

2.9 Water absorption

Examples with dimensions $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times L \text{ (where L} = 60\text{--}70 \text{ mm)}$ were dried within 36 hours in the oven at $90\text{--}105 \,^{\circ}\text{C}$ by two steps: $16.5 \text{ hours at } 90\,^{\circ}\text{C}$, continued 24 hours at $105\,^{\circ}\text{C}$.

The same samples (number 1, 2, 7, 15) have been used before for open porosity experiments (see section 2.5). The new samples (number 18, 20, 24, 27) are the pieces obtained from the flexure experiments only as a rest parts of samples after crushing (from the side close to the bearing of test device, where the stresses were minimal), i.e. their structure admittedly was not changed before.

It was interesting to compare these two sets of samples to reveal the influence of preliminary saturation of the porous structure of the foam concrete with the water under pressure difference on the fraction of the pores open for the water absorption. Evidently some of the walls could be destroyed by the water both due to the impregnation into the cement-sand structure and due to the mechanical impact of pressure difference between evacuated volume of pores and outer atmospheric pressure.

Samples number 1, 2, 7 were submerged in the water for 72 hours, whereas the samples number 15, 18, 20, 24, 27 were immersed into the water for 221 hours (sample 15 used for open porosity experiments was tested together with 'new' samples to compare the effect of porous structure changes during vacuum water saturation of the foam concrete). The mass of dry samples (without paraffin wax coating M_{dry} and with coating M_{paraf}) as well as wet samples M_{wet} were weighed by 'Mettler PM 2000' scales described above. Paraffin wax coating has covered all the sides of each sample excluding one square side with the sizes approx. 40×40 mm² (the real sizes were measure with sliding caliper) allowing one-dimensional penetration of water into the pores of the samples.

3 Theory and calculation

As mentioned afore, the main general goal of this work was to investigate the mechanical and thermophysical properties of foam concrete linked with such 'basic' property like apparent density. Further step of research will be aimed to build up the logical structure and mathematical model allowing to predict the properties of foam concrete (output parameters) by the control of the flow regime, concentrations and nature of surfactants etc. (input parameters).

The principal *particular* aim of this paper is to investigate the main properties of the foam concrete produced with the use of new device for foam generator – vortex jet apparatus. Besides, impact of the foam to cement ratio on the main properties (hereinafter

called as 'outer properties') of foam concrete (density, strength by compressive and bending tests, thermal conductivity, water absorption, open porosity etc.) and influence of the pore structure on the outer properties are the other important questions of this work.

Hence, our 'dream' concept is to build a chain of **Controlled parameters**: Flow regime — Flow rates ratio (Liquid/Gas) — Shear stresses — Properties of the foam: Bubble's size distribution in the foam etc. — Concentration of components — Inner properties of the foam concrete: Distribution of the pores sizes/Fraction of open pores/Thickness of the walls between pores – Outer properties of the foam concrete: Density/Strength (compression, bending)/Absorption of water/Frost durability (number of cycles)/Permeability by the gas/Thermal conductivity.

In this paper the background to achieve this 'dream' concept was created by experimental investigation of outer properties of the foam as a function of controlled parameters. Dependence of mechanical and thermophysical properties of foam concrete on its apparent density as a 'basic' property (though it is pointed out as one of the outer properties) is a particular task of this paper.

Figure 3 represents a 'black box approach' — a look to an impact of input parameters (preparation of foam) and process parameters on the properties of foam concrete, whereas Figure 4 depictures more detailed approach — a chain of the impact of input parameters (preparation of foam) and process parameters (transformation of foam) on the properties of foam concrete. It would be expedient in the nearest future to study also impact of Water/Cement ratio, fraction of cement, fraction of surfactant etc. at the outer properties of foam concrete, too.

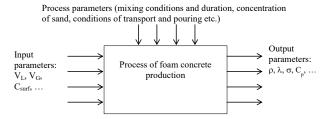


Figure 3 — General concept: scheme of the impact of Input parameters (preparation of foam) and Process parameters (transformation of foam) on the properties of foam concrete (black box approach)

The calculations have been performed as described in each of the following sections.

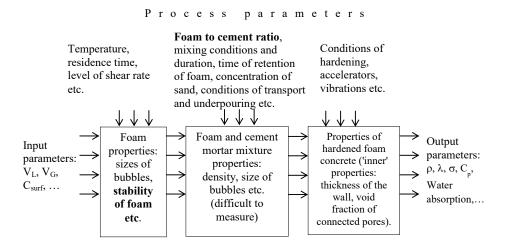


Figure 4 — Detailed concept: chain of the impact of Input parameters (preparation of foam) and Process parameters (transformation of foam) on the properties of foam concrete

3.1 Vortex jet apparatus and foam parameters

Additionally to the information presented in section 2 following parameters of foam to be discussed as necessary for further analysis.

For the flow rate of liquid $V = 1.25 \text{ m}^3/\text{h}$ and diameter of the inlet pipe $d_{in} = 9 \text{ mm}$ the mean velocity is

$$w_{\varphi,\text{in}} = 4 V/\pi d_{\text{in}}^2 = 5.458 \text{ m/s}.$$
 (1)

Specific kinetic energy at the inlet pipe could be estimated as

$$E_{k.in} = \rho \ w_{\varphi.in}^2/2 = 14.89 \text{ kPa.}$$
 (2)

Specific angular momentum at the inlet pipe at the radius R = 50/2 - 9/2 = 20.5 mm

$$M_{in} = \rho R w_{\phi,in} = 111.9 \text{ kg/(m s)}.$$
 (3)

Tangential velocity in the neck assuming the radius of the vortex is close to the radius of the neck itself $R_{\rm neck}=d_{\rm neck}/2=5~{\rm mm}$ is:

$$w_{\phi.neck} = M_{in}/\rho \ R_{neck} = 22.38 \ m/s.$$
 (4)

The axial velocity in the neck:

$$w_{a.\text{neck}} = 4 V / \pi d_{\text{neck}}^2 = 4.42 \text{ m/s.}$$
 (5)

Specific kinetic energy in the neck is a sum of the tangential and axial kinetic energies:

$$E_{k.\text{neck}} = \rho(w_{\varphi.\text{in}}^2 + w_{a.\text{neck}}^2)/2 =$$

= 260.2 kPa. (6)

Then, the increase of specific kinetic energy in VJA

$$\Delta E_k = E_{k,\text{neck}} - E_{k,\text{in}} = 245.3 \text{ kPa} \tag{7}$$

should be recovered by reversible pressure drop in the neck as well as by irreversible energy losses by viscous dissipation.

As it was recently shown in [50], high level of shear stresses is an attribute of VJA hydrodynamics which allows to de-agglomerate even carbon nanotubes. It was shown particularly that the maximal level of energy dissipation rate could be as high as $12000~\mathrm{W/kg}$ (at the entrance to the neck) whereas the

mean level in the neck is 3000 W/kg. At these conditions the level of shear stresses in the neck is in average about 10 Pa and the maximal is approx. 39 Pa.

To estimate the size d of minimal bubble forming in the VJA due to turbulent shear stresses let us consider that during the disintegration of bubbles dynamic balance of interphase tension and shear stresses takes place [51]

$$p = 4\sigma/d \approx \tau, \tag{8}$$

and the surface tension for the water with frother is $\sigma \approx 0.04$ N/m. Then, the size of the bubbles formed in the VJA are

$$d \approx 4\sigma/\tau = 4 \times 0.04/39 \approx 4.1 \text{ mm}.$$
 (9)

This rough estimation correlates overestimates the real size distribution of the bubbles in the foam generated in VJA (mean diameter for the foam close to 1 mm) showing there are other mechanisms of bubble disintegration in VJA [47, 51]. Hence, some other types of impact like Kelvin-Helmholtz instability, shear stresses in the boundary layer, dynamic effects etc. could play more important role. See results of the comparative analysis in our paper [47].

3.2 Apparent density

Apparent density was calculated in all cases as follows (geometrical method)

$$\rho_{\text{app.geo}} = M/(L \times B \times H), \tag{10}$$

where M is a mass of the sample, kg; L, B, H are length, breadth and height of the sample, respectively, m. Studied foam concrete samples have had apparent density in the range from 492 till 1547 kg/m³.

It was possible to calculate the apparent density from the open porosity measurements for five samples (see section 3.4 below).

$$\rho_{app.por} = M_{dry} \; \rho_{water} / \; (M_{air} - M_{water}), \eqno(11)$$

where M_{dry} is a mass of dry sample, kg; M_{air} is a mass of the sample with the water in the

pores in the air, kg; and M_{water} is a mass of the water displaced by the sample impregnated with water, kg; ρ_{water} is a density of the water.

Index 'por' corresponds to the open porosity method and index 'geo' attributed to the geometrical method.

3.3 Real density

Mean value of real density of samples as well as standard deviation from 3 tests for each sample were calculated automatically by automatic pycnometer 'micromeritics AccuPyc 1330'.

Standard deviation of real density for two sets of 3 measurements was not higher than 3.2 kg/m³, maximal value 2585 kg/m³, minimal 2474 kg/m³, i.e. the mean real density for all samples could be roughly specified as $\rho_{\rm real} = 2553$ kg/m³.

3.4 Open porosity

The open porosity $\epsilon_{\rm open}$ of each sample was calculated as follows:

$$\varepsilon_{\text{open}} = (M_{\text{air}} - M_{\text{dry}}) / (M_{\text{air}} - M_{\text{water}}). \tag{12}$$

3.5 Total porosity

Total porosity ϵ_{total} of the samples was calculated as:

$$\varepsilon_{\text{total}} = 1 - \rho_{\text{app}}/\rho_{\text{real}}.$$
 (13)

3.6 Thermal conductivity and thermal capacity

Thermal conductivity values (in $W/(m\cdot K)$) obtained experimentally were compared with theoretical prediction [52]

$$\lambda = 1.163 \sqrt{0.0196 + 0.22 \rho_{app}^2 - 0.14}.$$
 (14)

Thermal capacity of bulk concrete was measured, no additional calculation was used.

3.7 Compressive strength

Compressive strength σ_c was calculated automatically by QuantX 4 computer

program during each test and was checked according to the well-known equation

$$\sigma_{\rm c} = F/(L \times B),$$
 (15)

where F is a compressive load by fracture, N; L and B are length and breadth of the sample, respectively, m.

3.8 Flexural strength

Flexural strength σf was also calculated automatically by textXpert II computer program and results were checked by equation (15) for three-point flexural tests:

$$\sigma_{\rm f} = 3F_{\rm f} L_{\rm s}/(B \times H^2), \tag{16}$$

where F_f is a load at the middle of sample by fracture, N; L_s is a support span, m; B, H are breadth and height of the sample, respectively, m.

