

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 2(9)
Июль 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. — № 2(9). — 95 с.: ил. — ISSN 2713-0789.

Главный редактор

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

Заместители главного редактора:

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

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

Ответственный ученый секретарь

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

Заведующий редакцией

Елена Сергеевна 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 «ФПП 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), В. В. Чугунков (МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 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

- В. С. Лесовик, М. Ю. Елистраткин, А. С. Сальникова, Е. В. Фомина
Композиционное вяжущее с энергосберегающим сырьем для высокопрочного бетона 7

Химические технологии, науки о материалах

- Д. А. Макаренков, В. И. Назаров, С. Л. Лобастов, С. Ю. Салькин, Г. Р. Афлятунова,
В. А. Бухрякова
Особенности технологии получения полиакриламидных функциональных гидрогелей на
основе люминесцентных наполнителей 18
- А. В. Шалунов, Р. Н. Голых, В. Н. Хмелёв, В. А. Нестеров, А. С. Боченков
Развитие модели дискретной фазы для расчёта ультразвуковой коагуляции взвешенных
частиц в экартовских течениях 33
- Ю. С. Шустов, Ж. С. Пушкина
Исследование свойств текстильных материалов для защиты от термического
воздействия электрической дуги 43
- М. Г. Беренгартен, А. С. Пушнов
Совершенствование насадочных контактных устройств массообменных аппаратов 51
- Ю. М. Атрощенко, И. В. Блохин, К. И. Кобраков, Д. Н. Кузнецов, В. С. Селезнёв,
Н. Ю. Совостьянов
К вопросу о синтетическом потенциале 2,4,6-тригидрокситолуола — некоторые
особенности строения ацильных производных 68

Теоретическая и прикладная теплотехника

- В. И. Быков, С. И. Ильина, Л. В. Равичев
Получение электрической энергии из промышленных сточных вод при помощи
обратного электролиза 79
- С. В. Федосов, В. Н. Федосеев, И. А. Зайцева, В. А. Воронов
Обзор и анализ свойств экологически чистых фреонов — рабочих жидкостей в
воздушном тепловом насосе 86

КОЛОНКА РЕДАКЦИИ

Уважаемые коллеги!

Журнал заявлен как мультидисциплинарный. Вышедшие девять номеров журнала, в том числе два специальных выпуска по материалам Всероссийской научной конференции с международным участием «XVI Роговинские чтения», подтверждают его мультидисциплинарность.

Все опубликованные материалы объединены тем, что они направлены на достижение оптимальных технологических, энергоресурсоэффективных, экологических показателей промышленных процессов и технологий различных отраслей. Особое внимание уделяется химическим технологиям в области переработки синтетических полимеров и биополимеров в волокна, пленки, композиционные и наноматериалы, химической технологии отделки текстильных материалов.

Публикации представили учёные и инженеры-практики, неравнодушные к идее и проблемам концепции устойчивого развития общества.

Сегодня, как никогда, необходима консолидация членов научного и инженерного сообщества, направленная на технологическую независимость России, на импортоопережение, чему способствует работа журнала.

В опубликованных материалах рассматриваются результаты исследований в области экологической безопасности производственных процессов и оборудования, принципы и механизмы системного экологического мониторинга, моделирование экологических систем и процессов и т. д.

Значительное количество статей посвящено изучению явлений переноса энергии и массы в технологических аппаратах, методам изучения и создания энергоресурсоэффективных процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях

промышленности, обеспечивающих минимизацию отходов, газовых выбросов и сточных вод, моделированию различных технологических процессов и аппаратов, методам интенсификации процессов и т. д.

Представленные в вышедших номерах журнала статьи включают исследования по теплофизическим свойствам веществ, термодинамическим процессам, по совершенствованию промышленных теплоэнергетических систем, разработке и созданию нового и инновационного теплотехнического и теплового технологического оборудования. Уделяется внимание возобновляемой энергетике и нетрадиционным видам топлив.

В специальных выпусках по материалам Всероссийской научной конференции с международным участием «XVI Роговинские чтения» представлены статьи по технологиям химических волокон, методам их модифицирования, новым природоподобным технологиям с применением биополимеров, посвященные волокнистым композиционным материалам, перспективам использования огнезащитных и термостойких материалов для изготовления спецодежды, антимикробного текстиля, проблемам и перспективам создания отечественного производства высоко- и сверхвысокопрочных армирующих материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, инновационным технологиям получения нановолокнистых нетканых материалов и их роли в защите от техногенных и биологических воздействий в интересах безопасности государства и т. д.

Всего в вышедших номерах журнала представлено более 70 статей более 130 авторов. Среди авторов журнала академики различных академий наук, более 30 докторов наук и профессоров, более 80 кандидатов наук и доцентов. Представлены

работы, выполненные по грантам РФФИ, РНФ и др.

Редколлегия журнала уделяет большое внимание участию в публикациях молодых учёных и специалистов.

Среди авторов статей представители России, Республики Беларусь, Узбекистана, Таджикистана, представляющие образовательные, научные и другие организации из Москвы, Минска, Ташкента, Санкт-Петербурга, Энгельса, Бийска, Тольятти, Саратова, Новополюцка, Иваново, Могилева, Твери, Балаково, Пятигорска, Воронежа, Витебска, Уфы, Душанбе и др.

Представлены работы от вузов, научно-исследовательских институтов и центров, промышленных объединений и предприятий.

Авторы статей представляют:

Российский Государственный Университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство);

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) СПбГТИ (ТУ);

Национальный исследовательский университет «МЭИ»;

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»;

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева;

Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий;

Витебский государственный технологический университет;

«Центр по ядерной и радиационной безопасности» МЧС Республики Беларусь;

Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности;

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

Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина;

НИИ Синтетического волокна с экспериментальным заводом, (АО «ВНИИСВ»);

ООО «Термопол»;

Институт системного программирования им. В. П. Иванникова Российской Академии Наук;

Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России;

Институт кристаллографии имени А. В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» Российской Академии Наук;

АО «СВОБОДА»;

Энгельсский технологический институт (филиал) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.;

Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова»;

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.;

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна;

Московский политехнический университет;

Завод «Полимир» ОАО «Нафтан»;

Балаковский инженерно-технологический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»;

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова;

Пятигорский медико-фармацевтический институт — филиал ФГБОУ ВО ВолгГМУ Минздрава России;

НПО «Тексильпрогресс»;

Ивановский государственный химико-технологический университет;

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» Воронежский государственный университет инженерных технологий;

ООО «Колетекс»;

Ивановский государственный политехнический университет;

Уфимский государственный нефтяной технический университет;

Общество с ограниченной ответственностью «ВР-Ресурс»;

НИЦ «Курчатовский институт» — ИРЕА и другие организации.

Руководство журнала выходит в ВАК с вопросом включения журнала в перечень ВАК по следующим специальностям:

1.5.15 Экология; 2.6.13 Процессы и аппараты химических технологий; 2.6.16 Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности; 2.4.6 Теоретическая и прикладная теплотехника; 2.6.11 Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов.

Редакционный Совет и редакционная коллегия журнала сформированы и

включают ведущих учёных и специалистов по всем заявленным специальностям.

В Редакционный Совет вошли 3 члена-корреспондента РАН, академик РААСН, член-корреспондент РААСН. В Редакционный Совет вошли Заместитель президента РАН и Вице-Президент Российского Союза Научных и Инженерных Общественных Объединений. Членом Редакционного Совета является Избранный Президент Всемирной Федерации Инженерных организаций (представитель Китая).

В состав Редакционной Коллегии, включающей 20 человек по всем заявляемым в ВАК специальностям, входит член Национальной Академии наук Республики Армения.

В состав Международной Редакционной Коллегии входят представители Республики Беларусь, Норвегии, Южной Африки, Вьетнама, Израиля, академик НАН Республики Таджикистан.

Редакционный совет и Редакционная Коллегия журнала выражают признательность всем авторам и организациям, которые поддержали журнал в период его становления, и уверены в дальнейшем сотрудничестве.

*доктор химических наук, профессор
профессор РГУ им. А. Н. Косыгина,
главный редактор журнала
«Промышленные процессы и технологии»*
Константин Иванович Кобраков

УДК 691.32

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-7-17

Композиционное вяжущее с энергосберегающим сырьем для высокопрочного бетона

В. С. Лесовик^{*,**}, М. Ю. Елистраткин^{*}, А. С. Сальникова^{*}, Е. В. Фомина^{*,**},¹

** Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия*

*** Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, Москва, Россия*

Аннотация

В данной работе с позиции научного направления геоники «геомиметики» рассматривается вопрос повышения эффективности высокопрочного самоуплотняющегося бетона за счет использования отходов строительных материалов в виде боя керамического кирпича, лома тяжелого бетона и газосиликата. Установлено, что применение отсева дробления бетонного лома в составе сырьевой смеси способствует повышению устойчивости бетона к расслоению и водоотделению при оптимальных реологических свойствах с улучшением физико-механических свойств композиционного вяжущего и мелкозернистого бетона на его основе. Возможна экономия до 30 % портландцемента в составе композиционного вяжущего при замене на техногенное сырье. Максимальный эффект самоуплотнения сырьевой смеси проявляется в достаточной степени при использовании боя керамического кирпича. Однако, в совокупности характеристик максимальной прочности и разломоспособности предпочтительным является использование тонкокомлового лома бетона. Исследования направлены на максимальное раскрытие ресурсного потенциала техногенного сырья в виде отсевов дробления фрагментов зданий и сооружений, образующихся в следствии реновации строительного комплекса страны, а также на освобожденных территориях ЛНР и ДНР.

Ключевые слова

Композиционное вяжущее, техногенное сырье, самоуплотняющаяся смесь, гиперпластификатор, бетон.

Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова, за счет гранта РНФ № 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> и Правительства Белгородской области, Соглашение №3 от 24.03.2022.

¹ Для переписки

Email: fomina.katerina@mail.ru

Введение

Современное строительство — это динамично развивающаяся отрасль, активно осваивающая новые материалы и технологии. В отличие от других отраслей промышленности, промышленность строительных материалов консервативна в использовании сырья. Уже несколько столетий производство портландцемента является достаточно энергозатратным, при этом потенциал данного вяжущего полностью не раскрыт. Это связано с тем, что в большинстве случаев в затвердевшем цементном камне остается существенная доля непрогидратированных клинкерных частиц.

Реализация теоретических положений и системный подход к решению проблем, сформулированных в рамках геоники (геомиметики), позволили разработать методологические основы создания эффективных строительных композитов. Одним из практических шагов является переход на композиционные вяжущие, что позволяет повысить потенциал портландцемента, решить задачи энерго- и ресурсосбережения, решить ряд экологических задач, связанных с утилизацией и потреблением отходов горнорудной промышленности, рециркуляции отходов строительного производства, отходов, образующихся при сносе зданий и сооружений, и вовлечение их в энергоэффективные технологии строительного материаловедения [1–3].

Комбинация химических и минеральных модификаторов, а также выбор способа приготовления, дают возможность оптимизировать свойства вяжущего для решения разнообразных конкретных задач с максимальной эффективностью. Это позволяет увеличить значение основных показателей, повысить эффективность использования сырья и значительно упростить технологию за счет замены и последующего ввода нескольких составляющих

одним компонентом — композиционным вяжущим.

Также важно отметить, что такое вяжущее может выступать и в качестве готового товарного продукта, что позволяет сохранить коммерческую тайну разработанного вяжущего для конечного потребителя (строительных заводов и фирм).

Целью данного исследования является разработка композиционных вяжущих для самоуплотняющегося высокопрочного бетона с использованием отсевов дробления фрагментов зданий и сооружений с учетом научных положений геоники «геомиметики».

Материалы и методы решения задач, принятые допущения

При разработке композиционных вяжущих применяли ЦЕМ I 42,5Н и ЦЕМ II/A-II 42,5Н Новороссийского цементного завода ОАО «Новоросцемент» (пос. Верхнебаканский). В качестве заполнителя применяли кварцевый песок с остатками на ситах 0.63 мм — 14%, 0.315 мм — 45% и 0.16 мм — 41%, модуль крупности 1.49.

Композиционные вяжущие получали совместным помолом портландцемента и отсевов дробления продуктов рециклинга строительных отходов (фракций 1.25–0.14 мм) в вибрационной мельнице до удельной поверхности 500–550 м²/кг.

Для придания смесям способности к самоуплотнению применяли гиперпластификатор «МС-PowerFlow 3100 RU» производства МС-Vauchemie.

Определение физико-механических показателей осуществлялось согласно нормативной документации на образцах-кубиках с размерами ребер 10×10×10 см с учетом масштабного коэффициента ГОСТ 10180-2012.

Эффект самоуплотнения фиксировался по таким параметрам как максимальная плотность, прочность,

способности заполнять форму при равных условиях.

Основным методологическим подходом исследований является реализация теоретических положений «закон подобия» и «закон сродства структур», развиваемых в рамках научного направления геоники «геомиметики». Согласно закону подобия, все составляющие строительного композита должны иметь высокую адгезию и обладать близкими деформационными и температурными характеристиками. Эта структура имеет сходство (подобие) по основным свойствам и генезису их природным аналогам.

Результаты

При создании высокопрочного бетона важным подходом является повышение прочности готового изделия при снижении расхода портландцемента, что связано с решением экономических и экологических задач.