3.9 Water absorption

Relative mass of water absorbed by the foam concrete (%) was calculated as the ratio

$$WA = (M_{\text{wet}} - M_{\text{paraf}}) \times 100 / M_{\text{dry}}. \quad (17)$$

The fraction of open porosity filled with the water was determined as

$$\epsilon_{wet}/\epsilon_{open} = WA \times \rho_{app} \times 100/(\epsilon_{open} \times \rho_{water}),~(18)$$

where ρ_{water} is water density, kg/m³.

4 Results and discussion

4.1 Results of experimental investigations of Outer properties of the foam concrete

4.1.1 Apparent density

Apparent density values of the samples calculated by Eq. (10) (geometrical method) and from the open porosity by Eq. (11) are presented in Table 4 (samples 1–16); values determined only by first method are listed in Table 5 (samples 17–28). Relative error of apparent density was calculated by

$$\begin{split} & \operatorname{Err} \rho_{\operatorname{app}} = \\ = & (\rho_{\operatorname{app.por}} - \rho_{\operatorname{app.geo}}) \times 100 / \rho_{\operatorname{app.por}}. \end{split} \tag{19}$$

The derivation between each pair values of densities measured by different methods in most cases was not higher than 4.14 %. Apparent density values were taken as a base values due to higher precision of measurements.

Mean value of apparent density (for each set of samples produced by identical conditions) was calculated either as an arithmetic mean from $\rho_{app.por}$ (samples 1–10, 14–16) or from $\rho_{app.por}$ (samples 11–13, 17–28) values.

It is important to mention, that the samples were prepared by following sets (letters A-J are assigned to them in Tables 1 and 2) and therefore have very similar properties within one group, hence, the properties of each sample could be attributed to the whole set.

Table 4 — Apparent density of the samples (samples 1–16)

Sample number	Apparent density $\rho_{app.geo}$ (geometrical method), Eq. (11), kg/m^3	Apparent density* ρ _{app.por} (open porosity method), Eq. (11), kg/m ³	Relative error of apparent density Err ρ_{app} , %	Mean value of apparent density ρ_{app} , kg/m^3	Name of the set
1	1427.9	1483.4	3.74		
2	1339.1	1357.3	1.34	1420.4	A
3	1362.1	1401.5	2.81		
4	605.6	ND	ND		
5	593.3	637.5	6.94	634.5	В
6	621.9	631.5	1.52		
7	1554.2	1600.6	2.90	1502.0	C
8	1538.9	1565.4	1.69	1583.0	С
9	569.8	ND	ND	572 O	D
10	576.3	599.4	3.86	573.0	D
11	833.4	ND	ND		
12	821.5	857.0	4.14	827.4	E
13	831.2	ND	ND		
14	852.8	ND	ND		
15	840.7	870.5	3.43	877.2	F
16	856.1	883.9	3.14		

*ND – the density was not measured by open porosity method

Table 5 — Apparent density of the samples (samples 17–28)

Sample number	Apparent density ρ _{app.geo} (geometrical method), Eq. (11), kg/m ³	Mean value of apparent density ρ_{app} , kg/m^3	Name of the set
17	501.7	депоту рарр, кд/ п	
18	487.4	494.6	G
19	485.7		
20	636.3		
21	636.7	636.5	Н
22	638.0		
23	1376.4		
24	1370.9	1373.6	I
25	1390.2		
26	932.1		
27	922.3	927.2	J
28	932.7		

4.1.2 Real density

Results of real density measurements are presented in Table 6.

All the values are in the narrow range of $2474~{\rm kg/m^3}$ (min.) and $2585~{\rm kg/m^3}$ (max) with mean value $2553~{\rm kg/m^3}$ (the estimations of standard deviation values are shown in Table 6). Hence, as expected, the real density of the bulk concrete weakly depends on the type of cement used for samples preparation as well as on the porosity of foam concrete.

 ${\bf Table~6} \longrightarrow {\bf Real~density~of~the~foam~concrete}$

samples

Real den-	Standard	Mean value of	
$sity \ \ \rho_{real},$	deviation	real density	
$\mathrm{kg/m}^3$	of real	ρ_{real} ± 3StD	
	density	$\mathrm{kg/m}^3$	
	StD,		
	$\mathrm{kg/m}^3$		
2566.6	1.8	2565.9±9.0	
2565.2	4.4	2505.9±9.0	
2563.3	4.2	2562 010 0	
2562.5	2.1	2562.9±9.0	
2581.5	4.3	2505 210 0	
2589.1	2.0	2585.3±9.0	
2581.7	1.4	0501 019 0	
2582.0	1.5	2581.9±3.9	
2551.6	3.4	0551 910 0	
2550.9	3.4	2551.3±9.0	
2568.2	2.2	9505 CL4 9	
2567.0	1.2	2567.6±4.8	
2472.7	3.1	0.470.010.6	
2475.0	4.0	2473.9±9.6	
2514.2	3.5	05140100	
2514.2	3.2	2514.2 ± 9.0	
2559.9	2.6	0550 410 3	
2558.9	2.0	2559.4±6.3	
2569.2	2.0	0500 0145	
2568.5	1.4	2568.9±4.5	
	sity ρ_{real} , kg/m ³ $\begin{array}{c} 2566.6 \\ 2565.2 \\ 2563.3 \\ 2562.5 \\ 2581.5 \\ 2589.1 \\ 2581.7 \\ 2582.0 \\ 2551.6 \\ 2550.9 \\ 2568.2 \\ 2567.0 \\ 2472.7 \\ 2475.0 \\ 2514.2 \\ 2559.9 \\ 2558.9 \\ 2569.2 \\ \end{array}$	$\begin{array}{c} \mathrm{sity} \ \rho_{\mathrm{real}}, \\ \mathrm{kg/m}^3 & \mathrm{of} \mathrm{real} \\ \mathrm{density} \\ \mathrm{StD}, \\ \mathrm{kg/m}^3 \\ \\ 2566.6 & 1.8 \\ \\ 2565.2 & 4.4 \\ \\ 2563.3 & 4.2 \\ \\ 2562.5 & 2.1 \\ \\ 2581.5 & 4.3 \\ \\ 2589.1 & 2.0 \\ \\ 2581.7 & 1.4 \\ \\ 2582.0 & 1.5 \\ \\ 2581.6 & 3.4 \\ \\ 2550.9 & 3.4 \\ \\ 2550.9 & 3.4 \\ \\ 2568.2 & 2.2 \\ \\ 2567.0 & 1.2 \\ \\ 2472.7 & 3.1 \\ \\ 2475.0 & 4.0 \\ \\ 2514.2 & 3.5 \\ \\ 2514.2 & 3.5 \\ \\ 2559.9 & 2.6 \\ \\ 2559.9 & 2.0 \\ \\ 2569.2 & 2.0 \\ \\ \end{array}$	

4.1.3 Thermal conductivity and thermal capacity

Comparison of measured thermal conductivity (λ_{exp}) with calculated by Eq. (14) (λ_{theor}) and standard values according to Russian State Standard (GOST 25485-89) $(\lambda_{GOST},$ two points at apparent density 2400

and 2500 kg/m³ belong to the bulk concrete according to Russian Rules for Building SNiP 23-02) are shown in Figure 5. Evidently in general thermal conductivity values of foam concrete produced by VJA comply with requirements of GOST 25485-89 and for several cases are even a bit smaller. Hence, foam concrete produced by means of VJA fully meets thermal insulation demands.

It is also clear that Eq. (14) overestimates both standard and measured results and should be corrected for further use.

Thermal capacity of eight samples with all the range of densities have been measured, showing quite close values (955±47 J/kg K).

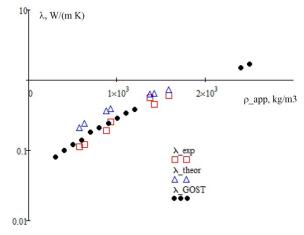


Figure 5 — Thermal conductivity of the foam concrete samples

4.1.4 Compressive and flexural strengths

The results of compressive and flexural tests are presented on Figures 6–8. Except several samples with duration of hardening exactly within 28 days all the other were matured within 3 months. As can be seen from the plots, there are a few visible differences between long term and short term matured samples. The durability of cement has an effect on the resulting strength parameters. Nonetheless, analyzing Figures 6 and 7 one can postulate that all obtained results belong to the same quite narrow 'corridor' of data.

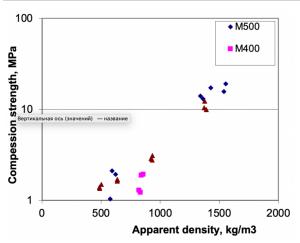


Figure 6 — Compressive strength of the foam concrete samples made with different cement types

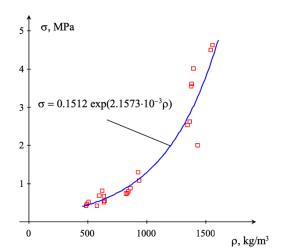


Figure 7 — Flexural strength of the foam concrete samples made with different cements

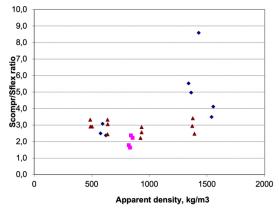


Figure 8 — Compressive to flexural strengths ratio of the foam concrete samples with different cements (the points are the same like on Fig. 6 and 7)

Concerning compressive to flexural strengths ratio of the foam concrete samples (Figure 8) one can conclude that the

overwhelming majority of points lying in the range between 2.0 and 5.5, at that for each set of samples there are results very close to 3.0 in average obtained (samples hardened within 28 days). For the samples made from less durable cement CEM I 32,5N this ratio is close to 2.0 in average.

4.1.5 Water absorption

As mentioned afore, two sets of tests were performed: 1) the same samples (number 1, 2, 7, 15) have been used as for open porosity experiments before water absorption experiments, i.e. their structure could have been damaged; 2) the new samples (number 18, 20, 24, 27) have been used for open porosity experiments. The results for sample 15 were put together with second set to let easier comparison with sample 27 having similar density but tested for water absorption without being preloaded. Figures 9 and 10 represent results of the tests for samples 1, 2, 7 and 15, 18, 20, 24, 27 respectively.

The influence of density on the maximal values of relative mass of water absorbed by the foam concrete (diamond points and line 1) and the fraction of open porosity filled with the water (square points and line 2) for samples 15, 18, 20, 24, 27 is depicted on Figure 11.

The approximation of relative water mass absorbed by samples $\max(WA)$ according to Eq. (17) and $\max(\epsilon_{wet}/\epsilon_{open})$ as a functions of apparent density were approximated by least-squares method by following functions (see also Fig. 11):

$$\max(\mathrm{WA}) = 1789 \rho_{\mathrm{app}}^{-0.689}, \, \mathrm{R}^2 = 0.919; \quad (20)$$

$$\max(\epsilon_{\text{wet}}/\epsilon_{\text{open}}) = 1.7854 + 0.0249\rho_{\text{app}},$$
 (21)
 $R^2 = 0.9545.$

The first line (Eq. (20)) shows that the amount of the absorbed water is lower for heavier samples of foam concrete, the reason is that the own weight of the dry concrete is higher for them. But the second line

(Eq. (21)) reveals that the open porosity of the foam concrete is better 'used' (impregnated) by water namely for heavier samples, this could be attributed to the smaller sizes of the pores for the foam concrete with higher apparent density.

The analysis of absorption kinetics allows to conclude that samples number 18, 20 and 27 have been saturated within first 24-48 hours. These three samples having densities 487, 636 and 922 kg/m³ respectively are the lightest among second set. In the sample 27 (1371 kg/m³) the steady state is not reached even within 96 hours (see Fig. 10 a). This effect could be attributed to three following reasons: 1) more developed capillary microstructure in the samples with higher density, where the bubbles do not interrupt the flow in the capillary channels; 2) higher capacity of micro porous space in high density samples; 3) in the samples with lower density the diffusion of water is hindered due to lesser volume of solid body having small capillaries whereas porous structure has sizes of pores close to 1–2 mm which possess with very low capillary pressure.

According to our vision it seems that the bubbles are surrounded by the bulk concrete structure having micro pores which are impregnated with the water, i.e. the pores with gas bubbles inside are isolated one from the other, and their ability to absorb water is limited by the dissolution of air in the water (Fig. 12). The pressure in these pores is growing during impregnation process, slowly increasing the dissolution process. We have excluded samples 1, 2 and 7 from the final analysis, because they have densities in the range of 1350-1600 kg/m³, which are rarely used in light concretes. Besides, the structure of these samples could have been partly demolished during previous test at vacuum impregnation (see discussion in the next paragraph.

It is interesting to observe that the behaviour of the absorption kinetics for samples

27 having similar densities (870.5 kg/m³ and 922.3 kg/m³ respectively) looks quite identical (Figure 10 a), though there are some deviations at the first stages of impregnation (Figure 10 b): in the logarithmic coordinates the rate of impregnation for sample 15 is lower than that for sample 27. This latter effect could be attributed to some rupture of structure of sample 15 during previous tests. It seems very apparent that at saturation in vacuum some part of the material could have crumbled inside of the spherical pores of the foam concrete. This assumption is corroborated by the observed crumbling of light samples of foam concrete by sawing and open porosity test exposed previously by vacuum impregnation during total porosity measurements.

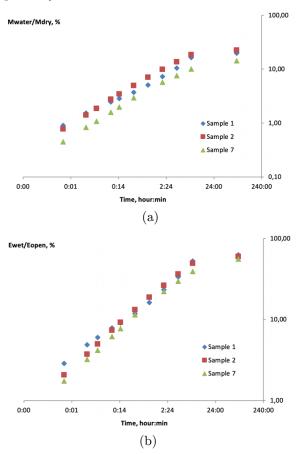
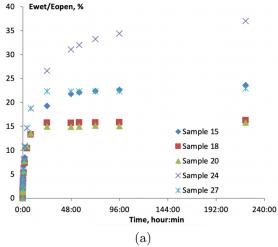


Figure 9 —Relative mass of water absorbed by the foam concrete (a) and the fraction of open porosity filled with the water (b) for samples 1, 2 and 7



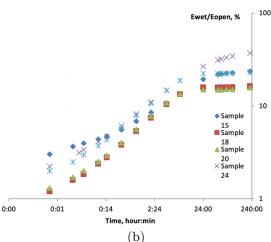


Figure 10 — The fraction of open porosity filled with the water in natural (a) and logarithmic (b) coordinates for samples 15, 18, 20, 24 and 27

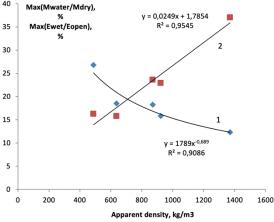


Figure 11 — The influence of density on the maximal values of relative mass of water absorbed by the foam concrete (blue diamonds and line 1) and the fraction of open porosity filled with the water (red squares and line 2) for samples 15, 18, 20, 24 and 27

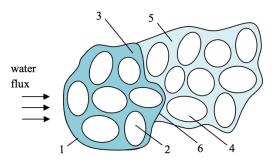


Figure 12 — Proposed mechanism of large pores isolation during water absorption tests.

1 — foam concrete body with capillary-porous walls; 2 — pores blocked around with the water;

3 — walls of concrete saturated with water;

4 — interconnected pores; 5 — walls of concrete in the dry or partly wetted part of the sample;

6 — front of impregnation

4.2 Results of experimental investigations of Inner properties of the foam concrete

4.2.1 Open, total and closed porosity

Results of open and total porosity measurements are presented in Table 7. Each set of samples has been tested at least once for total porosity and all the range of apparent densities was covered for open porosity. It is clear from the Table 7 and Figure 13 that values of open and total porosities are very close one to the other (within experimental error). Hence, the closed porosity as a difference between total and open porosity

$$\varepsilon_{\text{closed}} = \varepsilon_{\text{total}} - \varepsilon_{\text{open}}$$
(22)

is negligible compared to total porosity and could not be defined with high accuracy by the methods used in this work.

Approximation of total porosity data by least-squares method gave the coefficients of Eq. (13) with determination coefficient ${\bf R}^2=0.9978$

$$\varepsilon_{\text{total}} = 1 - 0.0004 \ \rho_{\text{app}}, \tag{13a}$$

where coefficient 0.0004 is very close to the value found by mean value of real density:

$$1/\rho_{\rm real} = 0.395 \times 10^{-3} \; {
m m}^3/{
m kg}.$$

Table 7 — Open porosity of the foam concrete samples

CICIC Sa.	iipics			
Sam- ple	Name	Appar- ent den-	Open poros-	Total poros-
num-	of the	sity $\rho_{app,}$	ity	ity $\varepsilon_{\text{to-}}$
ber	set	$\mathrm{kg/m}^3$	$\epsilon_{ m open}$	tal
1		1483.4	0.448	0.422
2	A	1357.3	0.501	0.470
3		1401.5	0.479	ND
5	D	637.5	0.743	0.753
6	В	631.5	0.765	ND
7	C	1600.6	0.399	ND
8	С	1565.4	0.413	0.394
10	D	599.4	0.780	ND
11	П	833.4	ND	0.673
12	E	857.0	0.679	ND
15	T)	870.5	0.673	0.661
16	F	883.9	0.668	ND
19	G	485.7	ND	0.804
22	Н	638.0	ND	0.746
25	I	1390.2	ND	0.457
28	J	932.7	ND	0.637

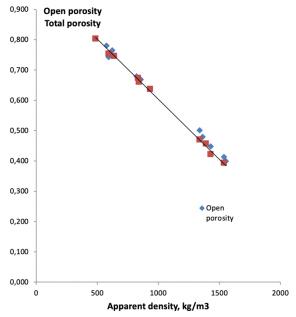


Figure 13 — Open porosity and total porosity as functions of the apparent density

This is not surprising, just confirms very small scattering of the results obtained for total porosity. Some difference between total and open porosity (the highest values of relative error 5.0–6.5% were obtained for samples 1, 2 and 8 with quite high density having

therefore smallest absolute values of total porosity, for the other samples relative error was not larger than 1.8%) is attributed to the experimental procedure used in this work.

Properties of foam concrete produced by use of VJA fully meet the requirements of Russian and French standards.

5 Conclusions and outlook

A new method of foam concrete production by use of vortex jet apparatus (VJA) is described and studied. Foam produced by means of VJA is very stable and possess ability to save its properties during mixing with cement and sand. VJA is a compact device allowing to generate foam without any blowing machine, sucking the air from the ambience resulting from vacuum in the center of vortex flow, hence decreasing the both capital and operational costs of the plant. It was found that foam concrete production with wide range of densities (from approx. 480 till 1640 kg/m³) is possible by use of VJA.

Main properties of foam concrete produced in this work: real and apparent densities, open and total porosities, thermal conductivity and thermal capacity, water absorption, compressive and flexural strengths have been measured; their values fully meet the requirements of Russian and French standards. Therefore, the VJA could be used as an effective tool for foam generation and foam concrete production.

Equations characterizing relative mass of water absorbed by the foam concrete were found as functions of apparent density.

The equations describing the total porosity (13a), maximal water absorption (20) and the fraction of open porosity filled with the water (21) are found; they have high coincidence with experimental data.

An idea to connect 'outer' properties of the foam concrete with its 'inner' properties as well as with controlled process parameters is described. A mechanism of large pores isolation during water absorption tests was proposed.

Deeper discussions of relation between Controlled parameters, Properties of the foam, Inner properties of the foam concrete and Outer properties of the foam concrete will be performed in our next work (which is now under preparation). It is intended to build up correlations between inner and outer properties of the foam concrete in the next study.

Acknowledgements

The author acknowledges Ecole des Mines d'Alès (since 2017 — IMT Mines Alès), especially Prof. Eric Garcia-Diaz and his team for the supporting of his scientific stage as invited professor in the autumn 2016. The authors are thankful to Mr. V.V. Kozlov (St.Petersburg State Institute of Technology) for preparation of samples, to Mr. Christian Buisson (IMT Mines Alès) for his invaluable help during experimental tests of foam concrete samples.

This study was carried out as part of a state assignment of the Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (topic no. AAAA-A19-119022290091-8).