Согласно литературному анализу для увеличения значений прочности бетона используются методы, включающие:

- введение тонкомолотых минеральных добавок [4, 5];
- варьирование содержания мелкого заполнителя [6];
- оптимизация количества гиперпластифицирующей добавки [3].

Эти подходы реализованы в данной работе. Первоначальным этапом было получение композиционного вяжущего для самоуплотняющихся бетонов. Продукты рециклинга строительных отходов были выбраны в качестве компонента композиционного вяжущего из-за необходимости утилизации многотоннажных отходов, образующихся в следствии реновации строительного комплекса страны, а также на освобожденных территориях ЛНР и ДНР. Для исследований использовали отходы строительных материалов в виде боя керамического кирпича (КК), лома тяжелого

бетона (ТБ) и газосиликата (ГС). С позиции основных направлений геоники — закона подобия и закона сродства структур, бетонный лом содержит соединения, обладающие химической однородностью к минералам портландцемента, особенно важно присутствие негидратированного портландцемента (в количестве около 4–5 мас. %), что составляет примерно 30 мас. % от исходного портландцемента [7]. Бой газобетона содержит гидросиликаты кальция, синтезируемые в процессе автоклавной обработки при производстве изделия [2]. Можно предположить, что они могут выступать в роли кристаллических затравок, инициируя рост кристаллических новообразований. Процесс обжига керамических изделий внес минералогические изменения в фазовую структуру с образованием муллитоподобных алюмосиликатов кальция или их смесь с дисперсным кренеземсодержащим компонентом. Эти минеральные соединения могут представлять готовые центры кристаллизации при твердении композиционного вяжущего. Кроме этого, в отсевах дробления фрагментов зданий и сооружений содержится дисперсная фаза, наличие которой может способствовать повышению объема реологически активной фазы бетонной смеси. Наличие дисперсных частиц повышает стойкость к расслаиванию и водоотделению бетонной смеси, обеспечивает высокую раздвижку зерен заполнителя и снижает трение между частицами крупнодисперсных составляющих для получения максимальной текучести под действием гравитационных сил, способствуя повышению физико-механических и эксплуатационных характеристик бетона [8].

Согласно литературным данным продукты рециклинга строительных отходов обладают развитой пористостью [9] и соответственно высокой размолоспособностью

с возможностью получения удельной поверхности выше, чем у товарного портландцемента (300–400 м²/кг). В данной работе отходы предварительно дробили и проводили рассев по фракциям. Фракционированные порошки вводили в вяжущее в количестве 30 % при замене доли цемента. Для получения композиционного вяжущего проводили совместный помол портландцемента и техногенного сырья до удельной поверхности 500–550 м²/кг.

Формовали бетонные образцы с получением необходимой консистенции смеси. Для составов сырьевой смеси с тонкомолотым тяжелым бетоном В/Ц составило 0,2, а для отходов керамического кирпича и газобетона — 0,22, ввиду их несколько более высокой водопотребности.

Соотношение мелкого заполнителя к композиционному вяжущему приняты равным 1 и 1,5. Эти данные выявлены на основе литературного анализа, где в условиях указанного диапазона цементного вяжущего и заполнителя отмечаются высокие показатели прочности при сжатии бетона [9]. Такое соотношение было выбрано

исходя из возможности сохранения эффекта самоуплотнения смеси при неизменном водовязущем отношении. В качестве контрольного образца использовали состав на основе композиционного вяжущего с применением кварцевого песка КВ70(КП). Результаты испытаний представлены в таблице 1.

На следующем этапе исследования проводили на составах вяжущего с применением бетонного лома. Исследовали влияние изменения количества затворяемой воды и количества гиперпластифицирующей добавки на прочность при сжатии цементного камня. Результаты экспериментальных испытаний представлены на рисунке 1.

Завершающим этапом экспериментальных исследований было определение влияния пластифицирующей добавки на реологию сырьевых смесей с применением тонкомолотого отхода тяжелого бетона. В данном эксперименте были рассмотрены составы без использования кварцевого песка при одинаковом В/В=0,2 (рисунок 2).

Таблица 1 — Физико-механические свойства строительного композита

№	Состав			В/В	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа		
	Вяжущее	Вяз: Песок	ГП*, %			5 сут.	14 сут.	28 сут.
1	КВ70(КП) - контрольный	1:1	3	0.22	2463	112	106	129
2	КВ70(ГС)				2416	101	119	109
3	КВ70(КК)				2550	106	115	114
4	КВ70(ТБ)			0.2	2463	123	123	162
5	КВ70(КП) - контрольный	1:1,5		0.22	2416	70	72	110
6	КВ70 (ГС)				2385	71	74	100
7	КВ70 (КК)				2520	86	76	110
8	КВ70 (ТБ)				0.2	2430	93	85

* раствор пластификатора с концентрацией производителя

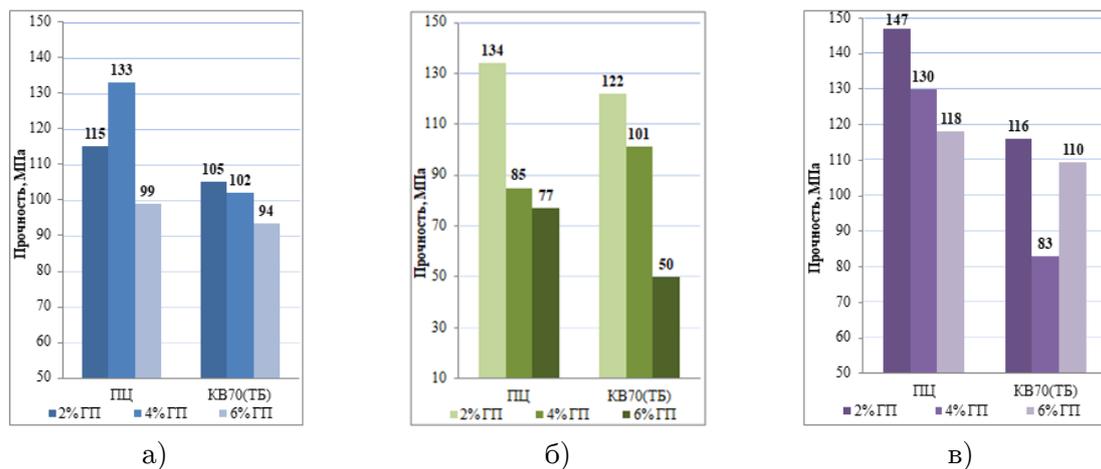


Рисунок 1 — Изменение прочности при сжатии композиционного вяжущего (состав №8, таблица 1): а) при В/В=0.17; б) при В/В=0.2; в) при В/В=0.22

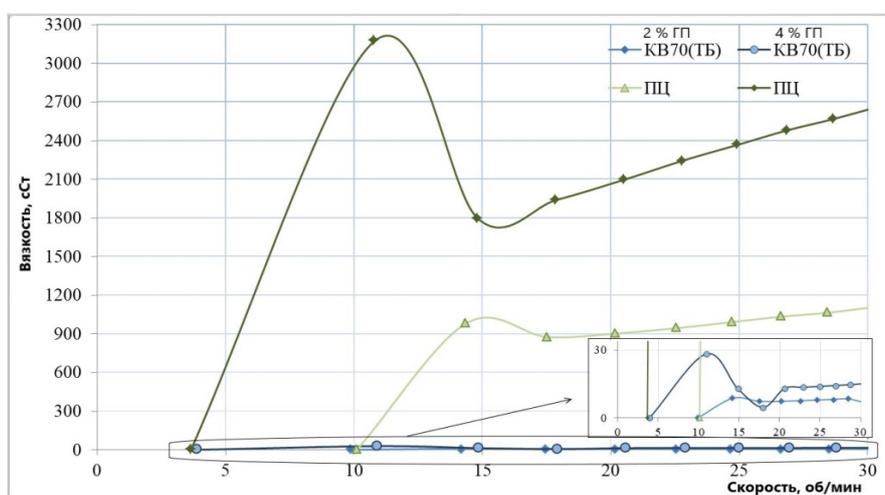


Рисунок 2 — Реограмма зависимости вязкости сырьевой смеси от времени гидратации

Обсуждение полученных результатов

Согласно экспериментальным данным (таблица 1), состав вяжущего с использованием в качестве заполнителя кварцевого песка при соотношении 1:1 является оптимальным, так как в этом случае достигается высокая прочность при сжатии образцов всех составов и на всех этапах твердения. Увеличение доли песка (1:1.5) приводит к снижению прочностных показателей у образцов, что связано с постепенным увеличением площади контакта между заполнителем и цементной матрицей.

Максимальная марочная прочность при сжатии ($R_{сж} = 162$ МПа) образцов достигается в случае соотношения

композиционное вяжущее : кварцевый песок 1:1 при использовании добавки тонкомолотого лома тяжелого бетона (рисунок 1, состав КВ70(ТБ)) и она на 26 % выше, чем контрольный состав. Увеличение прочности (123 МПа) в ранний период твердения через 5 суток обусловлено содержанием в минеральной добавке некоторого количества непрогидратированного клинкера, частицы которого вступают в реакцию с водой при гидратации уже на первых этапах твердения. Пуццолановая активность добавки способствует синтезу дополнительного количества гидросиликатных новообразований с увеличением прочности образцов на поздних стадиях твердения. Стоит отметить, что при

увеличении доли мелкого заполнителя до 1.5 при неизменном В/В, способность смеси к самоуплотнению проявляется немного хуже, чем при соотношении компонентов 1:1.

Составы на основе вяжущего с применением тонкомолотого отхода газосиликата КВ70(ГС) показали самую низкую плотность и прочность (таблица 1, состав 2, 6) в зависимости от контрольных составов (таблица 1, состав 1, 5), что объясняется большим водовяжущим отношением, необходимым для достижения равноподвижной смеси. Так же наблюдалось снижение прочности на 28-й день твердения, что может служить признаком возникновения внутренних напряжений, ослабляющих прочность цементного камня. Возможно, это связано с увеличением количества сульфатов и алюминия, вносимых гипсом и газообразователем в технологии ячеистого бетона для поризации и стабилизации реологии ячеистой сырьевой смеси, что инициирует процессы, аналогичные сульфатной коррозии. В данной системе при содержании доли мелкого заполнителя 1.5, при неизменном водовяжущем отношении, способность смеси к самоуплотнению резко снизилась.

Вяжущие с добавлением тонкомолотого керамического кирпича КВ70(КК) при водовяжущем отношении В/В = 0.22 отличаются способностью к самоуплотнению с достижением высокой плотности сырьевой смеси ($\rho = 2520, 2550 \text{ кг/м}^3$). Однако, в этих составах происходит снижение прочности в сравнении с контрольными составами (таблица 1, состав 1, 4) на 13–42%, что связано с меньшей активностью керамических частиц в процессах гидратации вяжущего. В общем случае составы с применением кварцевого песка имеют прочность на 28 суток твердения больше, чем у составов с применением техногенного сырья в виде тонкомолотого боя

газосиликата и керамического кирпича, однако применение кварцевого песка в производственных масштабах экономически не рационально ввиду его низкой размолоспособности.

Таким образом, при получения композиционных вяжущих для самоуплотняющихся смесей предпочтительно использовать минеральные добавки на основе лома тяжелого бетона или керамического кирпича. С точки зрения максимальных значений прочности, доступности и высокой размолоспособности, добавки в виде тонкомолотого лома бетона представляют научный и экономический интерес. Согласно литературному анализу [10] структура отхода на основе керамического кирпича отличается специфической пористостью и потенциально эту добавку можно рекомендовать в качестве накопителей влаги внутри бетонной структуры для поддержания гидратации и создания эффекта последовательного роста гидратных новообразований. В рамках данной работы гидратационное твердение образцов с принятым количеством воды не дало возможности проявиться данному эффекту, что требует дополнительных исследований.

При исследовании влияния количества гиперпластифицирующей добавки на прочность при сжатии цементного камня с техногенным сырьем установлено, что ее введение сверх 2% во всех случаях оказывает негативное влияние, что отмечается снижением прочности. Однако, в случае сравнения с составом на портландцементе при В/В равным 0.2, прочность КВ70(ТБ) выше на 16 %.

При анализе реологических кривых (рисунок 2) первый пик характеризует предел текучести сырьевой смеси, а угол наклона основной части реограмм отражает динамическую вязкость. Как видно из графиков (рисунок 2), с увеличением количества гиперпластификатора от 2 до

4 % происходит повышение вязкости сырьевой смеси. Следует предположить, что это обусловлено природой пластифицирующей добавки, которая отличается достаточно вязкой структурой, при введении которой вязкость сырьевой смеси увеличивается. Поэтому целесообразно ограничить верхний уровень вводимого пластификатора количеством 3 % от массы вяжущего (ориентировочно 1 % в пересчете на сухое вещество), что также подтверждается показателями прочности при сжатии образцов вяжущего (рисунок 1). Следует отметить положительный момент при формовании образцов, связанный с повышением стойкости к расслоению сырьевой смеси и отсутствием выделения воды на поверхности образцов при твердении в формах.

Таким образом оптимальным следует признать состав КВ70(ТБ) при замене 30 % портландцемента на отсев дробления тяжелого бетона с использованием 2 % гиперпластифицирующей добавки, в этом случае при водовязущем отношении $V/V = 0.2$ прочность при сжатии цементного камня составила 122 МПа, что на 16 % выше контрольного состава без использования техногенного сырья.