REFERENCES

- [1]. Hebel: The History of AAC at the Wayback Machine (archived November 4, 2010) (https://web.archive.org/web/20101104001651/http://www.hebel.co.nz/about/hebel%20history.php)
- [2]. Amran Y. H. M., Farzadnia N., Ali A.A.A., Properties and applications of foamed concrete: a review. *Construction and Building Materials*, 2015, 101, pp. 990–1005.
- [3]. Tikalsky P. J., Pospisil J., Mac-Donald W. A method for assessment of the freeze-thaw resistance of preformed foam

- cellular concrete, Cement and Concrete Research, 2004, no. 34(5), pp. 889–893.
- [4]. Jones M. R., McCarthy A. Behaviour and Assessment of Foamed Concrete for Construction Applications, Thomas Telford, London, UK, 2005.
- [5]. Aldridge D., Introduction to foamed concrete: what, why, how?, in: R.K. Dhir, M.D. Newlands, A. McCarthy (Eds.), Use of Foamed Concrete in Construction, Thomas Telford, London, 2005, pp. 1–14.
- [6]. Aldridge D., Ansell T., Foamed concrete: production and equipment design, properties, applications and potential. Proceedings of One Day Seminar on Foamed Concrete: Properties, Applications and Latest Technological Developments, Loughborough University, 2001, pp. 1–7.
- [7]. Nambiar E. K., Ramamurthy K., Influence of filler type on the properties of foam concrete, *Cem. Concr. Compos*, 2006, no. 28 (5), pp. 475–480.
- [8]. Jones M. R., McCarthy A. Heat of hydration in foamed concrete: effect of mix constituents and plastic density. *Cement and Concrete Research*, 2006, no. 36(6), pp. 1032–1041.
- [9]. Beningfield N., Gaimster R., Griffin P. Investigation into the air void characteristics of foamed concrete. Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5–7 July 2005. Cement combinations for durable concrete, vol. 6(1), Thomas Telford Services Ltd, London, 2005, p. 51.
- [10]. Mindess S. (Ed.), Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete, Wood head Publishing and Maney Publishing, Institute of Materials, Minerals & Mining CRC press Boca Raton Boston New York Washington, DC, Elsevier, 2014.
- [11]. ASTM, Standard Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed

- Foam for Cellular Concrete, ASTM C869-91, Q. C138, Philadelphia, 1991.
- [12]. ASTM, Standard test method for foaming agents for use in producing cellular concrete using preformed foam, in: ASTM C796-97; Standard Test Method for Unit Weight. Yield, and Air Content (Gravimetric) of concrete, ASTM C138, Q. C138, Philadelphia, 1997.
- [13]. Coda F. M., Gruenwald E., Mathey R. G., Richards O., Crist R. A., Hansen W. C., Legatski L. A., Guide for cellular concrete above 50 pcf and for aggregate concretes above 50 pcf with compressive strengths less than 2500 psi, *ACI J. Proc.*, 1993.
- [14]. Panesar D. K., Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. *Constr. Build. Mater*, 2015, no. 44(1), pp. 575–584.
- [15]. ACI Committee 523, Guide for cellular concrete above 50 pcf and for aggregate concretes above 50 pcf with compressive strengths less than 2500 psi, *ACI J. Proc.*, 1975, 72 (2).
- [16]. Valore R. C. Jr. Cellular concretes. Part 2. Physical properties, ACI J. Proc., 1954, 50 (6).
- [17]. Taylor W. H. Concrete Technology and Practice, American Elsevier Co. Inc., NY, 1965. p. 185.
- [18]. Valore R. C. Jr. Cellular concretes. Part 1. Composition and methods of preparation, *ACI J. Proc.*, 1954, 50 (5).
- [19]. Nambiar E. K., Ramamurthy K. Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cem. Concr. Compos.*, 2006, no. 28 (5), pp. 475–480.
- [20]. Nehdi M., Khan A., Lo K.Y. Development of deformable protective system for underground infrastructure using cellular grouts, *ACI Mater.*, 2002, J. 99(5).
- [21]. Wee T. H., Babu D. S., Tamilselvan T., Lim H. S. Air-void system of

- foamed concrete and its effect on mechanical properties, ACI Mater., 2006, J. 103(1).
- [22]. Welker C. D., Welker M. A., Welker M. F., Justman M. A., Hendricksen R. S., Foamed Concrete Compositional Process, Hamburg, NY (US), Patent, No. 6153005, 2000 (November).
- [23]. Nambiar E. K., Ramamurthy K., Fresh state characteristics of foam concrete. *J. Mater. Civ. Eng.*, 2008, no. 20 (2), pp. 111–117.
- [24]. Karl S., Woerner J. D. Foamed Concrete-mixing and Workability, *Rilem Proceedings*, Chapman and Hall, 1994, p. 217.
- [25]. Nambiar E. K., Ramamurthy K. Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology, *Cem. Concr. Compos.*, 2006, vol. 28, iss. 9, pp. 752–760.
- [26]. Valore R. C. Jr. Insulating concretes, *ACI J. Proc.*, 1956, vol. 53, iss. 11.
- [27]. Kearsley E. P. The use of foamcrete for affordable development in third world countries. *Concrete in the Service of Mankind: Appropriate Concrete Technology*, 2006, vol. 3, p. 232.
- [28]. Kearsley E. P., Visagie M., Microproperties of Foamed Concrete. *Specialist Techniques and Materials for Construction*, *Thomas Telford*, London, 1999, pp. 173–184.
- [29]. British Cement Association, Foamed Concrete; Composition and Properties, Report Ref. 46.042, BCA, Slough, 1994.
- [30]. Agarwal S. K., Masood I., Malhotra S. K., Compatibility of superplasticizers with different cements. *Constr. Build. Mater.*, 2000, vol. 14, iss. 5, pp. 253–259.
- [31]. Zingg A., Winnefeld F., Holzer L., Pakusch J., Becker S., Figi R., Gauckler L. Interaction of polycarboxylate-based superplasticizers with cements containing different C 3 A amounts. *Cem. Concr. Compos.*, 2009, vol. 31, iss. 3, pp. 153–162.

- [32]. Jezequel P. H., Mathonier B. Foamed Concrete, Lafarge, Washington, DC (US), Patent no. WO2011101386 A1, 2014 (August).
- [33]. Bing C., Zhen W., Ning L. Experimental research on properties of high strength foamed concrete. *J. Mater. Civ. Eng.*, 2011, vol. 24, iss. 1, pp. 113–118.
- [34]. Akil H., Omar M. F., Mazuki A. A. M., Safiee S. Z. A. M., Ishak Z. A. M., Bakar A. A., Kenaf fiber reinforced composites: a review. *Mater. Des.*, 2011, vol. 32, iss. 8, pp. 4107–4121.
- [35]. Yap S. P., Bu C. H., Alengaram U. J., Mo K. H., Jumaat M. Z. Flexural toughness characteristics of steel–polypropylene hybrid fibre-reinforced oil palm shell concrete. *Mater. Des.*, 2014, vol. 57, pp. 652–659.
- [36]. Awang H., Ahmad M. H. Durability properties of foamed concrete with fiber inclusion. *Int. J. Civ. Archit. Struct. Constr. Eng.*, 2014, vol. 8, iss. 3.
- [37]. Zollo R. F., Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cem. Concr. Compos.*, 1997, vol. 19, iss. 2, pp. 107–122.
- [38]. Ollo R. F., Hays C. D., Engineering material properties of a fiber reinforced cellular concrete (FRCC), *ACI Mater. J.*, 1998, vol. 95, iss. 5.
- [39]. Brady K. C., Jones M. R., Watts G. R.. Specification for foamed concrete, Application guide AG39, TRL Limited, 2001.
- [40]. Kearsley E. P., Wainwright P. J. The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, 2001, vol. 31, iss. 1, pp. 105–112.
- [41]. Pugh R.J. Foaming, foam films, antifoaming and defoaming. Adv. Colloid Interface Sci., 1996, vol. 64, pp. 67–142.

- [42]. Short A., Kinniburgh W. Lightweight Concrete, 3rd edition, Applied Science Publishers Ltd., London, 1978, pp. 1–14.
- [43]. Abiev R. Sh. Vortex Scrubber. Patent RU 2261139, 2005.
- [44]. Abiev R. Sh. Vortex jet apparatus and methods for operation (options). Patent RU 2262008, 2005.
- [45]. Abiev R. Sh. Device for foam generation. Patent RU 2297260, 2007.
- [46]. Abiev R. Sh., Beregova E. M., Shuvalov A. Ye., Investigation of vortex jet apparatus as a foam generator. *Problems of Technosphere Risk Management*, 2009, № 4(12), pp. 46-56 (In Russ.)
- [47]. Abiev R. Sh., Shuvalov A. Ye., Sasova Ya. V. Investigation of the vortex jet apparatus. Abstracts. Of Intern. Conf. «Mat. Methods in Engineering and Technology», V. 5, Yaroslavl, YAGTU, 2007, p. 122. (In Russ.)
- [48]. Abiev R. Sh., Gavrilova O. V. The study of emulsification in the pulsating-vortex apparatus. Intern. Scientific Conf. «Theoretic. basis of the creation, optimization. and control energy and resource efficient processes and equipment», 3–5 oct. 2007, V. 1, Ivanovo: ISUCT, pp. 6–8. (In Russ.)
- [49]. Abiev R. Sh., Nekrasov V. A., Panova D. D. Application of Vortex jet apparatus as a foam generator for foam concrete production. *Transactions of SPSIT*, 2012, 14, p. 67-70. (In Russ.)
- [50]. Vasilev M. P., Abiev R. Sh. Dispersion of carbon nanotubes clusters in pulsating and vortex in-line apparatuses. *Chem. Eng. Sci.*, 2017, no. 171, p. 204–217, DOI: 10.1016/j.ces.2017.05.036
- [51]. Drenckhan W., Saint-Jalmes A. The science of foaming. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2015, no. 222, pp. 228–259.

Исследование свойств пенобетона, полученного с использованием пеногенератора нового типа — вихревого струйного аппарата

Р. Ш. Абиев*,**,1

- * 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

Исследован новый метод получения пенобетона с использованием вихревого струйного аппарата (ВСА). Пена, полученная при помощи ВСА, отличается высокой стабильностью и узким распределением диаметров пузырьков, который хорошо коррелирует с диаметрами пор пенобетона. ВСА - компактное устройство, позволяющее производить пену без компрессора, засасывая воздух из атмосфер благодаря разрежению, создаваемому в центре вихревого потока. Благодаря дополнительным возможностям (по сравнению, например, с обычным осевым эжектором), таким как способность всасывать воздух, более длительное время пребывания и более высокая кинетическая энергия, преобразуемая далее в диспергирование пузырьков, новое устройство позволяет контролировать параметры пены и плотность пенобетона, что позволяет генерировать пену с меньшим диаметром пузырьков и более высокой стабильностью. Предложен механизм изоляции крупных пор при испытаниях на водопоглощение. Были измерены основные свойства пенобетона, полученного в данном исследовании: реальная и кажущаяся плотности, открытая и полная пористость, теплопроводность и теплоемкость, водопоглощение, прочность на сжатие и изгиб; их значения полностью соответствуют требованиям российских и французских стандартов. Основная часть пор отнесена к открытой пористости из-за очень близких значений общей и открытой пористости. Уравнения, характеризующие относительную массу воды, поглощаемой пенобетон и доля открытой пористости, заполненной водой, находились как функции кажущейся плотности. Установлено, что производство пенобетона с широким спектром плотности (примерно от 480 до 1640 кг/м3) легко достигается с помощью ВСА. Следовательно, ВСА может быть использован как эффективный инструмент для генерирования пены и производства пенобетона.

Ключевые слова

Пенобетон, генерирование пены, стабильность пены, прочность пенобетона, теплопроводность, водопоглощение, открытая пористость, пористая структура

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии силикатов им. Гребенщикова РАН при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (тема № АААА-А19-119022290091-8)

¹ Для переписки Email: abiev.rufat@qmail.com

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).

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:

Исследование свойств пенобетона, полученного с использованием пеногенератора нового типа – вихревого струйного аппарата / Р. Ш. Абиев // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. \mathbb{N} 1(8). С. 69 – 93.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-69-93.

Please cite this article as:

Abiev R. Sh. Fabrication of foam concrete by use of novel foam generator — vortex jet apparatus: study of foam concrete properties. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 1(8), pp. 69-93.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-69-93

УДК 351.86

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-94-111

Оптимизация электротехнических средств для электроснабжения потребителей

В. А. Седнев^{*}, А. В. Смуров^{*,1}

* Академия государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Москва, Россия

Аннотация

В статье предложен научно-методический подход оценки устойчивости и оптимальности построения структуры электротехнических средств (ЭТС), обеспечивающих электроснабжение потребителей в условиях чрезвычайных ситуаций.

Предложенная методика может быть использована для разработки рекомендаций по оптимизации структур ЭТС, а результаты ее могут быть положены в основу прогнозирования потребностей в ЭТС для обеспечения электроэнергетической безопасности территорий страны.

Ключевые слова

Оптимизация, электротехнические средства, потребители электрической энергии, устойчивость структуры, чрезвычайные ситуации.

Введение

Учитывая, что для электроснабжения объектов жизнеобеспечения и населения в чрезвычайных ситуациях могут использоваться различные автономные источники электроэнергии (ИЭЭ), в основе их выбора лежит сравнение технико-экономических показателей, которые можно разделить на два класса: показатели, характеризующие свойства внешней среды, с которой связаны основные элементы электроэнергетических систем (ЭЭС) (характеризующие режим электропотребления: число часов использования максимальной нагрузки и др.), и показатели используемых энергоресурсов; также показатели,

отражающие свойства ИЭЭ как элементов ЭЭС, которые целесообразно разделить на показатели, определяющие внешние связи ИЭЭ (с другими системами), и определяющие преимущественно их внутренние связи (между ИЭЭ в пределах ЭЭС).

Показатели первой группы формируют состав ограничений по оптимизации структуры электростанций (ЭС) ЭЭС, а, с другой стороны, влияют на приведенные затраты; показатели второй группы определяют приведенные затраты — показатель эффективности управления. При этом для ЭЭС характерны: множественность целей, сложность связей, иерархичность, вероятностный характер поведения,

¹ Для переписки Email: smur 36@bk.ru

непрерывность развития, вследствие чего управление ими существенно усложнилось. Поэтому требуется разработка более совершенных методов технико-экономической оптимизации структуры ИЭЭ, как одного из условий управления развитием региональных систем электроэнергетики.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения

Для решения этой задачи предлагается использовать техноценологический подход [1-4], модели Н-распределения которого позволяют исследовать движение видов электротехнических средств (ЭТС) и их численности. Для проверки соответствия случайной выборки — генеральной совокупности установленных ЭТС применим метод А. Н. Колмогорова [3], где сравнение производится не по статистическому среднему, а по функциям распределения сравниваемых выборок. Устойчивость видового распределения описывается моделью Н-распределения, имеющей два основных параметра: размер системы R и характеристический показатель а [1, 3]. Исследование динамики Н-распределения представляет собой [3, 5] качественное описание закономерностей процессов сменяемости численности каждого вида с учетом изменения соотношения между количеством видов ЭТС и их численностью. Динамика *H*-распределения в целом (I рода) формализуется моделированием параметров Н-распределения во времени и переходом к поверхности. Суть модели состоит в том, что имеющийся ряд экстраполируется вперед и собирается сложением для формирования прогноза. Причем форма кривой *Н*-распределения не изменяется, а может лишь колебаться в пределах границы коэффициента видового разнообразия ЭТС а.

Если требуется определить конкретные виды ЭТС и их численность, может быть осуществлен переход к структурно-

топологической динамике (СТД) [3-8], когда исследуются траектории движения точки по плоскости каждой Н-распределения. Синтез видовой структуры состоит из прогноза численности видов ЭТС и построения видового распределения по прогнозным значениям. Устойчивость структуры ЭТС определяется устойчивостью значений характеристического показателя, а устойчивость композиций функций распределения групп ЭТС выражается в сохранении формы негауссовых распределений.

Результаты

Методика обоснования видового состава ЭТС проверялась на статистическом материале. Исследование осуществляется [2, 9-12] в следующем порядке: в качестве объекта выделяется МЧС России, который, одновременно, является сообществом слабосвязанных и слабовзаимодействующих элементов; из него выделяется семейство объектов — в нашем случае под объектами понимаются подразделения МЧС России, сосредоточенные на территории Центрального федерального вводится понятие вида, в данном случае вид — наименование ЭТС и элементов электротехнических изделий; производится ранжирование строятся математические модели (таблица 1): распределение ранговое видовое ЭТС по распределение убыванию исследуемого параметра; И видовое распределение — распределение видов по повторяемости; проводится обработка результатов и определяются параметры моделирующих функций. Для математического описания рассмотрим ранговое видовое Н-распределение (рисунок 1) в координатах: ранг (номер по порядку при расположении ЭТС в порядке уменьшения численности их групп) — количество ЭТС в виде (таблица 2). Для этого необходимо проранжировать виды

ЭТС по численности, т.е. вид, количество наименований ЭТС в котором максимально, получает ранг r=1, r=2 получит вид, имеющий максимальную численность ЭТС из остальных, и т.д. Ранговое видовое H-распределение может быть преобразовано в видовое. Совокупности видов, каждый из которых представлен равным количеством ЭТС, образуют касты.

Видовое распределение — распределение ЭТС одинаковой численности по группам видов (таблица 3). Рассмотрим видовое распределение в координатах: численность ЭТС одного вида — число видов с такой численностью (рисунок 2). Устойчивость структуры проявляется

изменениями Н-распределения в пределах характеристического показателя $0.5 < \alpha < 2$. Кривая Н-распределения характеризуется тем, что 40-60~% видов ЭТС уникально, и 60-40~% общего количества наименований является часто встречающимися.

Данный подход также рассмотрен на примере Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2020 года (Генсхема), которая содержит перечень типов энергоблоков (таблица 4, рисунок 3), планируемых к строительству. В качестве объекта выделена Генсхема; семейство элементарных объектов — типы энергоблоков; вид — паровые конденсационные турбины (таблица 5, рисунок 4).

Таблица 1 — Виды Н-распределений

Распределе-	Ось абсцисс	Ось ординат	Форма записи
ние	ось аосцисс	Ось ординат	<i>H</i> -распределения
Видовое	Численность группы ЭТС или изделий одного вида. Дискретно.	Количество видов в группе (количество видов с одинаковым количеством ЭТС и изделий). Дискретно.	$W_i{=}A/{X_i}^{(1+\alpha)}$
Ранговое видовое	Ранг (первый ранг имеет вид ЭТС или изделий с максимальной численностью). Дискретно.	Количество ЭТС и изделий в виде (типы). Дискретно.	$\Omega({ m r}) = { m B}/{ m r}^{eta},$ В и $eta { m >} 0$ — константы рангового видового распределения



Рисунок 1 - Ранговое видовое Н-распределение ЭТС и изделий

Таблица 2 — Данные для построения рангового видового распределения ЭТС и изделий

		Количе-
Ранг	Наименование ЭТС и изделий	СТВО
		в виде
1	Фонарь электрический индивидуальный	154
2	Бензопила с набором цепей	22
3	Фонарь электрический групповой с зарядным устройством	12
4	Электродрель	12
5	Электроперфоратор	12
6	Углошлифовальная машина	12
7	Электропила дисковая	12
8	Электропила цепная	12
9	Бензорез	12
10	Переносная электростанция (ЭС) осветительная бензиновая или ди-	5
10	зельная на 2 кВт	υ
11	Аварийно-спасательный инструмент гидродинамического действия	5
12	Комплект пневматического аварийно-спасательного инструмента	5
13	Аппарат электросварочный	5
14	Автогенорезательная установка	5
15	Мотопомпа	5
16	Переносная электростанция осветительная бензиновая или дизельная на 4 кВт	4
17	Передвижная электростанция силовая на 30-60 кВт	4
18	Мобильный осветительный комплекс типа МОК-ЧС	4
19	Гидроимпульсный инструмент для разрушения скальных пород и ж/бетонных конструкций	4
20	Аварийно-спасательный комплект для работ в колодцах	4
21	Электроножницы	4
22	Комплект газосварочного оборудования	4
23	Заточной станок для цепей бензопил	4
24	Мотоперфоратор	4
	Подъемное устройство электрическое типа «Таль» 3-5 т или ле-	
25	бедка электрическая 5-10 т	4
26	Комплект аварийно-спасательных средств	4

Таблица 3 — Распределение ЭТС одинаковой численности по видам (по данным таблицы 2)

<u>инцы 2)</u>		
Числен- ность группы ЭТС или изделий одного вида	Количе- ство видов в группе	Наименование ЭТС и изделий
4	11	Электростанция осветительная на 4 кВт; передвижная силовая ЭС на 30–60 кВт; мобильный осветительный комплекс МОК-ЧС; гидро-импульсный инструмент; аварийно-спасательный комплект; электроножницы; комплект газосварочного оборудования; заточной станок; мотоперфоратор; подъемное устройство «Таль» 3-5 т или лебедка электрическая 5-10 т; комплект аварийно-спасательных средств
5	6	осветительная ЭС на 2 кВт; аварийно-спасательный инструмент гидродинамического действия; комплект пневматического аварийно-спасательного инструмента; аппарат электросварочный; автогенорезательная установка; мотопомпа
12	7	фонарь электрический групповой; электродрель; электроперфоратор; углошлифовальная машина; электропила дисковая; электропила цепная; бензорез
22	1	бензопила
154	1	фонарь электрический индивидуальный