Заключение

При исследовании продуктов рециклинга строительных отходов в качестве компонентов композиционного вяжущего установлена эффективность использования тонкомолотого отсева дробления тяжелого бетона. С позиции «закона подобия» и «закона родства структур» бетонный лом содержит соединения непрогидратированных клинкерных частиц, которые, вступая в реакцию с водой при гидратации вяжущего, способствуют увеличению прочности композита уже на начальных этапах твердения (5 суток). Пуццолановая активность добавки интенсифицирует синтез дополнительного количества гидросиликатных новообразований с

увеличением прочности при сжатии строительного композита на 28 сутки твердения до 162 МПа, что на 26 % выше вяжущего без использования добавки.

Эффект самоуплотнения сырьевой смеси проявляется в достаточной степени при соотношении компонентов КВ70(ТБ): кварцевый песок 1:1.5 с $V/V=0.2$. У составов с применением КВ70(КК) при $V/V = 0.22$ эффект самоуплотнения незначительно снижается, а у состава с применением КВ70(ГС) он отсутствует.

Согласно реологическим показателям сырьевой смеси состава КВ70(ТБ) отмечается целесообразность ограничения верхнего уровня вводимого пластификатора «МС-PowerFlow 3100 RU» в количестве 3 % от массы вяжущего (ориентировочно 1 % в пересчете на сухое вещество) при этом достигается стойкость сырьевой смеси к расслоению и отсутствие выделения воды на поверхности образцов при твердении в формах.

Оптимальным признан состав КВ70(ТБ) при замене 30 % портландцемента на отсев дробления тяжелого бетона с использованием 2 % гиперпластифицирующей добавки, в этом случае при снижении водовязущего отношения до 0.2 прочность при сжатии цементного камня составила 122 МПа, что на 16 % выше состава на портландцементе.

Таким образом при разработке композиционных вяжущих с отсевами дробления фрагментов зданий и сооружений возможна экономия до 30 % портландцемента при этом создаются условия максимального раскрытия его потенциала, решить задачи ресурсосбережения в строительной отрасли, а также уменьшить негативное воздействие на окружающую среду, что в комплексе реализуется за счет применения теоретических положений трансдисциплинарной науки геоника «геомиметика».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Лесовик В. С., Фомина Е. В. Новая парадигма проектирования строительных композиций для защиты среды обитания человека. *Вестник МГСУ*, 2019, т. 14, вып. 10, с. 1241–1257.

DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1241-1257

[2]. Фомина Е. В., Лесовик В. С., Фомин А.Е. и др. Повышение эффективности газобетона за счет применения отходов угледобычи. *Региональная архитектура и строительство*, 2018, № 4 (37), с. 38–47.

[3]. Лесовик В. С., Федюк Р. С., Лисейцев Ю. Л. и др. Влияние состава на свойства и строение модифицированных цементных композиций. *Строительные материалы*, 2022, № 9, С. 39–49.

DOI: 10.31659/0585-430X-2022-806-9-39-49

[4]. Тараканов О. В., Калашников В. И., Белякова Е. А., Москвин Р. Н. Самоуплотняющиеся бетоны нового поколения на основе местных сырьевых ресурсов. *Региональная архитектура и строительство*, 2014, № 2, с. 47–53.

[5]. Voitovich E. V., Ayzenshtadt A. M. Design of compositions of a composite gypsum binder with the use of nano-structured silica component: thermodynamic aspect. *Prom. Grahd. Stroit.*, 2014, Vol. 5, pp. 26–30.

[6]. Kozhukhova N. I., Shurakov I. M., Elistratkin M. Yu., Kozhukhova M. I., Alfimova N. I. Understanding the relationship between composition and rheology in alkali-activated

Лесовик Валерий Станиславович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (Российская Федерация, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46), Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Российская Федерация, 119331, Москва, пр-т Вернадского, д. 29)

Елистраткин Михаил Юрьевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (Российская Федерация, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46)

Сальникова Алена Сергеевна — ассистент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (Российская Федерация, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46)

Фомина Екатерина Викторовна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова (Российская Федерация, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46), Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Российская Федерация, 119331, Москва, пр-т Вернадского, д. 29)

binders. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, 012004.

DOI: 10.1088/1742-6596/2124/1/012004

[7]. Ахмед А. А., Федюк Р. С., Лисейцев Ю. Л. и др. Использование бетонного лома Ирака в качестве наполнителя и заполнителя тяжелого и легкого бетона. *Строительные материалы и изделия*. 2020, т. 3, № 3, с. 28–39.

[8]. Федюк Р. С., Мочалов А. В. Композиционные вяжущие для бетонов повышенной ударной стойкости. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2018, № 4 (200), с. 85–91.

[9]. Шеремет А. А., Елистраткин М. Ю., Шеремет Е. О., Лесовик В. С., Шаталова С. В. Исследование физико-механических свойств крупнопористого керамзитобетона для трехслойного 3D-аддитивного строительства. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2022, № 11, с. 30–39.

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-30-39

[10]. Sverguzova S.V., Sapronova Z.A., Fomina E.V. The use of water treatment sludge containing clay with adsorbed copper and nickel ions in the production of ceramic bricks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, p. 052009.

DOI: 10.1088/1757-899X/753/5/052009

Composite binder with energy-saving raw materials for high-strength concrete

V. S. Lesovik^{*,**}, M. Yu. Elistratkin^{*}, A. S. Salnikova^{*}, E. V. Fomina^{*,**,1}

** Belgorod state technological university named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russia*

*** Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, Moscow, Russia*

Abstract

In this paper, from the position of the scientific direction of geonics «geomimetics», the issue of increasing the efficiency of high-strength self-compacting concrete through the use of waste building materials in the form of ceramic brick, heavy concrete scrap and gas silicate is considered. It has been established that the use of concrete scrap crushing screening in the composition of the raw mixture contributes to the increase of the concrete's resistance to delamination and water separation at optimal rheological properties with the improvement of the physico-mechanical properties of composite binder and fine-grained concrete based on it. It is possible to save up to 30% of Portland cement as part of a composite binder when replacing it with man-made raw materials. The maximum effect of self-sealing of the raw mixture is sufficiently manifested when using a ceramic brick fight. However, in combination with the characteristics of maximum strength and grinding capacity, the use of finely ground concrete scrap is preferable. The research is aimed at maximizing the resource potential of technogenic raw materials in the form of screenings of crushing fragments of buildings and structures formed as a result of the renovation of the country's construction complex, as well as in the liberated territories of the LPR and DPR.

Keywords

Composite binder, technogenic raw materials, self-compacting mixture, hyperplasticizer, concrete.

*The work was carried out within the framework of the "Priority 2030" Program on the basis of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov using the equipment of the High Technology Center of the V.G. Shukhov BSTU;
The study was supported by Russian Science Foundation (proj. 22-19-20115) <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> and the Government of the Belgorod Region, Agreement No. 3 dated March 24, 2022.*

¹ *Corresponding author*

Email: fomina.katerina@mail.ru

REFERENCES

- [1]. Lesovik V. S., Fomina E. V. Novaya paradigma proektirovaniya stroitel'nykh kompozitov dlya zashchity sredy obitaniya cheloveka [The new paradigm of designing construction composites to protect the human environment]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2019, 14(10), pp. 1241–1257. (In Russ.)
DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1241-1257.
- [2]. Fomina E. V., Lesovik V. S., Fomin A. E., et al. Povyshenie jeffektivnosti gazobetona za schet primenenija othodov ugledobychi [Improving the efficiency of the concrete due to the use of waste coal]. *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and engineering], 2018, no 4(37), pp. 38–47.
- [3]. Lesovik V. S., Fedjuk R. S., Lisejcev Yu.L., et al. Vlijanie sostava na svojstva i stroenie modificirovannykh cementnykh kompozitov [The effect of some mineral additives on the properties of fine-aggregate concrete] *Stroitel'ny'e materialy* [Construction materials], 2022, no. 9, pp. 39–49. (In Russ.)
DOI:10.3 16659/0585-430x-2022-806-9-39-49.
- [4]. Tarakanov O. V., Kalashnikov V. I., Beljakova E. A., Moskvina R. N. Samouplotnjajushhiesja betony novogo pokolenija na osnove mestnykh syr'evykh resursov [Self-compacting concretes of a new generation based on local raw materials]. *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo* [Reg Archit Constr], 2014, no. 2, pp. 47–53. (In Russ.)
- [5]. Voitovich E. V., Ayzenshtadt A. M. Design of compositions of a composite gypsum binder with the use of nano-structured silica component: thermodynamic aspect. *Prom. Grazhd. Stroit.*, 2014, vol. 5, pp. 26–30.
- [6]. Kozhukhova N. I., Shurakov I. M., Elistratkin M. Yu., Kozhukhova M. I., Alfimova N. I. Understanding the relationship between composition and rheology in alkali-activated binders. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, p. 012004.
DOI: 10.1088/1742-6596/2124/1/012004.
- [7]. Ahmed A. A., Fedjuk R. S., Lisejcev Ju. L., et al. Ispol'zovanie betonogo loma Iraka v kachestve napolnitelja i zapolnitelja tjazhelogo i ljogkogo betona [Use of Iraqi concrete scrap as a filler and filler of heavy and light concrete]. *Stroitel'nye materialy i izdelija* [Construction materials and products], 2020, no. 3(3), pp. 28–39. (In Russ.)
- [8]. Fedjuk R. S., Mochalov A. V. Kompozicionnye vjazhushhie dlja betonov povyshennoj udarnoj stojkosti. Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Severo-Kavkazskij region [Composite binders for concretes of increased impact resistance. News of higher educational institutions. North Caucasus region]. *Tekhnicheskie nauki* [Technical sciences], 2018, no. 4(200), pp. 85–91. (In Russ.)
- [9]. Sheremet A. A., Elistratkin M. Yu., Sheremet E. O., et al. Issledovanie fiziko-mehanicheskikh svojstv krupnoporistogo keramzitobetona dlja trehslojnogo 3D-additivnogo stroitel'stva [Investigation of physico-mechanical properties of coarse-pored expanded clay concrete for three-layer 3D additive construction]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov], 2022, No. 11, Pp. 30–39. (In Russ.)
DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-30-39.
- [10]. Sverguzova S. V., Sapronova Z. A., Fomina E.V. The use of water treatment sludge containing clay with adsorbed copper and nickel ions in the production of ceramic bricks. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 052009.
DOI: 10.1088/1757-899X/753/5/052009.

Lesovik V. S. — Dr. Sc.(Eng.), Professor, Head of the Department of Construction Materials Science, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (Kostyukova st., 46, Belgorod, 308012, Russian Federation), Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation (Vernadsky Ave., 29, Moscow, 119331, Russian Federation).

Elistratkin M. Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Building Materials, Products and Structures, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (Kostyukova st., 46, Belgorod, 308012, Russian Federation).

Salnikova A. S. — Assistant, Department of Building Materials, Products and Structures, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (Kostyukova st., 46, Belgorod, 308012, Russian Federation).

Fomina E. V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Building Materials, Products and Structures, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (Kostyukova st., 46, Belgorod, 308012, Russian Federation), Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation (Vernadsky Ave., 29, Moscow, 119331, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Композиционное вяжущее с энергосберегающим сырьем для высокопрочного бетона / В. С. Лесовик, М. Ю. Елистраткин, А. С. Сальникова, Е. В. Фомина // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 2(9). С. 7–17.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-7-17

Please cite this article as:

Lesovik V. S., Elistratkin M. Yu., Salnikova A. S., Fomina E. V. Composite binder with energy-saving raw materials for high-strength concrete. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 2(9), pp. 7–17.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-7-17

Особенности технологии получения полиакриламидных
функциональных гидрогелей на основе люминесцентных
наполнителей

Д. А. Макаренко^{*,**,1}, В. И. Назаров^{*,***}, С. Л. Лобастов^{*}, С. Ю. Салыкин^{*},
Г. Р. Афлятунова^{*}, В. А. Бухрякова^{*}

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

*** Московский политехнический университет, Москва, Россия*

**** МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия*

Аннотация

В статье рассмотрена технология получения композиционного гидрогелевого материала в виде водной суспензии. Рассмотрен вопрос измельчения гидрогелевого материала в водной среде, с получением водной суспензии частиц с требуемым распределением частиц по размерам. В качестве композиционного гидрогелевого материала выбран полимер полиакриламида, а в качестве наполнителя использовались антистоксовы люминофоры различных марок. В работе приведён способ получения композиционного гидрогелевого материала. Для его осуществления разработана комплексная установка, содержащая реактор с набором перемешивающих устройств, быстроходных зубчатых фрез, а также специальный узел диспергирования, включающий насос и двухзонный диспергатор. Приведены данные по исследованию влияния технологических и режимных параметров используемого оборудования на гранулометрический состав получаемого гидрогелевого материала. Выявлены влияния на качество получаемых гидрогелей частоты вращения диспергатора, времени диспергирования и соотношения гидрогеля к воде. Получены суспензии с узким гранулометрическим составом от 1300 до 200 мкм. Представлены микрофотографии композиционного материала на основе полиакриламидного гидрогеля и неорганического люминофора. Дано описание технологии получения суспензии гидрогелевого материала в едином технологическом цикле.

Ключевые слова

Гидрогелевый материал, полиакриламид, неорганические наполнители, люминофоры, защитные маркеры, полимеризация, комплексная установка, микрофотографии, агротехника, лекарственные препараты.

*Аналитические исследования выполнены с использованием
научного оборудования ЦКП НИЦ «Курчатовский институт» — ИРЕА
при финансовой поддержке проекта Российской Федерации
в лице Минобрнауки России, Соглашение № 075-15-2022-1157 от 16.08.2022*

¹ Для переписки:

Email: makarenkovd@mail.ru

Введение

В последние годы полимерные композиционные гидрогели с различными типами наполнителей нашли широкое применение в различных отраслях. Полимерные гидрогели используются, например, для решения экологических и агротехнических задач [1]. Синтетические полимерные гидрогели (СПГ) обладают способностью набухать в воде и в водных растворах, удерживая при этом в набухшем состоянии большее количество воды. В результате в почве создается запас воды. Ввод в состав СПГ в качестве наполнителя элементов азота и калия повышает урожайность сельскохозяйственных культур и их устойчивость к меняющимся факторам внешней среды. Ввод в качестве наполнителя гидролизных белковых отходов в акриловый гидрогель приводит к регулируемому росту растений [2, 3].

Другим направлением является использование гидрогелей на основе полиакриловой кислоты в качестве «депо» для лекарственных препаратов. В работе [4] были исследованы физико-химические свойства геля полиметакриловой кислоты (ПМАК), в который были встроены лекарственные препараты, такие как парацетамол и этофиллин. Последний является компонентом лекарства, улучшающего мозговое кровообращение. Была исследована контролируемая кинетика их освобождения.

Также широкое распространение нашли водные суспензии частиц гидрогелей и, в частности, полиакриламидного гидрогеля с заданными физико-механическими свойствами. Эти смеси содержат наполнители в виде защитных маркеров, например люминофоров. Они используются в различных областях: в медицине, бумажной промышленности и в сельском хозяйстве. Большое внимание уделяется

люминофорам, обладающим комплексными люминесцентными свойствами. Создание таких материалов повышает степень защищённости ценных бумаг [5].

Одним из этапов процесса синтеза полиакриламидных гидрогелей является стадия подготовки люминесцирующих наполнителей перед их вводом в структуру образующегося полиакриламидного гидрогеля. В качестве люминесцирующих наполнителей могут использоваться органические и неорганические люминофоры, вводимые в структуру гидрогеля в различных вариациях и концентрациях, обеспечивающих желаемый визуальный эффект.

Ранее было показано, что многие люминесцирующие наполнители в исходном виде не могут быть введены в гидрогели [6]. В подготовленной реакционной массе гидрогеля с рядом компонентов и, в том числе, окислительно-восстановительной системой инициатора полимеризации, происходят и негативные явления. Это потеря люминесцентных свойств наполнителя, выделение резких запахов, коагуляция, изменения прозрачности реакционной массы, а также существенное замедление или прекращение процесса полимеризации.

Основным компонентом при получении реакционной массы являются полиакриламидные гидрогели (ПГ). Их используют благодаря простоте изготовления, низким когезионным характеристикам (липкость) и невысокой стоимости исходных реагентов. ПГ получают сополимеризацией мономера — акриламида с использованием сшивающего агента — метиленабис-акриламида. В качестве инициатора полимеризации применяют окислительно-восстановительную систему «персульфат аммония или калия — тетраметилэтилендиамин (ТМЭД)». [7].

На основе экспериментальных исследований различных стадий получения ПГ разработан способ получения композиционного материала, защищённый патентом РФ [8]. По этому способу в смесь компонентов гидрогеля при постоянном перемешивании вначале вводят тонкодисперсный неорганический наполнитель до образования однородной, агрегативно устойчивой дисперсной системы. Режимы смещения обеспечивают равномерное распределение частиц наполнителя по всему объёму. После завершения полимеризации получают композиционный материал в виде монолитного гидрогелевого блока с неорганическим наполнителем в структуре. При полимеризации мономера акриламида частицы неорганического наполнителя обволакиваются макромолекулами полимера полиакриламида. В результате образуются так называемые полимерные сетки, ячейки которых заполнены частицами неорганического наполнителя. Ввод неорганических наполнителей, таких как люминофоры, придаёт композиционному материалу специальные свойства (сорбционные характеристики) и повышает прочностные параметры изделия [9, 10].

Для получения композиционного гидрогелевого материала (КГМ) была разработана комплексная установка. Она включает реактор с набором тихоходных перемешивающих устройств, быстроходных зубчатых фрез различной конструкции с ножами специальной заточки, а также специальный узел диспергирования с насосом и дополнительным двухзонным диспергатором.

В работе приведены результаты получения композиций ПГ с различными наполнителями и описаны особенности работы установки в зависимости от технологических режимов.

Материалы и методы исследования

В качестве люминесцирующих наполнителей могут использоваться органические и неорганические люминофоры, вводимые в структуру гидрогеля в широком диапазоне концентраций. Однако компоненты, входящие в окислительно-восстановительную систему инициатора полимеризации, не всегда можно вводить в гидрогель с наполнителями. Это связано с люминесцентными свойствами наполнителя, которые могут меняться во время процесса полимеризации. В работе был использован ПГ, получаемый при сополимеризации мономера (акриламида), где сшивающим агентом является метилен-бис-акриламид.

Объектом исследования был выбран КГМ на основе полимера полиакриламида. В качестве наполнителя использовали антистоксовый люминофор марки Ф(а)СД-546-2 производства ЗАО НПФ «ЛЮМ», представляющий собой окисульфид иттрия, активированный ионами эрбия и сенсibilизированный ионами иттербия. Такой люминофор преобразует ИК-излучение диапазона (900–980) нм в видимое свечение зеленого цвета [11]. Максимальный размер частиц составил 8 мкм. Оптимальный интервал максимального размера частиц гидрогелевого материала (ГМ) в данном случае составляет (30–700) мкм и соответствует размерам частиц, при которых гарантированно не ухудшаются показатели качества и печатно-технологические свойства бумаги [12].

В качестве инициатора полимеризации была выбрана окислительно-восстановительная система «персульфат аммония или калия — ТМЭД». При выборе люминесцирующих наполнителей были сформулированы технологические требования к используемым материалам:

1. При полимеризации ПГ оптимальное значение рН реакционной массы

составляет (4–6) [12]. Необходимо учитывать, что в щелочной среде в полиакриламиде происходит гидролиз амидных групп. Это ограничивает использование наполнителей с щелочными значениями pH [13]. При синтезе композиционного материала уровень pH должен обеспечивать защитный эффект наполнителя во время проведения всего процесса полимеризации.

2. Если используются наполнители, которые в водных растворах диссоциируют с выделением катионов с комплексообразующей составляющей, то данные катионы могут образовывать стабильные комплексы.

3. Так как масштабирование процессов радикальной полимеризации сопровождается повышением температуры реакционной массы, то это ужесточает требования к термостойкости наполнителей. Установлено, что при начальной температуре 23 °C реакционная масса объемом 5 л через 20 минут после начала полимеризации нагревалась до 38 °C, а реакционная масса объемом 50 л — до 47 °C. При этом ГМ обладают относительно высокой теплоемкостью и медленно остывают с ярко выраженным температурным градиентом от периферии объема к его центру. Установлено, что некоторые неорганические люминофоры на основе алюминатов стронция SrAl_2O_4 после полимеризации композиционного материала теряли свои люминесцентные свойства в центральной части гидрогелевого блока.

В процессе исследований в полученных образцах суспензий частиц ГМ контролировали распределение частиц по размерам, используя медианные диаметры частиц. Для анализа грансостава использовали метод лазерной дифракции в лабораторном анализаторе частиц Mastersizer 2000. При этом измеряется угловая зависимость интенсивности рассеянного света при прохождении лазерного луча через

исследуемый образец суспензии. В результате можно получить точное распределение частиц анализируемой пробы по размерам, а также величины размеров средних диаметров частиц.

В работе проанализированы приёмы адаптации исходных люминесцирующих наполнителей при их введении в гидрогели без потери качества. Для органических люминофоров таким приёмом является капсулирование, представляющее собой растворение люминофоров в термопластичном полимере с последующим переосаждением в воду. При капсулировании полимер растворяют в водорастворимом органическом растворителе, а в получившийся раствор вводят органический люминофор. Здесь также используют стабилизирующие добавки (диспергатор, пеногаситель). Полученный комплекс в виде капсулированной системы «растворитель-полимер-люминофор» затем осаждают в воду.

При разработке технологии производства ПГ использовались совмещенные процессы. Было установлено, что осаждение раствора полимера эффективнее проводить на погружном диспергаторе Polytron PT D 36–60 с посменным использованием нескольких типов диспергирующих насадок. В качестве первого типа используется стандартный генератор ротор-статор с тремя рядами зубцов, который обеспечивает равномерное формирование и распределение нитей полимера в воде [14].

В качестве второго типа используют специальный W-генератор ротор-статор с одним рядом зубцов (PTG 60/2W), обеспечивающий диспергирование полимера в частицы заданного размера. Было выявлено, что получение капсулированного люминофора с медианным диаметром частиц $d(50) = 50–60$ мкм является оптимальным и используется для его дальнейшего введения в структуру гидрогеля. Исследования

показали, что эти характеристики обеспечиваются при следующих параметрах работы Polytron PT D 36–60: 1) переосаждение раствора люминофора и полимера осуществляется диспергирующим агрегатом PTG 60/6 при частотах вращения $n=7000$ об/мин в течение 15 мин; 2) диспергирование капсулированного люминофора обеспечивается диспергирующим агрегатом PTG 60/2W при частотах вращения $n = 7000$ об/мин в течение 10 мин.

С использованием полученных рекомендаций была разработана комплексная установка для производства частиц КГМ, содержащая реактор с тихоходным перемешивающим устройством и рубашкой обогрева, узел для крупного измельчения уплотнённого гидрогеля и узел диспергирования со специальной сеткой [15]. Здесь

также используется узел разделения суспензии на мелкие фракции. В него входят блок быстроходного верхнеприводного измельчения с быстроходной зубчатой дисковой фрезой или ножевой крестообразной фрезой с ножами (рисунок 1).

Вне реактора установлены: устройство для опускания и подъёма фрез, узел диспергирования, содержащий насос для перекачки суспензий и двухзонный диспергатор. Он выполнен в виде цилиндрического корпуса с размещённым в нём цилиндро-коническим поршнем. На конической поверхности поршня выполнены направляющие канавки, а в корпусе размещено распределительное кольцо с перегородками и сетчатым фильтром. Устройства установлены последовательно.

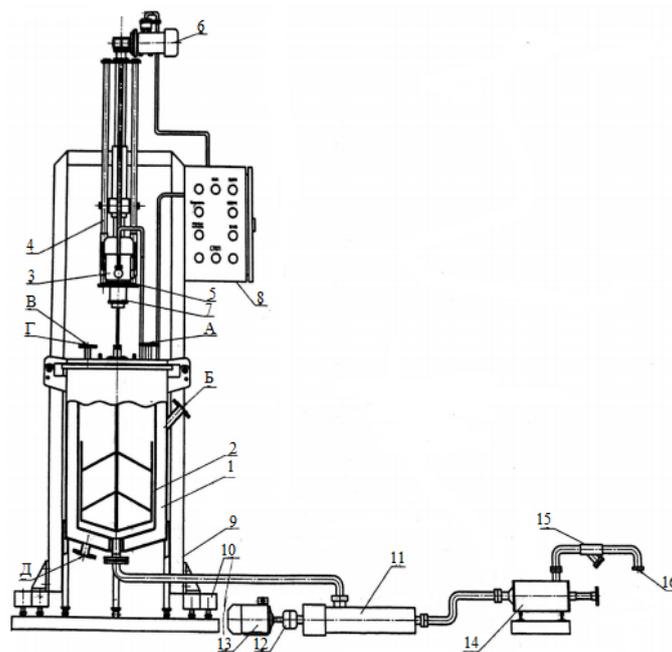


Рисунок 1 — Установка для получения мелкодисперсной суспензии гидрогеля:

- 1 — ёмкость с рубашкой; 2 — рамная мешалка; 3 — электропривод для вращения мешалок и фрез; 4 — направляющие; 5 — основание; 6 — привод для опускания и подъёма мешалок; 7 — шпindel; 8 — блок управления; 9 — вертикальная стойка; 10 — нижние опоры с регулируемыми ножками; 11 — винтовой насос узла гомогенизации, 12 — муфта; 13 — привод; 14 — гомогенизатор; 15 — сетчатый фильтр; 16 — патрубок для вывода готового продукта; (А) — патрубок для загрузки сырья; (Б) — патрубок для ввода греющего агента; (В) — патрубок для заливки воды; (Г) — патрубок для ввода моющего раствора; (Д) — патрубок для вывода греющего агента

При работе используются фрезы различного типа: быстроходная верхнеприводная зубчатая дисковая фреза с узлом крепления (рисунки 2), ножевая дисковая фреза и ножевая крестообразная фреза.