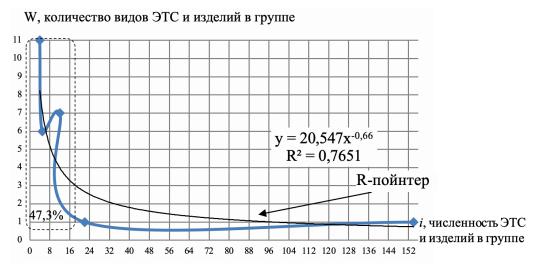


Рисунок 2 — Видовое Н-распределение ЭТС

Таблица 4 — Ранговое видовое распределение энергоблоков, планируемых к строи-

тель	U	1	ı		Γ
Ранг	Наименование турбины	Кол-во турбин в виде	Ранг	Наименование турбины	Кол-во турбин в виде
1	Газовая турбина 270 МВт	96	34	Паровая теплофикационная тур- бина 35 МВт	4
2	Паровая конденсационная турбина 130 МВт	55	35	Гидравлическая турбина 333 МВт	4
3	Паровая конденсационная турбина 660 МВт	36	36	Гидравлическая турбина 325 МВт	4
4	Паровая конденсационная турбина 330 МВт	35	37	Гидравлическая турбина 210 MBт	4
5	Газовая турбина 160 МВт	34	38	Паровая конденсационная турбина 800 МВт (ССКП)	3
6	Паровая теплофикационная турбина 24 МВт	24	39	Паровая теплофикационная тур- бина 60 МВт	3
7	Паровая турбина для атомных станций 1200 МВт	23	40	Паровая теплофикационная тур- бина 25 МВт	3
8	Газовая турбина 110 МВт	22	41	Газовая турбина 150 МВт	3
9	Газовая турбина 77 МВт	22	42	Гидравлическая турбина 155 МВт	3
10	Паровая конденсационная турбина 300 МВт	17	43	Гидравлическая турбина 107 МВт	3
11	Гидравлическая турбина 200 МВт	13	44	Паровая конденсационная турбина 800 МВт	2
12	Паровая теплофикационная турбина 160 МВт	12	45	Паровая конденсационная турбина 600 МВт (ССКП)	2
13	Паровая теплофикационная турбина 53 МВт	11	46	Паровая конденсационная турбина 110 МВт	2
14	Паровая теплофикационная турбина 180 МВт	11	47	Паровая конденсационная турбина 60 МВт	2
15	Газовая турбина 65 МВт	11	48	Паровая теплофикационная тур- бина 300 МВт	2
16	Паровая конденсационная турбина 225 МВт	9	49	Паровая теплофикационная тур- бина 105 МВт	2
17	Паровая теплофикационная турбина 110 МВт	9	50	Паровая теплофикационная тур- бина 40 MBт	2
18	Паровая конденсационная турбина 900 МВт (ССКП)	8	51	Газовая турбина 45 МВт	2
19	Газовая турбина 75 МВт	8	52	Гидравлическая турбина 215 MBт	2
20	Газовая турбина 70 МВт	8	53	Гидравлическая турбина 170 МВт	2
21	Гидравлическая турбина 195 МВт	8	54	Гидравлическая турбина 165 МВт	2
22	Гидравлическая турбина 1000 МВт	8	55	Гидравлическая турбина 150 MBт	2
23	Паровая теплофикационная турбина 130 МВт	7	56	Гидравлическая турбина 110 MBт	2
24	Паровая теплофикационная турбина 100 МВт	7	57	Паровая конденсационная турбина 215 МВт	1
25	Паровая турбина для атомных станций 300 МВт	6	58	Паровая конденсационная турбина 210 МВт	1
26	Гидравлическая турбина 220 МВт	6	59	Паровая конденсационная турбина 160 МВт	1
27	Паровая теплофикационная турбина 208 МВт	5	60	Паровая конденсационная турбина 100 МВт	1
28	Паровая теплофикационная турбина 185 МВт	5	61	Паровая конденсационная турбина 53 МВт	1
29	Газовая турбина 200 МВт	5	62	Паровая теплофикационная тур- бина 250 МВт	1
30	Гидравлическая турбина 300 МВт	5	63	Паровая теплофикационная тур- бина 65 МВт	1
31	Гидравлическая турбина 100 МВт	5	64	Газовая турбина 265 МВт	1
32	Паровая конденсационная турбина 75 МВт	4	65	Паровая турбина для атомных стан- ций 1000 МВт	1
33	Паровая теплофикационная турбина 80 МВт	4	66	Паровая турбина для атомных станций 800 МВт	1

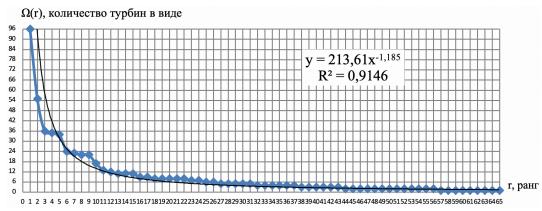
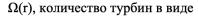


Рисунок 3 — Ранговое видовое Н-распределение типов энергоблоков

Таблица 5 — Данные для построения рангового видового распределения паровых конденсационных турбин (ПКТ)

Ранг	Наименование	Кол-во турбин	Ранг	Наименование турбин	Кол-во тур-
	турбин	в виде			бин в виде
1	ПКТ 130 МВт	55	10	ПКТ 600 МВт (ССКП)	2
2	ПКТ 660 МВт	36	11	ПКТ 110 МВт	2
3	ПКТ 330 МВт	35	12	ПКТ 60 МВт	2
4	ПКТ 300 МВт	17	13	ПКТ 215 МВт	1
5	ПКТ 225 МВт	9	14	ПКТ 210 МВт	1
6	ПКТ 900 МВт (ССКП)	8	15	ПКТ 160 МВт	1
7	ПКТ 75 МВт	4	16	ПКТ 100 МВт	1
8	ПКТ 800 МВт (ССКП)	3	17	ПКТ 53 МВт	1
9	ПКТ 800 МВт	2			



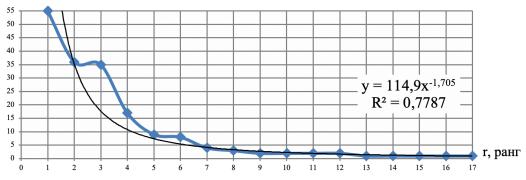


Рисунок 4 — Ранговое видовое Н-распределение ПКТ

В каждой системе существует одна редкая группа, где каждый вид представлен одним ЭТС, и часто встречающиеся группы ЭТС, каждое из которых содержит по одному виду, численность которых велика. Существует на *H*-распределении

пойнтер-точка R — такое значение аргумента X=R, при которой значение функции H-распределения строго равно 1. Ранговое видовое распределение преобразовано в видовое (таблица 6, рисунок 5). Как видно, Γ енсхема предполагает

использование 66 типов турбин, из них 46 — для тепловых станций; газовых турбин мощностью 65 МВт и более предусмотрено 10 типов, хотя ведущие производители (Siemens, General Electric, и др.) имеют лишь 3–4 типа.

Таблица 6 — Распределение ПКТ одинаковой численности по видам

Чис- лен- ность турбин в группе	Коли- чество видов ПКТ в группе	Наименование ПКТ
1	5	ПКТ 215 МВт; ПКТ 210 МВт; ПКТ 160 МВт; ПКТ 100 МВт; ПКТ 53 МВт
0	4	ПКТ 800 МВт; ПКТ 600 МВт (ССКП); ПКТ 110
3	1	MBτ; ΠΚΤ 60 MBτ
4	1	ПКТ 800 МВт (ССКП) ПКТ 75 Вт
8	1	· -
9	1	ПКТ 900 МВт (ССКП) ПКТ 225 Вт
17	1	ПКТ 300 Вт
35	1	ПКТ 330 Вт
36	1	ПКТ 660 Вт
55	1	ПКТ 130 Вт

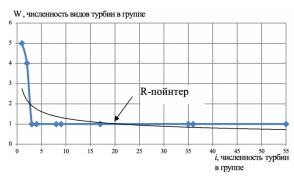


Рисунок 5 — Видовое H-распределение ПКТ

Заключение

Высокое разнообразие означает значительный уровень затрат на всех стадиях жизненного цикла энергоблока, при том, что типовые проекты позволяют осуществлять серийное производство оборудования и увеличивать надежность систем электроснабжения. Таким образом, методика

может быть использована для разработки рекомендаций по оптимизации структур электротехнических средств (ЭТС), а результаты ее могут быть положены в основу прогнозирования потребностей в ЭТС для обеспечения электроэнергетической безопасности территорий страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Седнев В. А. Вопросы теории и практики использования техноценологических моделей. *Ценологические исследования*. №28. Материалы двух конференций. Москва, 2005, с. 488–492.
- [2]. Седнев В. А. Техноценологические методы построения и управления развитием многоуровневых систем. Монография. М.: Академия ГПС МЧС России, 2008, 132 с.
- [3]. Кудрин Б. И., Седнев В. А. Техноценологическая теория и ее применение для решения проблем безопасного и устойчивого развития сельских территорий и населения. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 2015, № 4, с. 72–92.
- [4]. Седнев В. А., Смуров А. В. Теоретические основы оценки устойчивости электроэнергетического обеспечения субъектов Российской Федерации. Обеспечение безопасности эжизнедеятельности населения и защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Материалы научно-практической конференции. Москва, 2018, с. 181–190.
- [5]. Седнев В. А., Смуров А. В. Методика оценки устойчивости электроэнергетического обеспечения субъектов Российской Федерации. Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация, 2015, № 1, с. 61–68.
- [6]. Седнев В. А., Смуров А. В. Методы и особенности обоснования мероприятий по обеспечению электроэнергетической безопасности субъектов Российской Федерации.

 Современные

технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Воронежский Институт ГПС МЧС России, 2017, № 1-1(8), с. 184–186.

- [7]. Седнев В. А. Оценка устойчивости и пути повышения эффективности электроэнергетического обеспечения электротехнических комплексов. Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму, 2015, № 11–12, с. 126–132.
- [8]. Седнев В. А. Методика оценки и оптимизации структуры видового состава электротехнических средств системы электроснабжения. Промышленная энергетика. 2016, № 7, с. 38–46.
- [9]. Седнев В. А., Смуров А. В. Предложения по повышению эффективности работ по электроснабжению объектов. Материалы научно-практической

- конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны. М.: Академия ГПС МЧС России. 2017, с. 130–137.
- [10]. Седнев В. А. О развитии и формализации методологии расчета электрических нагрузок и прогнозирования параметров электропотребления объектов в национальном стандарте. *Промышленная энергетика*, № 5, 2017, с. 51–54.
- [11]. Седнев В. А. Основы прогнозирования устойчивости функционирования субъекта Российской Федерации в военное время. *Технологии техносферной безопасности*, 2017, № 5(75), с. 77–86.
- [12]. Седнев В. А., Седнев А. В. Научно-методический подход оценки структуры экономики региона (страны) и обоснования путей повышения ее устойчивости и эффективности развития. Проблемы управления рисками в техно-сфере, 2018, № 4(48), с. 109–114.