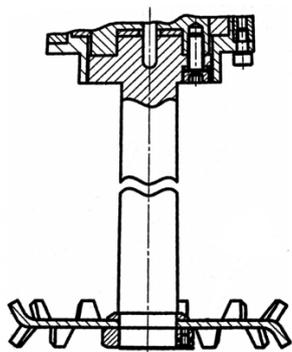


Рисунок 2 — Быстроходная верхнеприводная зубчатая дисковая фреза с узлом крепления

Особенностью работы такой установки является то, что процесс перемешивания, образования суспензии, полимеризации, получения уплотнённой массы (таблетки) гидрогеля и первичного измельчения проводится в едином технологическом цикле. Это обеспечивается наличием взаимосвязанных узлов смешения, узлов измельчения с ножами, скоростями вращения тихоходной мешалки, а также переменной скоростью вращения дисковой и ножевой фрез.

Окончательное диспергирование частиц гидрогеля до микронных размеров достигается в диспергаторе, куда винтовой насос 11 перекачивает суспензию гидрогеля при заданном давлении через две зоны: кольцевой зазор и сетчатый фильтр 15, установленный на трубе. Таким образом в установке можно выделить блок с реактором и комплектом сменных перемешивающих устройств и блок гомогенизации.

Первый блок также включает опорную раму с вертикальными стойками и направляющими.

Во **второй блок** входят узел гомогенизации, содержащий винтовой насос и гомогенизатор, снабжённый сетчатым фильтром. Установка снабжена устройством для опускания и подъёма мешалок.

Установка работает следующим образом. Через входные патрубки в реактор загружают компоненты смеси для приготовления гидрогеля. При этом работает рамная мешалка, частота вращения которой составляет $50\text{--}500\text{ мин}^{-1}$. Затем при постоянной частоте вращения через входной патрубок вводят пигмент и другие инициаторы. Перемешивание осуществляют с помощью тихоходной мешалки при частоте 50 об/мин в течение 5 минут до полного растворения акриламида. В получившийся раствор дозируют 1%-ный водный раствор тетраметилэтилендиамина (ТМЭД) и перемешивают еще в течение 5 минут. На бисерной мельнице готовят отдельно водно-глицериновую пасту, содержащую защитный маркер в виде 20 % неорганического люминофора К-77 [15].

В резервуар с приготовленным раствором затем дозируют приготовленную пасту с наполнителями и продолжают перемешивание при частоте 100 об/мин в течение 5 минут. После этого вводят инициатор полимеризации — раствор персульфата аммония с концентрацией 1 % масс. Смесь разбавляют водой до конечного объёма и продолжают перемешивание до момента наступления первичной полимеризации раствора. При этом происходит формирование упругого гидрогелевого блока, но не достигается его конечная упругость. Для избежания прилипания сформировавшегося блока гидрогеля к стенкам реактора рамную мешалку не останавливают.

На следующем этапе заменяют рамную мешалку на быстроходную фрезу с частотой вращения $1000\text{--}1500\text{ об/мин}$ и начинают медленно опускать в рабочий объём, добавляя воду в количестве 230 %

от массы гидрогеля. При этом скорость погружения фрезы в брикет гидрогеля сопоставима со скоростью полимеризации и сшивания. В окончательной стадии фреза диспергирует гидрогелевый брикет на частицы с объёмом 0.5–1.5 см³.

На заключительном этапе посредством винтового насоса смесь с фрагментами гидрогеля сначала подают через кольцевой зазор гомогенизатора, где за счёт давления осуществляется её продавливание через сетчатый патрон с двумя сетками с ячейками 350 мкм и 500 мкм.

В данной работе подбор режимных параметров проводили на различных типах образцов КГМ.

В режимах диспергирования учитывали совокупность следующих факторов: 1) содержание полимера в гидрогеле; 2) содержание ГМ в дисперсионной среде (воде); 3) время диспергирования ГМ; 4) частота вращения диспергирующего агрегата.

Для полученных суспензий частиц ГМ определяли распределение частиц по размерам через медианные диаметры частиц с использованием анализатора частиц Mastersizer 2000. В частности, определяли суммарное объёмное распределение частиц по размерам (интегральный гранулометрический состав) в виде квантилей распределения. Результат гранулометрического анализа характеризуется значениями медианных диаметров частиц: $d(0.1)$, $d(0.5)$, $d(0.9)$. Например, значение $d(0.1)$, равное 15 мкм, означает, что 10% частиц от общей массы имеют диаметр не больше 15 мкм.

Результаты исследований образцов с различным содержанием полимера (поперечно-сшитого полиакриламида) представлены в виде таблиц, а также зависимостей гранулометрического состава от режимных параметров, и микрофотографий гидрогелевого продукта с люминофорами.

Результаты исследований и их обсуждения

В работе были получены водные суспензии полиакриламидного гидрогеля, а также гидрогеля с аналогичными физическими свойствами при разных типах различных маркеров. Результаты опытов по получению образцов диспергированного ГМ с различным содержанием поперечно-сшитого полиакриламида приведены в таблице 1.

Во время опытов менялись типы защитных маркеров (люминофоров), массовые соотношения гидрогеля к воде G_g/G_v и режимные параметры процесса измельчения в гомогенизаторе. Это позволило получить суспензию композиционного материала с люминофорами с различными выходными характеристиками.

В опытах использовались следующие защитные маркеры: 1) 8% органический люминофор ОРЛЮМ 520; 2) 20% неорганический люминофор ФАМ-810/1000-1; 3) 20% неорганический люминофор К-77; 4) Ф(а)СД-546-1 — 0.8 %.

Ниже представлены результаты исследования гранулометрического состава композиционного материала в зависимости от концентрации материала, частоты вращения диспергатора и от соотношения гидрогеля к воде для различных типов различных маркеров (рисунки 3, 4, 5 и 6).

Внешний вид частиц КГМ, подвергнутого значительным механическим нагрузкам при диспергировании, представлен на рисунках 7–8. Фотографии образца получены с помощью растрового электронного микроскопа Tescan Vega 3SBU. Контрастные чёрные включения на фотографиях являются частицами неорганического люминофора Ф(а)СД-546-2.

Графические результаты проведенных исследований приведены на рисунках 3-6.

Таблица 1 — Режимные параметры процесса получения КГМ с различными типами защитных маркеров

Номер образца	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Состав гидрогелевого материала, % масс. и режимные параметры процесса				
Акриламид	9	9	11	12
1%-й раствор метилен-бис-акриламида	16	16	19.5	21.3
1%-й раствор ТМЭД	1.6	1.6	2.0	2,1
Защитные маркеры	Орлюм520 — 0.2 %; ФАМ 810/1000-1 — 0.6 %	К-77 — 0.5 %	Ф(а)СД-546-1 — 0.8 %	Орлюм490 — 0.4 %
Вода	58.6	58.9	49.7	43.2
1%-й раствор персульфата аммония	14	14	17	21
Гидрогель, ИТОГО:	100 %	100 %	100 %	100 %
Ввод воды для предварительного измельчения при соотношениях гидрогель : вода	0.5	4	1	0.25
Параметры измельчения в гомогенизаторе				
Количество циклов	1	5	12	12
Зазор, мм	2	1,5	1,2	1,6
Сетчатый патрон	2 сетки (350 мкм и 500 мкм)	1 сетка (500 мкм)	2 сетки (350 мкм и 500 мкм)	1 сетка (500 мкм)
Параметры суспензии частиц композиционного материала				
Концентрация, % масс.	30	15	5	45
Размер частиц суспензии, мкм	d(0.1) = 125 d(0.5) = 580 d(0.9) = 1000	d(0.1) = 50 d(0.5) = 340 d(0.9) = 700	d(0.1) = 20 d(0.5) = 175 d(0.9) = 300	d(0.1) = 60 d(0.5) = 220 d(0.9) = 500

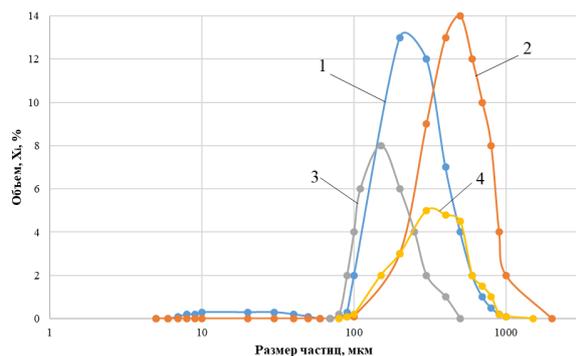


Рисунок 3 — Зависимость изменения гранулометрического состава частиц при средней частоте вращения диспергатора $n = (6000-7000)$ об/мин от концентрации полимера смеси, % масс.: 1 — $C_{II} = 13$; 2 — $C_{II} = 15$; 3 — $C_{II} = 12$; 4 — $C_{II} = 9$

Из кривых на рисунке 3 видно, что рост концентрации полимера в смеси приводит к укрупнению гранулометрического состава до (800–1000) мкм. Выявлено, что увеличение концентрации гидрогеля в дисперсной среде при высоких скоростях за счет турбулентности дисперсных потоков выравнивает гранулометрический состав.

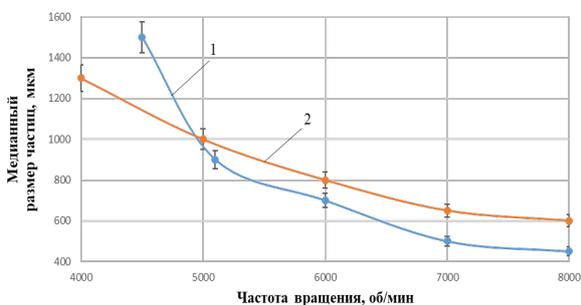


Рисунок 4 — Зависимость изменения медианного размера частиц ГМ от частоты вращения диспергатора и времени диспергирования: 1 — $\tau = 3$ мин; 2 — $\tau = 5$ мин

Из кривых на рисунке 4 видно, что рост частоты вращения диспергатора в диапазоне от 4000 до 8000 об/мин приводит к значительному уменьшению максимального размера частиц даже в узком диапазоне времени диспергирования (3–5) мин.

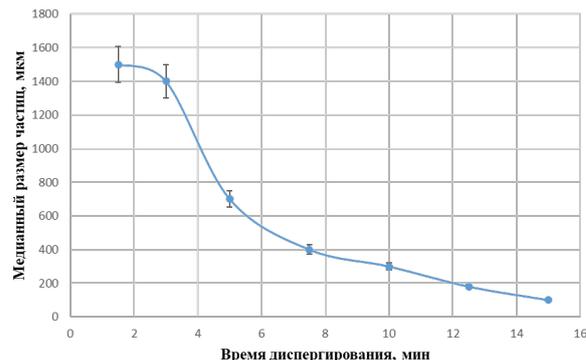


Рисунок 5 — Зависимость изменения медианного размера частиц ГМ от времени диспергирования при однократном диспергировании

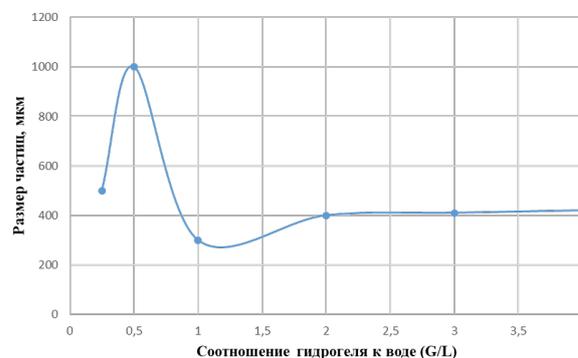
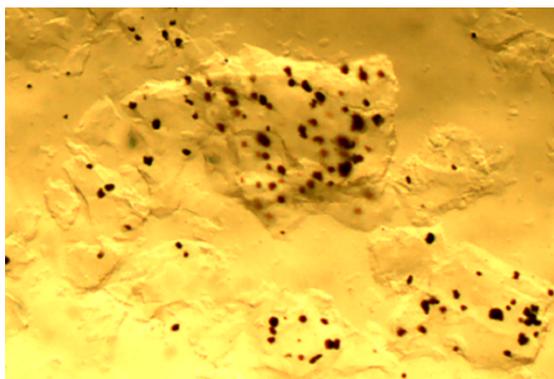


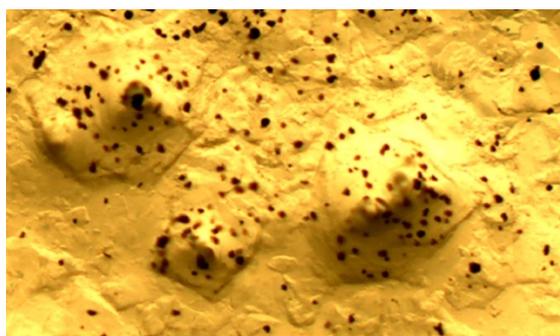
Рисунок 6 — Влияние числа разбавления гидрогеля водой (G/L) на средний размер частиц

В то же время можно заметить, что большее время диспергирования (2.5–12.5) мин при частоте вращения (6000–7000) об/мин позволяет уменьшить медианный размер частиц с 1300 до 200 мкм (рисунок 5).

Исследование влияния разбавления гидрогеля водой представлено на рисунке 6. Ввод воды влияет на дисперсность при её малых расходах. Увеличение количества воды до соотношения $L/G=1$ приводит к уменьшению диаметра частиц до 300 мкм, а дальнейшее разбавление не приводит к уменьшению размера частиц. Однако повторное диспергирование в несколько циклов увеличивает концентрацию люминофоров в объёме в системе ротор-статор (рисунок 7 и 8).



а)



б)

Рисунок 7 — Внешний вид частиц композиционного материала: а — с малой концентрацией частиц геля с наполнителем в водной среде; б — с высокой концентрацией частиц геля с наполнителем в водной среде (увеличение в 20 раз)

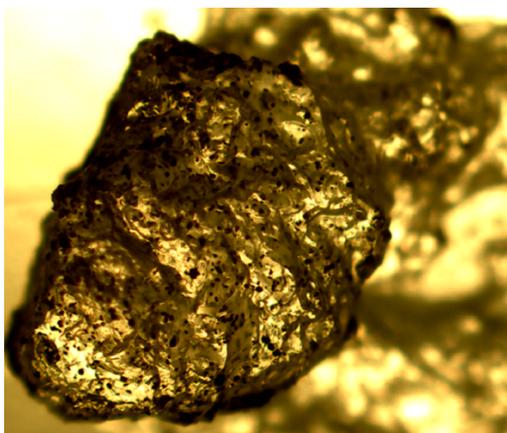


Рисунок 8 — Внешний вид отдельной частицы геля с наполнителем в трёхмерном пространственном изображении (увеличение в 40 раз)

На рисунке 8 видно, что по сравнению с рисунком 7 концентрация наполнителя выше в единице объёма ~ на 50%.

Фотографии на рисунках 7,8 получены с использованием растрового электронного микроскопа Tescan Vega 3SBU.

Заключение

По результатам работ можно сделать следующие выводы:

1) разработана комплексная установка для получения водных суспензий ПГ, которая позволяет получать комплексные гидрогелевые материалы для различных областей применения;

2) исследованы различные режимно-технологические параметры получения суспензий частиц ГМ и выявлено их влияние на качество конечного продукта:

- для более эффективного диспергирования предпочтительнее использовать акрилатные гидрогели с более высоким содержанием полимера;

- при увеличении времени диспергирования водных суспензий ГМ происходит пропорциональное уменьшение размера частиц при условии однократного диспергирования;

- при диспергировании суспензий ГМ в несколько этапов происходит снижение эффективности процесса диспергирования;

- увеличение концентрации ГМ в дисперсной среде повышает эффективность диспергирования;

- при увеличении частоты вращения диспергирующего агрегата и одинаковом времени диспергирования происходит поэтапное равномерное уменьшение максимального размера частиц $d(0.9)$ ГМ;

3) в результате диспергирования получается водная суспензия частиц ГМ с заданным распределением частиц по размерам, при этом в каждой частице равномерно распределён и прочно закреплён неорганический наполнитель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Байдакова М. В., Ситникова В. Е., Успенская М. В. и др. Исследование свойств композиционных гидрогелей на основе полиакрилата калия и белкового наполнителя. Известия СПбГТИ (ТУ), 2019, №48 (74), с. 115–119.
- [2]. Патент 2189382 РФ МПК C09K 17/40. Влагоднабухающий почвенный кондиционер и способ его получения / Байбурдов Т. А., Епишина Г. П., Ступенькова Л. Л., Черкасов А. В.; патентообладатели Благотворительный фонд "Возрождение садов на Руси" Епишина Галина Петровна – № 98113241/13; заявл. 02.07.1998; опубл. 20.09.2002, 9 с.
- [3]. Ихтиярова Г. А., Нуритдинова Ф. М., Курбонова Ф. Н. Получение гидрогеля на основе бетонитовой глины и акриламида. Наука, техника и образование, 2016, № 12, с. 16–17.
- [4]. Досева В. Н., Шенков С. Д., Брѣчков Хр. И., и др. Гидрогели на основе полиакриловой кислоты и изофорондиизоцианата. Высокомолекулярные соединения. Серия Б, 2002, Т. 44, № 8, с. 1444–1449.
- [5]. Патент 2536215 РФ МПК D21H 21/40 B41M 5/124 B42D 25/30. Способ изготовления защищенной бумаги. Защищенная бумага и ценный документ / Курятников А.Б., Павлов И. В., Корнилов Г. В., и др.; патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Гознак" (ФГУП "Гознак") – №2013115065/12; заявл. 04.04.2013; опубл. 20.12.2014, 17 с.
- [6]. Лопатин В. В., Аскадский А. А. Полиакриламидные гидрогели в медицине. М., Научный мир, 2004, 264 с.
- [7]. Валуев И. Л., Кудряшов В. К., Обыденнова И. В. и др. Исследование свойств гидрогелей на основе сополимеров 2-гидроксиэтилметакрилата. Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. 2003, т. 44, № 2, с. 149–152.
- [8]. Патент 2749268 РФ МПК C08F120/56 C08F2/10 C08F20/56. Способ получения полиакриламидного гидрогеля / Макаренков Д. А., Назаров В. И., Лобастов С. Л., Салькин С. Ю., Попов А. П.; патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Институт химических реакторов и особо чистых химических веществ национального исследовательского центра "Курчатовский институт" (НИЦ «Курчатовский институт — ИРЕА») – № 2020138052; заявл. 20.11.2020; опубл. 07.06.2021, 12 с.
- [9]. Макаренков Д. А. Энергосберегающие процессы многокомпонентных полидисперсных материалов с регулируемыми характеристиками: дисс. ... д-р тех. наук. Тамбов, 2015. 380 с.
- [10]. Макхамов М. А., Мухамедиев М. Г. Композиционные гели полиакриловой кислоты с бетонитовой глиной и их свойства. Universum: химия и биология, 2016, № 11, с. 24–28.
- [11]. Манаширов О. Я., Синельников Б. М., Воробьев В. А. Состояние и перспективы разработок антистоксовых люминофоров для визуализаторов ИК-излучения из области 0.8–13 мкм. Неорганические материалы, 1993, т. 29, № 10, с. 1322–1325.
- [12]. Фёдорова Е. М., Миловидов В. Н., Бухрякова В. А., и др. Композиционные материалы на основе акриламидного гидрогеля для защиты подлинности ценных бумаг. Все материалы. Энциклопедический справочник, 2016, № 3, с. 31–38.
- [13]. Dmitriev I. Swelling behavior and network characterization of hydrogels from linear polyacrylamide crosslinked with glutaraldehyde. Materials Today

Communications, 2015, vol. 4, pp. 93–100.
DOI: 10.1016/j.mtcomm.2015.06.005

[14]. Макаренков Д. А., Федорова Е. М., Бухрякова В. А., и др. Исследование процесса получения суспензии частиц композиционного гидрогелевого материала. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки», 2020, №4 (91), с. 123–137.

DOI: 10.18698/1812-3368-2020-4-123-137

[15]. Патент 2734607 РФ МПК В01J 2/10 В01J 2/20. Установка для

производства частиц композиционного гидрогелевого материала / Макаренков Д. А., Назаров В. И., Лобастов С. Л., Баринский Е. А., Салькин С. Ю.; патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Институт химических реакторов и особо чистых химических веществ национального исследовательского центра "Курчатовский институт"» (НИЦ «Курчатовский институт — ИРЕА») – №2019120809; заявл. 04.07.2019; опубл. 21.10.2020, 21 с.

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

Назаров Вячеслав Иванович — канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника отдела, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» — ИРЕА (Российская Федерация, 107076, Москва, ул. Богородский Вал, д. 3), доцент кафедры «Процессы и аппараты химических технологий», МИРЭА — Российский технологический университет (Российская Федерация, 119454, Москва, пр-т Вернадского, д. 78)

Лобастов Сергей Львович — канд. техн. наук, заместитель начальника отдела по научным исследованиям, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» — ИРЕА (Российская Федерация, 107076, Москва, ул. Богородский Вал, д. 3)

Салькин Станислав Юрьевич — заместитель начальника отдела по технологическим исследованиям, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» — ИРЕА (Российская Федерация, 107076, Москва, ул. Богородский Вал, д. 3)

Афлятунова Гузель Рауфовна — стажер-исследователь, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» — ИРЕА (Российская Федерация, 107076, Москва, ул. Богородский Вал, д. 3)

Бухрякова Валерия Андреевна — аспирант, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» — ИРЕА (Российская Федерация, 107076, Москва, ул. Богородский Вал, д. 3)

Peculiarities of technology for obtaining polyacrylamide functional hydrogels based on luminescent fillers

D. A. Makarenkov^{*,**,1}, V. I. Nazarov^{*,***}, S. L. Lobastov^{*}, S. Yu. Salykin^{*},
G. R. Aflyatunova^{*}, V. A. Bukhryakova^{*}

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

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

^{***} MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract

The article considers the technology for obtaining a composite hydrogel material in the form of an aqueous suspension. The issue of hydrogel material grinding in an aqueous medium is considered, with the production of an aqueous suspension of particles with the required particle size distribution. Polyacrylamide polymer was chosen as a composite hydrogel material, and anti-Stokes phosphors of various brands were used as a filler. The paper presents a method for obtaining a composite hydrogel material. For its implementation, a complex installation has been developed, containing a reactor with a set of agitators, high-speed gear cutters, as well as a special dispersion unit, including a pump and a two-zone disperser. Data on the study of the influence of technological and regime parameters of the equipment used on the granulometric composition of the obtained hydrogel material are presented. The effects on the quality of the obtained hydrogels of the frequency of rotation of the disperser, the dispersion time and the ratio of the hydrogel to water were revealed. Suspensions with a narrow granulometric composition from 1300 to 200 μm were obtained. Micrographs of a composite material based on a polyacrylamide hydrogel and an inorganic phosphor are presented. A description of the technology for obtaining a suspension of hydrogel material in a single technological cycle is given.

Keywords

Hydrogel material, polyacrylamide, inorganic fillers, luminophores, protective markers, polymerization, complex installation, micrographs, agricultural engineering, medicinal preparations

REFERENCES

- [1]. Baidakova M. V., Sitnikova V. E., Uspenskaia M. V. et al. Issledovanie svoystv kompozitsionnykh gidrogelei na osnove poliakrilata kaliia i belkovogo napolnitelia [Study of the properties of composition hydrogels based on potassium polyacrylate and protein filler]. *Izvestiia SPbGTI (TU)* [Bulletin of St PbSIT(TU)], 2019, no. 48 (74), pp. 115–119. (In Russ.)
- [2]. Patent 2189382 RF MPK C09K 17/40. Vlagonabukhaiushchii pochvennyi

¹ Corresponding author

Email: makarenkovd@mail.ru

konditioner i sposob ego polucheniia [Moisture-swelling soil conditioner and a method of preparation thereof] / Baiburudov T. A., Epishina G. P., Stupen'kova L. L., Cherkasov A. V; patentee Blagotvoritel'nyi fond "Vozrozhdenie sadov na Rusi" Epishina Galina Petrovna – №98113241/13; date of filing of the appl. 02.07.1998; date of publ. 20.09.2002, 9 p. (In Russ.)

[3]. Ikhtiarova G. A., Nuritdinova F. M., Kurbonova F. N. Poluchenie gidrogelia na osnove betonitovoi gliny i akrilamida [Obtaining a hydrogel based on bentonite clay and acrylamide]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie* [Science, technique and education], 2016, no. 12, pp. 16–17. (In Russ.)

[4]. Doseva V. N., Shenkov S. D., Br"chkov Khr. I., Baranovskii V. Iu. et al. Gidrogeli na osnove poliakrilovoi kisloty i izoforondiizotsianata [Hydrogels based on poly(acrylic acid) and isophorone diisocyanate]. *Vysokomolekuliarnye soedineniia. Seriya B* [Polymer Science. Series B], 2002, vol. 44, no. 8, pp. 1444–1449. (In Russ.)

[5]. Patent 2536215 RF MPK D21H 21/40 B41M 5/124 B42D 25/30. Sposob izgotovleniia zashchishchennoi bumagi. Zashchishchennaia bumaga i tsennyi document [Method of production of security paper, security paper and valuable document] / Kuriatnikov A. B., Pavlov I. V., Kornilov G. V. et al.; patentee Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe predpriiatie "Goznak" (FGUP "Goznak") – №2013115065/12; date of filing of the appl. 04.04.2013; date of publ. 20.12.2014, 17 p. (In Russ.)

[6]. Lopatin V. V., Askadskii A. A. Poliakrilamidnye gidrogeli v meditsine [Polyacrylamide hydrogels in medicine]. M., Nauchnyi mir Publ., 2004. 264 p. (In Russ.)

[7]. Valuev I. L., Kudriashov V. K., Obydenнова I. V. et al. Issledovanie svoistv gidrogelei na osnove sopolimerov 2-gidroksietilmetakrilata [An investigation of properties of hydrogels based on 2-hydroxyethylmethacrylate copolymers]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2: Khimiia* [Moscow University Chemistry Bulletin. Series 2. Chemistry]. 2003, vol. 44, no. 2, pp. 149–152. (In Russ.)

[8]. Patent 2749268 RF MPK C08F120/56 C08F2/10 C08F20/56. Sposob polucheniia poliakrilamidnogo gidrogelia / Makarenkov D. A., Nazarov V. I., Lobastov S. L. et al.; patentee Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe predpriiatie "Institut khimicheskikh reaktorov i osobochistykh khimicheskikh veshchestv Natsional'nogo issledovatel'skogo tsentra "Kurchatovskii institut" (NITs "Kurchatovskii institut — IREA") – № 2020138052; date of filing of the appl. 20.11.2020; date of publ. 07.06.2021, 12 p. (In Russ.)