Седнев Владимир Анатольевич — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры гражданской обороны, защиты населения и территорий, Академия государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Российская Федерация, 129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4).

Смуров Артем Владимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры гражданской обороны, защиты населения и территорий, Академия государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Российская Федерация, 129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4).

Optimization of electrical equipment for power supply to consumers

V. A. Sednev*, A. V. Smurov*,1

* Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Relief, Moscow, Russia

Abstract

A scientific and methodological approach is proposed for assessing the stability and optimality of constructing the structure of electrical equipment that provides power supply to consumers in emergency situations. The methodology can be used to develop recommendations for optimizing the electrical equipment structures, and its results can be used as the basis for forecasting the needs for electrical equipment to ensure the electric power security of the country's territories.

Keywords

Optimization, electrical equipment, consumers of electrical energy, stability of the structure, emergency situations

Introduction

Given that various autonomous sources of electricity (IEE) can be used to supply lifesupport facilities and the population in emergency situations, their choice is based on a comparison of technical and economic indicators, which can be divided into two classes: indicators characterizing the properties the external environment with which the main elements of electric power systems (EPS) are connected (characterizing the mode of power consumption: the number of hours of using the maximum load, etc.), and indicators of the energy resources used; as well as indicators that reflect the properties of the IEE as elements of the EES, which it is advisable to divide into indicators that determine the external relations of the IEE (with other systems) and determine mainly their internal relations (between the IEE within the EES).

Data and methods for solving problems, accepted assumptions

To solve this problem, it is proposed to use a technocenological approach [1,4], whose

The indicators of the first group form the composition of the restrictions on optimizing the structure of power plants (ES) of the EPS, and, on the other hand, affect the reduced costs; indicators of the second group determine the reduced costs - an indicator of management efficiency. At the same time, EES is characterized by: a plurality of goals, complexity of relationships, hierarchy, probabilistic nature of behavior, continuity of development, as a result of which their management has become much more complicated. Therefore, it is required to develop more advanced methods of technical and economic optimization of the IEE structure as one of the conditions for managing the development of regional power industry systems.

¹ Corresponding author Email: smur 36@bk.ru

H-distribution models allow us to study the movement of types of electrical equipment (ETS) and their numbers. To check the compliance of a random sample - the general population of established ETS, we apply the method of A. N. Kolmogorov [3], where the comparison is made not by the statistical average, but by the distribution functions of the compared samples. The stability of the species distribution is described by the H-distribution model, which has two main parameters: the size of the system R and the characteristic index α [1,3]. The study of the dynamics of H-distribution is [3,5] a qualitative description of the regularities of the processes of the turnover of the abundance of each species, taking into account the change in the ratio between the number of ETS species and their abundance. The dynamics of the H-distribution as a whole (of the first kind) is formalized by modeling the parameters of the H-distribution in time and passing to the surface. The essence of the model is that the existing series is extrapolated forward and collected by addition to form a forecast. Moreover, the shape of the H-distribution curve does not change, but can only fluctuate within the boundaries of the ETS species diversity coefficient.

If it is required to determine specific types of ETS and their number, a transition to structural-topological dynamics (STD) [3-8 can be carried out, when the trajectories of movement of each point along the H-distribution plane are studied. The synthesis of the species structure consists of forecasting the number of ETS species and constructing the species distribution according to the predicted values. The stability of the ETS structure is determined by the stability of the values of the characteristic index, and the stability of the compositions of the distribution functions of the ETS groups is expressed in the preservation of the form of non-Gaussian distributions.

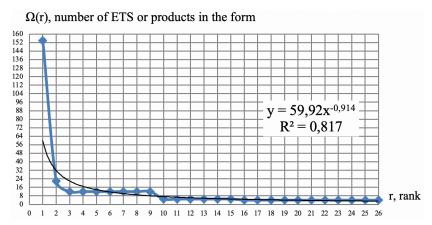
Results

The methodology for substantiating the species composition of the ETS was tested on statistical material. The study is carried out [2,9-12] in the following order: as an object, the regional center of the Ministry of Emergency Situations of Russia is singled out, which, at the same time, is a community of weakly connected and weakly interacting elements; a family of objects is distinguished from it, - in our case, objects are understood as subdivisions of the regional center (RC); the concept of type is introduced, in this case, type is the name of the ETS and elements of electrical products; ranking is performed and mathematical models are built (Table 1): rank species distribution — distribution of ETS in descending order of the parameter under study; and species distribution, — distribution of species by frequency; the results are processed and the parameters of the modeling functions are determined. For a mathematical description, let us consider the rank species H-distribution (Fig. 1) in the following coordinates: rank (number in order when the ETS are located in decreasing order of the number of their groups) — the number of ETS in the form (Table 2). To do this, it is necessary to rank the types of ETS by number, i.e. the species with the maximum number of ETS names gets the rank r=1, r=2will get the species with the maximum number of ETS from the rest, and so on. The rank specific H-distribution can be converted to a specific one. Sets of species, each of which is represented by an equal number of ETS, form castes.

This approach is also considered on the example of the General Scheme for locating electric power facilities until 2020 (General Scheme), which contains a list of types of power units (Table 4, Fig. 3) planned for construction. The Genscheme was singled out as an object; family of elementary objects -

types of power units; view - steam condensing turbines (Table 5, Fig. 4).

Distribution	Here is the abscissa	Here is the ordinate	Entry form
			H-distributions
Species	The number of ETS group or products of the same type. Discretely.	The number of species in the group (the number of species with the same number of ETS and products). Discretely.	$W_i \!\!=\!\! A/X_i^{(1+\alpha)}$
Ranked	Rank (the first rank has the form	The number of ETS and prod-	$\Omega({ m r})={ m B}/{ m r}^{eta},$
specific	of ETS or products with the	ucts in the form (types).	B and $\beta>0$ are the constants of
	maximum number). Discretely.	Discretely.	the rank species distribution



 ${\bf Figure~1-} {\bf Rank~specific~H-} {\bf distribution~of~ETS~and~products}$

Table 2 — Data for constructing the rank species distribution of ETS and products

Rank	Name of electrical equipment and products	Quantity as	
1	Individual electric lantern	154	
2	Chainsaw with chain set	22	
3	Group electric lantern with charger	12	
4	Electric drill	12	
5	Electric perforator	12	
6	Angle grinder	12	
7	Circular saw	12	
8	Chain saw	12	
9	Petrol cutter	12	
10	Portable power plant lighting gasoline or diesel 2 kW	5	
11	Rescue tool of hydrodynamic action	5	
12	Pneumatic Rescue Tool Kit	5	
13	Electric welding machine	5	
14	Autogenetic cutting plant	5	
15	Motor pump	5	
16	Portable power station lighting gasoline or diesel 4 kW	4	
17	Mobile power plant for 30-60 kW	4	
18	Mobile lighting complex type MOK-CHS	4	
19	Hydraulic impulse tool for destruction of rocks and reinforced concrete structures	4	
20	Well rescue kit	4	
21	Electric scissors	4	
22	Set of gas welding equipment	4	
23	Chainsaw chain sharpener 4		
24	Motor perforator	4	

25	Lifting device electric type "Tal" 3-5 t or electric winch 5-10 t	4
26	Rescue Kit	4

Table 3 — Distribution of ETS of the same number by species (according to Table 2)

The number of ETS group or products of the same type	Quantity species in a group	Name of ETS and products
4	11	Lighting power plant for 4 kW; mobile power ES for 30-60 kW; mobile lighting complex MOK-YC; hydropulse tool; rescue kit; electric scissors; set of gas welding equipment; grinding machine; motor puncher; lifting device "Tal" 3-5 t or electric winch 5-10 t; rescue kit
5	6	lighting ES for 2 kW; rescue tool of hydrodynamic action; a set of pneumatic rescue tools; electric welding machine; autogenerating plant; motor pump
12	7	group electric lamp; electric drill; electric perforator; angle grinder; circular electric saw; chain saw; petrol cutter
22	1	chainsaw
154	1	individual electric lamp

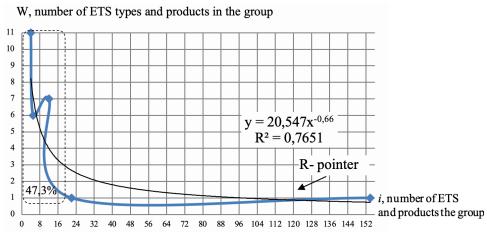


Figure 2 — Species H-distribution of ETS

Table 4 — Rank specific distribution of power units planned for construction

Rank	Turbine name	Quan-	Rank	Turbine name	Quan-
		tity			tity
		tur-			tur-
		bines			bines
		in the			in the
		form			form
1	Gas turbine 270 MW	96	34	Steam cogeneration turbine 35 MW	4
2	Steam condensing turbine 130 MW	55	35	Hydraulic turbine 333 MW	4
3	Steam condensing turbine 660 MW	36	36	Hydraulic turbine 325 MW	4
4	Steam condensing turbine 330 MW	35	37	Hydraulic turbine 210 MW	4
5	Gas turbine 160 MW	34	38	Steam condensing turbine 800 MW (SSKP)	3
6	Steam cogeneration turbine 24 MW	24	39	Steam cogeneration turbine 60 MW	3
7	Steam turbine for nuclear power plants 1200 MW	23	40	Steam cogeneration turbine 25 MW	3
8	Gas turbine 110 MW	22	41	Gas turbine 150 MW	3
9	Gas turbine 77 MW	22	42	Hydraulic turbine 155 MW	3
10	Steam condensing turbine 300 MW	17	43	Hydraulic turbine 107 MW	3
11	Hydraulic turbine 200 MW	13	44	Steam condensing turbine 800 MW	2
12	Steam cogeneration turbine 160 MW	12	45	Steam condensing turbine 600 MW (SSKP)	2
13	Steam cogeneration turbine 53 MW	11	46	Steam condensing turbine 110 MW	2
14	Steam cogeneration turbine 180 MW	11	47	Steam condensing turbine 60 MW	2
15	Gas turbine 65 MW	11	48	Steam cogeneration turbine 300 MW	2
16	Steam condensing turbine 225 MW	9	49	Steam cogeneration turbine 105 MW	2
17	Steam cogeneration turbine 110 MW	9	50	Steam cogeneration turbine 40 MW	2
18	Steam condensing turbine 900 MW (SSKP)	8	51	Gas turbine 45 MW	2
19	Gas turbine 75 MW	8	52	Hydraulic turbine 215 MW	2
20	Gas turbine 70 MW	8	53	Hydraulic turbine 170 MW	2
21	Hydraulic turbine 195 MW	8	54	Hydraulic turbine 165 MW	2
22	Hydraulic turbine 1000 MW	8	55	Hydraulic turbine 150 MW	2
23	Steam cogeneration turbine 130 MW	7	56	Hydraulic turbine 110 MW	2
24	Steam cogeneration turbine 100 MW	7	57	Steam condensing turbine 215 MW	1
25	Steam turbine for nuclear power plants 300 MW	6	58	Steam condensing turbine 210 MW	1
26	Hydraulic turbine 220 MW	6	59	Steam condensing turbine 160 MW	1
27	Steam cogeneration turbine 208 MW	5	60	Steam condensing turbine 100 MW	1
28	Steam cogeneration turbine 185 MW	5	61	Steam condensing turbine 53 MW	1
29	Gas turbine 200 MW	5	62	Steam cogeneration turbine 250 MW	1
30	Hydraulic turbine 300 MW	5	63	Steam cogeneration turbine 65 MW	1
31	Hydraulic turbine 100 MW	5	64	Gas turbine 265 MW	1
32	Steam condensing turbine 75 MW	4	65	Steam turbine for nuclear power plants 1000 MW	1
33	Steam cogeneration turbine 80 MW	4	66	Steam turbine for nuclear power plants 800 MW	1