[9]. Makarenkov D. A. Energosberegaiushchie protsessy mnogokomponentnykh polidispersnykh materialov s reguliruemymi kharakteristikami [Energy-saving processes of multi-component polydisperse materials with controlled characteristics]: diss. ... d-r tekhn. nauk. Tambov, 2015. 380 p. (In Russ.)

[10]. Makkhamov M. A., Mukhamediev M. G. Kompozitsionnye geli poliakrilovoi kisloty s betonitovoi glinoi i ikh svoistva [Compositional gels of polyacrylic acid with bentonite clay and their properties]. *Universum: khimiia i biologiia* [Universum: chemistry and biology], 2016, no. 11, pp. 24–28. (In Russ.)

[11]. Manashirov O. Ia., Sinel'nikov B. M., Vorob'ev V. A. Sostoianie i perspektivy razrabotok anistoksovykh liuminoforov dlia vizualizatorov IK-izlucheniia iz oblasti 0,8–13 mkm [State and prospects of antistox phosphors development for infrared imagers from 0.8–13 microns]. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic materials], 1993, vol. 29, no. 10, pp. 1322–1325. (In Russ.)

[12]. Fedorova E. M., Milovidov V. N., Bukhriakova V. A. et al. Kompozitsionnye materialy na osnove akrilamidnogo gidrogelia dlia zashchity podlinnosti tsennykh bumag [Composite materials based on acrylamide hydrogel to protect the authenticity of securities]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik* [Polymer Science, Series D], 2016, no. 3, pp. 31–38.

[13]. Dmitriev I. Swelling behavior and network characterization of hydrogels from linear polyacrylamide crosslinked with glutaraldehyde. *Materials Today Communications*, 2015, v. 4, pp. 93–100.

[14]. Makarenkov D. A., Fedorova E. M., Bukhriakova V. A. et al. Issledovanie protsessy polucheniia suspenzii chastits kompozitsionnogo gidrogelevogo materiala [Investigating the process of producing composite hydrogel particle slurry]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Estestvennye nauki»* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences], 2020, no. 4(91), pp. 123–137. (In Russ.)

DOI: 10.18698/1812-3368-2020-4-123-137

[15]. Patent 2734607 RF MPK B01J 2/10 B01J 2/20. Ustanovka dlia proizvodstva chastits

kompozitsionnogo gidrogelevogo materiala [Apparatus for producing composite hydrogel material particles] / Makarenkov D. A., Nazarov V. I., Lobastov S. L. et al.; patentee Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe predpriiatie "Institut khimicheskikh reaktorov i osobo chistykh khimicheskikh veshchestv natsional'nogo issledovatel'skogo tsentra "Kurchatovskii institut" (NITs "Kurchatovskii institut — IREA") - №2019120809; date of filing of the appl. 04.07.2019; date of publ. 21.10.2020, 21 p. (In Russ.)

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

Nazarov V. I. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Senior Research Officer, NRC «Kurchatov Institute» — IREA (Vernadsky Ave., 78, Moscow, 119454, Russian Federation).

Lobastov S. L. — Cand. Sc. (Eng.), Deputy Head of the Department Deputy for Scientific Research, National Research Center «Kurchatov Institute» — IREA (Bogorodsky Val., 3, Moscow, 107076, Russian Federation).

Salykin S. Yu. — Deputy Head of the Department for Technological Research, National Research Center «Kurchatov Institute» — IREA (Bogorodsky Val., 3, Moscow, 107076, Russian Federation).

Aflyatunova G. R. — Research Assistant, NRC «Kurchatov Institute» — IREA (Bogorodsky Val., 3, Moscow, 107076, Russian Federation).

Bukhryakova V. A. — Postgraduate student student, National Research Center «Kurchatov Institute» — IREA (Bogorodsky Val., 3, Moscow, 107076, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Особенности технологии получения полиакриламидных функциональных гидрогелей на основе люминесцентных наполнителей / Д. А. Макаренков, В. И. Назаров, С. Л. Лобастов, С. Ю. Салыкин, Г. Р. Афлятунова, В. А. Бухрякова // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. №2(9). С. 18 – 32

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-18-32

Please cite this article as:

Makarenkov D. A., Nazarov V. I., Lobastov S. L., Salykin S. Yu., Aflyatunova G. R., Bukhryakova V. A. Peculiarities of technology for obtaining polyacrylamide functional hydrogels based on luminescent fillers. *Industrial processes and Technologies*, 2023, vol. 3, no. 2(9), pp. 18 – 32.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-18-32

Развитие модели дискретной фазы для расчёта ультразвуковой коагуляции взвешенных частиц в эккартовских течениях

А. В. Шалунов^{*,1}, Р. Н. Голых^{*}, В. Н. Хмелёв^{*}, В. А. Нестеров^{*},
А. С. Боченков^{*}

** Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», Бийск, Россия*

Аннотация

Одним из наиболее эффективных способов улавливания аэрозольных частиц является предварительное объединение частиц в агломераты под действием синусоидальных ультразвуковых (УЗ) колебаний высокой интенсивности (ультразвуковая агломерация) для дальнейшего улавливания укрупнённых частиц традиционными методами (инерционное или гравитационное осаждение, фильтрация сквозь пористый материал и т. д.). На сегодняшний день эффективность УЗ агломерации многократно доказана для частиц размером более 2.5 мкм [2-4]. Однако ультразвуковая агломерация, основанная на известных механизмах взаимодействия частиц, оказывается мало эффективной при воздействии на частицы размером менее 2.5 мкм и особенно менее 1 мкм. При этом возможности линейного акустического поля на сегодняшний день хорошо изучены, и установлено, что воздействие линейным акустическим полем не обеспечивает эффективной коагуляции частиц PM2.5. А при повышении уровня звукового давления линейного акустического поля укрупнённые частицы (особенно, если речь идёт о твёрдых частицах) начинают разрушаться. Поэтому авторами предложено задействовать нелинейные эффекты, которые заключаются в формировании вихревых акустических (эккартовских) течений, способных вызвать локальное повышение концентрации частиц и, следовательно, увеличение эффективности коагуляции. Установлено, что формирование вихревых акустических потоков в резонансном промежутке способно дополнительно увеличить эффективность ультразвуковой коагуляции не менее чем в 1.5 раза [3].

Ключевые слова

Эккартовские течения, коагуляция, ультразвук, излучатель, численная модель.

*Исследования выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 19-19-00121*

Введение

Актуальность проблемы защиты водного бассейна от загрязнения

различными дисперсными частицами последние десятилетия будет только возрастать. При этом значительные усилия

¹ Для переписки:

Email: shalunov@u-sonic.ru

мирового сообщества будут направлены, прежде всего, на удаление из газовых сред частиц микронных и субмикронных размеров (PM 2.5 и менее), которые представляют наибольшую опасность [5].

На сегодняшний день одним из наиболее эффективных способов улавливания аэрозольных частиц является предварительное объединение частиц в агломераты под действием синусоидальных ультразвуковых (УЗ) колебаний высокой интенсивности (ультразвуковая агломерация) для дальнейшего улавливания укрупненных частиц традиционными методами (инерционное или гравитационное осаждение, фильтрация сквозь пористый материал и т. д.) [3, 6–7].

На сегодняшний день эффективность УЗ агломерации многократно доказана для частиц размером более 2.5 мкм. Многими авторами указываются режимы агломерации [3–8], при которых достигается наибольшая степень укрупнения, и предлагается специальное оборудование [8–10], позволяющее коагулировать частицы как на открытом пространстве, так и в замкнутом объёме.

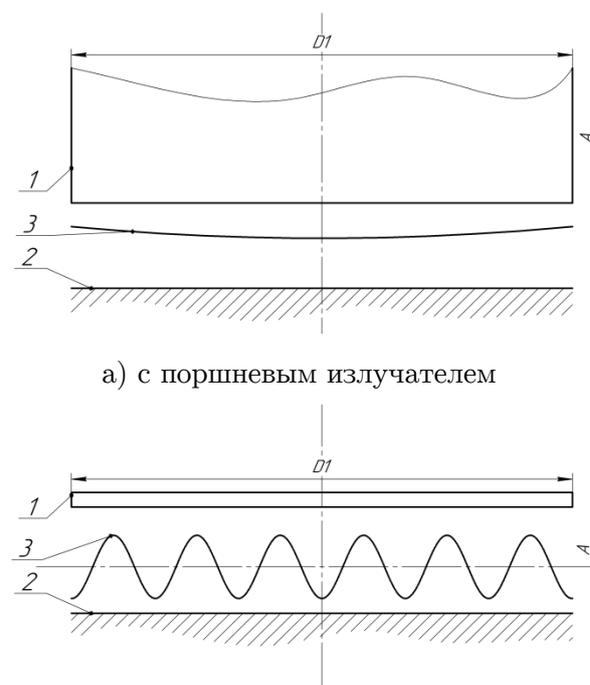
Однако ультразвуковая агломерация, основанная на известных механизмах взаимодействия частиц, оказывается мало эффективной при воздействии на частицы размером менее 2.5 мкм и особенно менее 1 мкм. При этом возможности линейного акустического поля на сегодняшний день хорошо изучены и установлено, что воздействие линейным акустическим полем не обеспечивает эффективной коагуляции частиц PM2.5 [11]. А при повышении уровня звукового давления линейного акустического поля скоагулированные частицы (особенно, если речь идёт о твёрдых частицах) начинают разрушаться.

Необходимость решения проблемы требует исследования процесса взаимодействия тонкодисперсных частиц при

различных условиях УЗ воздействия для выявления новых нелинейных эффектов (вихревых акустических или экартовских течений, способных из-за инерции частиц локально повысить концентрацию), способных увеличить скорость коагуляции таких частиц [3, 11–12].

Модель формирования вихревых акустических течений

На сегодняшний день формирование вихревых акустических течений при различных диапазонах частот является хорошо исследованным. Однако не изучался вопрос моделирования коагуляции дисперсных частиц с учётом вихревых движений и нелинейных эффектов влияния вихрей на скорость коагуляции [12–13].



а) с поршневым излучателем

б) с изгибно-колеблющимся излучателем
1 – излучатель; 2 – отражатель;
3 – форма (распределение) колебаний
излучающей поверхности

Рисунок 1 – Газовые промежутки для коагуляции аэрозолей с использованием различных излучателей

Конечной целью исследования модели является изучение влияния акустических течений на эффективность агломерации частиц и определение эффективности

агломерации частиц, определяемой по остаточной концентрации аэрозоля (чем меньше остаточная концентрация, тем выше эффективность) согласно следующему выражению:

$$\xi = \frac{N(T)}{N(0)} \cdot 100\% \quad (1)$$

где $N(t)$ — суммарное количество частиц в воздушном промежутке в момент времени t ; T — продолжительность воздействия, с; $N(0)$ — суммарное количество частиц в начальный момент времени.

Предложенное математическое описание основывается на стандартных уравнениях формирования акустического поля и вихревого течения, возникающего при разложении удельного импульса газовой фазы до второго порядка, и впервые предложенных авторами уравнениях движения и коагуляции дисперсных частиц в вихревых акустических течениях с использованием подхода дискретной фазы.

Подмодель акустического поля в воздушном промежутке основана на уравнении Гельмгольца, справедливом для линейных акустических колебаний, учитывающем их поглощение в газовой фазе.

Представленные уравнения позволили рассчитать УЗ поле, создаваемое излучателями с различными распределениями амплитуд колебаний:

1. Однородное распределение колебаний, которое создаётся с помощью поршневого излучателя (рисунок 1а).

$$A(x, y) \equiv 1 \quad (2)$$

2. Синусоидальное распределение колебаний, создаваемое изгибно-колеблющимся излучателем (рисунок 1б).

$$A(x, y) = \cos\left(\pi n \frac{2(x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}}}{D}\right) \quad (3)$$

где n — количество «нулей» колебаний излучателя.

Нелинейные уравнения формирования вихревых акустических течений решаются

итерационным методом, согласно которому решается последовательность линейных задач методом конечных элементов. При этом граничные условия задаются только первого рода и только для скорости (скорость акустических течений согласно условию прилипания на границе расчётной области равна нулю [13]).

Уравнение, описывающее изменение функции тока, определяющее положение частицы и учитывающее влияние потенциального течения (стационарный газовый поток, который формируется независимо от акустического поля), выглядит следующим образом:

$$u = \mathbf{U} + \mathbf{V} - \tau(\mathbf{U}, \nabla)U \quad (4)$$

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{\int_{\Gamma} \left(\sum_{i=1}^2 \frac{\partial \psi}{\partial x_i} \frac{V_i}{\|U\|} - \tau \sum_{i,j=1}^2 \frac{\partial \psi}{\partial x_i} \frac{U_j}{\|U\|} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) d\Gamma}{\int_{\Gamma} \frac{d\Gamma}{\|U\|}} \quad (5)$$

где \mathbf{V} — вектор скорости стационарного газового потока, м/с; \mathbf{U} — вектор скорости вихревого акустического течения, м/с.

При наличии стационарного газового потока возможен переход частицы с вихря на вихрь. Переход частицы с вихря на вихрь осуществляется при её нахождении на периферии вихря, где функция тока равна 0. В противном случае частица остаётся во внутренней области сечения вихря на протяжении конечного времени.