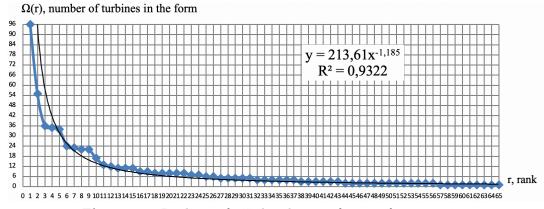


Figure 3 — Rank specific H-distribution of types of power units

Table 5 — Data for constructing the rank species distribution of steam condensing turbines (SCT)

Rank	Name of turbines	Number of turbines	Rank	Name of turbines	Number of tur-
		in the form			bines in the form
				PKT 600 MW	
1	PKT 130 MW	55	10	(SSKP)	2
2	PKT 660 MW	36	11	PKT 110 MW	2
3	PKT 330 MW	35	12	PKT 60 MW	2
4	PKT 300 MW	17	13	PKT 215 MW	1
5	PKT 225 MW	9	14	PKT 210 MW	1
6	PKT 900 MW	8	15	PKT 160 MW	1
7	PKT 75 MW	4	16	PKT 100 MW	1
	PKT 800 MW				
8	(SSKP)	3	17	PKT 53 MW	1
9	PKT 800 MW	2			

$\Omega(r)$, number of turbines in the form

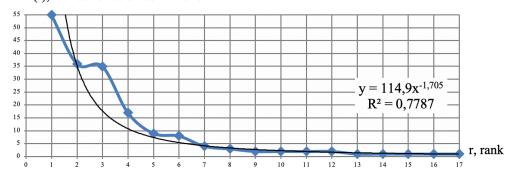


Figure 4 — Rank species H-distribution of PKT

Table 6 — Distribution of FKT of the same number by species

Table 6 Distribution of Fix of the same number by species					
Number of	The number of				
turbines in the	types of PKT in	Name of PKT			
group	the group				
1	5	PKT 215 MW PKT 210 MW; PKT 160 MW; PKT 100 MW; PKT			
1	5	53 MW			
		PKT 800 MW; PKT 600 MW (SSKP); PKT 110 MW; PKT 60			
2	4	MW			
3	1	PKT 800 MW (SSKP)			
4	1	PKT 75 MW			
8	1	PKT 900 MW (SSKP)			
9	1	PKT 225 MW			
17	1	PKT 300 MW			
35	1	PKT 330 MW			
36	1	PKT 660 MW			
55	1	PKT 130 MW			

In each system, there is one rare group, where each species is represented by one ETS, and frequent groups of ETS, each of

which contains one species, the abundance of which is large. There is a pointer-point R on the H-distribution — such a value of the

argument X=R, at which the value of the H-distribution function is strictly equal to 1. The rank species distribution is transformed into a species distribution (Table 6, Fig. 5). As can be seen, the General Scheme assumes the use of 66 types of turbines, of which 46 are for thermal power plants; There are 10 types of gas turbines with a capacity of 65 MW and more, although the leading manufacturers (Siemens, General Electric, etc.) have only 3–4 types.

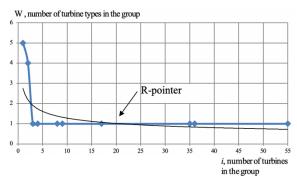


Figure 5 — Species H-distribution of PKT

Summary. High diversity means a significant level of costs at all stages of the life cycle of a power unit, while standard designs allow serial production of equipment and increase the reliability of power supply systems. Thus, the methodology can be used to develop recommendations for optimizing the ETS structures, and its results can be used as the basis for forecast-ing the needs for ETS to ensure the electric power security of the country's territories.

REFERENCES

- [1]. Sednev V. A. Voprosy teorii i praktiki ispol'zovaniya tekhnotsenologicheskikh modeley [Issues of theory and practice of using technocenological models]. Tsenologicheskiye issledovaniya [Cenological research]. No. 28. Materials of two conferences. Moscow, 2005, pp. 488–492. (In Russ.)
- [2]. Sednev V. A. Tekhnotsenologicheskiye metody postroyeniya i upravleniya razvitiyem mnogo-urovnevykh sistem.

- Monografiya [Technocenological methods of building and managing the development of multi-level systems. Monograph]. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia Publ., 2008, 132 p. (In Russ.)
- [3]. Kudrin B. I., Sednev V. A. Tekhnotsenologicheskaya teoriya i yeye primeneniye dlya resheniya problem bezopasnogo i ustoychivogo razvitiya sel'skikh territoriy i naseleniya [Technocenological theory and its application for solving the problems of safe and sustainable development of rural areas and population]. Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy [Problems of safety and emergency situations], 2015, no. 4, pp. 72–92. (In Russ.)
- Sednev V. A., Smurov A. V. Te-[4].oreticheskiye osnovy otsenki ustovchivosti elektroenergeticheskogo obespecheniya sub"yektov Rossiyskov Federatsii. [Theoretical foundations for assessing the stability of the electric power supply of the constituent entities of the Russian Federation. Obespecheniyebezopasnostizhiznedeyatel'nosti naseleniya i zashchita naseleniya i territoriy ot chrezvychaynykh situatsiy. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii Ensuring the safety of the population and protecting the population and territories from emergencies. Materials of the scientific-pracconference], Moscow, 2018, ticalpp. 181–190. (In Russ.)
- [5]. Sednev V. A., Smurov A. V. Metodika otsenki ustoychivosti elektroenergeticheskogo obespecheniya sub"yektov Rossiyskoy Federatsii [Methodology for assessing the stability of the electric power supply of the constituent entities of the Russian Federation]. Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya [Fires and emergencies: prevention, liquidation], 2015, no. 1, pp. 61–68. (In Russ.)
- [6]. Sednev V. A., Smurov A. V. Metody i osobennosti obosnovaniya

meropriyatiy po obespecheniyu elektroenergeticheskoy bezopasnosti sub"yektov Rossiyskoy Federatsii [Methods and features of the substantiation of measures to ensure the electric power safety of the constituent entities of the Russian Federation]. Sovremennyye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoy oborony i likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy. Voronezhskiy Institut GPS MCHS Rossii [Modern technologies for civil defense and emergency response. Voronezh Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia], 2017, no. 1-1(8), pp. 184–186. (In Russ.)

- [7]. Sednev V. A. Otsenka ustoychivosti i puti povysheniya effektivnosti elektroenergeticheskogo obespecheniya elektrotekhnicheskikh kompleksov [Assessment of sustainability and ways to improve the efficiency of electric power supply of electrical complexes]. Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskiye sredstva protivodeystviya terrorizmu [Questions of defense technology. Series 16: Technical means of countering terrorism], 2015, no. 11–12, pp 126–132. (In Russ.)
- [8]. Sednev V. A. Metodika otsenki i optimizatsii struktury vidovogo sostava elektrotekhnicheskikh sredstv sistemy elektrosnabzheniya [Methodology for assessing and optimizing the structure of the species composition of electrical equipment of the power supply system]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy], 2016, no. 7, pp. 38–46. (In Russ.)
- [9]. Sednev V. A., Smurov A. V. Predlozheniya po povysheniyu effektivnosti rabot po elektrosnabzheniyu ob"yektov [Proposals to improve the efficiency of work on the power supply of facilities]. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy Vsemirnomu dnyu grazhdanskoy oborony [Materials of the scientific-practical conference dedicated to the World Civil Defense Day]. Moscow, Academy

- of GPS EMERCOM of Russia, 2017, pp. 130-137. (In Russ.)
- [10]. Sednev V. A. O razvitii i formalizatsii metodologii rascheta elektricheskikh nagruzok i prognozirovaniya parametrov elektropotrebleniya ob"yektov v natsional'nom standarte [On the development and formalization of the methodology for calculating electrical loads and predicting the parameters of power consumption of objects in the national standard]. *Promyshlennaya energetika [Industrial energy]*, 2017, no. 5, pp. 51–54. (In Russ.)
- [11]. Sednev V. A. Osnovy prognozirovaniya ustoychivosti funktsionirovaniya sub"yekta Rossiyskoy Federatsii v voyennoye vremya [Fundamentals of predicting the stability of the functioning of the subject of the Russian Federation in wartime]. Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti [Technologies of technosphere safety], 2017, no. 5(75), pp. 77–86. (In Russ.)
- [12]. Sednev V. A., Sednev A. V. Nauchno-metodicheskiy podkhod otsenki struktury ekonomiki regiona (strany) i obosnovaniya putey povysheniya yeye ustoychivosti i effektivnosti razvitiya [Scientific and methodological approach to assessing the structure of the economy of a region (country) and substantiating ways to increase its sustainability and development efficiency]. Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere [Problems of risk management in thetechnosphere], 2018, no. 4(48), pp. 109–114. (In Russ.)

Sednev V. A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Civil Defense, Population and Territory Protection, Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Liquidation consequences of natural disasters (Boris Galushkin st., 4, Moscow, 129366, Russian Federation).

Smurov A. V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Assoc. Professor of the Department of Civil Defense, Protection of the Population and Territories, Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Liquidation consequences of natural disasters (Boris Galushkin st., 4, Moscow, 129366, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Оптимизация электротехнических средств для электроснабжения потребителей / В. А. Седнев, А. В. Смуров // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 1(8). С. 94 – 111.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-94-111.

Please cite this article as:

Sednev V. A., Smurov A. V. Optimization of electrical equipment for power supply to consumers. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 1(8), pp. 94 – 111.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-94-111

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Том 3 Выпуск 1(8)

Март 2023

Выходит 4 раза в год

Формат 60×84 1/8. Усл. печ. л. 13,02. 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»