Для расчёта коагуляции частиц используется вероятностный подход Зоммерфельда [8], модифицированный усреднением по полному обороту линии тока.

Далее описан более полный алгоритм расчёта движения и коагуляции частиц в вихревых акустических течениях.

Алгоритм заключается в том, что частицы объединяются в группы. Каждая группа представляет собой совокупность частиц, имеющих одинаковые размеры из

дискретного ряда типоразмеров и близкие значения функций тока.

Таким образом, группа частиц характеризуется следующими параметрами:

1. Индекс типоразмера частиц k из дискретного набора типоразмеров: $d_k = k^{\frac{1}{3}} d_0$, где d_0 — условный диаметр наименьшей частицы, м.

2. Значение функции тока для группы Ψ , которое определяет «индекс» линии тока, на которой находится в данный момент группа.

3. Количество частиц в группе на единицу поперечного размера канала, $n - m^{-1}$.

При этом одна группа частиц находится в пределах одного вихря. Между соседними вихрями группа переходит целиком.

Расчёт производится для каждого отдельного вихря независимо за исключением случаев перехода группы частиц между соседними вихрями.

Алгоритм расчёта частицы в пределах отдельного вихря состоит из следующих шагов.

1. Инициализация ансамбля групп частиц. При инициализации принимается, что частицы распределены равномерно по всему объёму вихря. Инициализация проводится при заданном дисперсном составе частиц (заданы массовые концентрации частиц различных типоразмеров G_k , где G_k — массовая концентрация частиц

типоразмера d_k , кг/м³; количество типоразмеров частиц, присутствующих в исходном фракционном составе, $k_{\max, \text{init}}$). Кроме того, задаётся минимальное количество групп частиц N , участвующих в расчёте.

2. Определение интервала времени τ , в течение которого производится расчёт движения частиц без столкновений (речь идёт об интервале времени, в течение которого коагуляции не происходит). Определение интервала времени состоит из следующих этапов:

2.1. Цикл по каждому отрезку разбиения множества $[0; \psi_{\max}]$ (ψ_{\max} — максимальное значение функции тока в отдельном вихре, м²/с) — $[\frac{j}{K} \psi_{\max}; \frac{j+1}{K} \psi_{\max}]$. На каждом отрезке разбиения определяется время, в течение которого столкнутся не менее M пар частиц на единицу поперечного размера канала.

Интервал времени для отрезка $[\frac{j}{K} \psi_{\max}; \frac{j+1}{K} \psi_{\max}]$ определяется по уравнению (6).

Далее интервал времени определяется исходя из выражения:

$$\tau = \min \left\{ \min_{k=1 \dots k_{\max}} \tau_k, \tau_{\text{up}} \right\} \quad (7)$$

где τ_{up} — максимально допустимое значение времени, которое определяется временем перехода группы частиц между соседними вихрями, с.

$$\tau_j = \min_{k=1 \dots k_{\max}} \left| \frac{M}{\Delta S \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} \beta_{j,i,k-i} \langle n \rangle_{j,i} \langle n \rangle_{j,k-i} - \langle n \rangle_{j,k} \sum_{i=1}^{k_{\max}} \beta_{j,i,k} \langle n \rangle_{j,i} \right)} \right| \quad (6)$$

где $\beta_{j,i,k}$ — вероятность столкновения частиц, м³/с; $\langle n \rangle_{j,k}$ — усреднённая концентрация частиц k -го типоразмера по площади области, в которой значение функции тока принадлежит отрезку $[\frac{j}{K} \psi_{\max}; \frac{j+1}{K} \psi_{\max}]$, м⁻³.

3. Добавление новых групп частиц и пропорциональное уменьшение количества частиц в существующих группах в соответствии с уравнением Смолуховского для усреднённых концентраций:

$$\frac{d}{dt} \langle n \rangle_{j,k} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} \beta_{j,i,k-i} \langle n \rangle_{j,i} \langle n \rangle_{j,k-i} - \langle n \rangle_{j,k} \sum_{i=1}^{k_{\max}} \beta_{j,i,k} \langle n \rangle_{j,i} \quad (8)$$

Шаг 3 выполняется для каждого отрезка значений функции тока $\left[\frac{j}{K} \psi_{\max}; \frac{j+1}{K} \psi_{\max} \right]$. Т.е. на шаге 3 рассматриваются группы частиц, у которых параметр Ψ принимает значение из отрезка $\left[\frac{j}{K} \psi_{\max}; \frac{j+1}{K} \psi_{\max} \right]$, затем согласно выражениям, приведённым в описании шага 2, рассчитывается усреднённая концентрация частиц каждого типоразмера,

рассчитываются вероятности столкновения. Затем, согласно уравнению Смолуховского [7], пропорционально изменяется количество частиц в существующих группах без изменения остальных параметров. После выполнения данной операции добавляются новые группы частиц тех типоразмеров, которые к данному моменту в системе групп частиц не присутствовали. Условие добавления группы частиц с новым типоразмером — количество частиц в группе превышает $M/2$. Функция тока для каждой новой добавленной группы будет иметь значение $\frac{j+1}{K} \psi_{\max}$.

4. Изменение значений функций тока каждой группы в соответствии с уравнением (9).

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\int_{\Gamma} \left(\sum_{i=1}^2 \frac{\partial \psi}{\partial x_i} \frac{V_i}{\|U\|} - \tau \sum_{i,j=1}^2 \frac{\partial \psi}{\partial x_i} \frac{U_j}{\|U\|} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) d\Gamma}{\int_{\Gamma} \frac{d\Gamma}{\|U\|}} \quad (9)$$

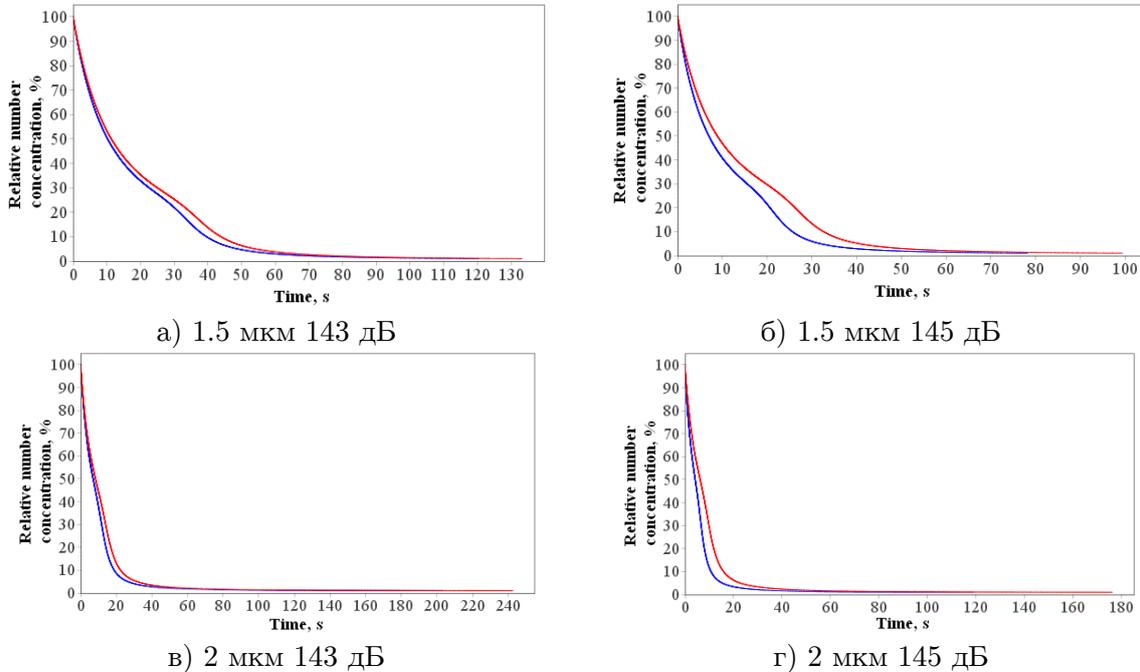


Рисунок 2 — Зависимости относительной концентрации частиц от времени при различных начальных размерах и уровнях звукового давления (красные линии — зависимости при использовании поршневого излучателя, синие линии — зависимости при использовании изгибно-колеблющегося излучателя)

Изменение значений происходит в течение интервала времени τ .

5. Увеличение текущего момента времени t на величину τ .

6. Если t больше заданного времени расчёта, то переход к шагу 7, иначе переход к шагу 2.

7. Расчёт эффективности коагуляции.

Обсуждение полученных результатов

Полученные результаты расчетов представлены на рисунке 2.

Как следует из представленного рисунка 2, при использовании изгибающегося излучателя, способного сформировать множество вихревых акустических течений, скорость коагуляции возрастает до 1.5 раз.

Заключение

Таким образом для повышения скорости коагуляции предложено задействовать нелинейные эффекты, которые заключаются в формировании вихревых акустических (эккартовских) течений, способных вызвать локальное повышение концентрации частиц и, следовательно, увеличение эффективности коагуляции. Предложена модифицированная численная модель ультразвуковой коагуляции, которая учитывает локальное уплотнение частиц за счёт эккартовских течений.

Установлено, что формирование вихревых акустических потоков в резонансном промежутке способно дополнительно увеличить эффективность ультразвуковой коагуляции не менее чем в 1.5 раза

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Halonen J., Lanki T., Yli-Tuomi T., et al. Particulate air pollution acute cardio respiratory hospital admissions and mortality among the elderly. *American Journal of Epidemiology*, 2009, vol. 20(1), pp. 1430153.

[2]. Khmelev V. N., Shalunov A. V., Bochenkov A. S., Nesterov V. A. et al. Experimental Stand for the Research of the Process of Ultrasonic Coagulation of Aerosols *20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2019*, 2019, pp. 221-226.

[3]. Khmelev V. N., Nesterov V. A., Bochenkov A. S., Shalunov A. V. The Limits of fine particles ultrasonic coagulation. *Symmetry*, 2021, vol. 13(9), pp. 1–19 DOI: 10.3390/sym13091607.

[4]. Gallego-Juarez J. A., Rodriguez G., Acosta V., Riera E. Power ultrasonic transducer with extensive radiator for industrial processing. *Ultrasonic Sonochemistry*, 2010, vol. 17, pp. 954–964.

[5]. Hext P. M., Rogers K. O., Paddle G. M., Evans M. et al. *The health effects of PM2.5 (including ultrafine particles)*. 1999 (Brussels: Concawe).

[6]. Chen H., Liu W., Li J., Xun X., Shen X. Experimental Study on Acoustic Agglomeration of Fine Particles from Coal Combustion. *International Conference on Digital Manufacturing and Automation*. 2010, vol. 1, pp. 702-705.

[7]. Andres R. R., Acosta V. M., Lucas M., Riera E. Modal analysis and nonlinear characterization of an airborne power ultrasonic transducer with rectangular plate radiator. *Ultrasonic*. 2018, vol. 82, pp. 954–964.

[8]. Sheng C., Shen X. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles. *Aerosol Science and Technology*. 2007, vol. 41, pp. 1–13.

[9]. Sarabia E., Gallego-Juarez J. A., Rodrigues-Corral G., Elvira-Segura L., Gonzalez-Gomaz I. Application of high-power ultrasound enhance fluid/solid particle separation processes. *Ultrasonics*. 2000, vol. 38, pp. 642–646.

[10]. Khmelev V. N., Shalunov A. V., Nesterov V. A., Dorovskikh R. S.,

Golykh R. N. Providing the Efficiency and Dispersion Characteristics of Aerosols in Ultrasonic Atomization. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017, vol. 90(4), pp. 831–844.

[11]. Khmelev V. N., Nesterov V. A., Shalunov A. V., Barsukov R. V., Tsyganok S. N. Longitudinally oscillating ultrasonic emitter for influencing gas-dispersed system. *Journal of Physics*. 2020, vol. 1679, pp. 1-8.

DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022008.

[12]. Khmelev V. N., Nesterov V. A., Shalunov A. V. Increasing the uniformity of distribution of the oscillations of the disc ultrasound radiators for gas media. *IOP*

Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 862, pp. 1–8.

DOI: 10.1088/1757-899X/862/6/062079.

[13]. Хмелев В. Н., Шалунов А. В., Голых Р. Н., Нестеров В. А., Боченков А. С. Моделирование вихревых акустических течений в воздушном промежутке как фактора бесконтактной ультразвуковой интенсификации химико-технологических процессов. *Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (ISTS "EESTE-2021")*, 2021, с. 190–194.

Шалунов Андрей Викторович — д-р техн. наук, заведующий кафедрой методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, д. 27)

Голых Роман Николаевич — д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, д. 27)

Хмелёв Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заместитель директора по научной работе, кафедра МСИА, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, д. 27)

Нестеров Виктор Александрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, д. 27)

Боченков Александр Сергеевич — аспирант, кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, д. 27)

Improvement of the Discrete Phase Model for Calculating Ultrasonic Coagulation of Suspended Particles in Eckartian Flows

A. V. Shalunov^{*1}, R. N. Golykh^{*}, V. N. Khmelev^{*}, V. A. Nesterov^{*}, A. S. Bochenkov^{*}

** Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University,
Biysk, Russia*

Abstract

One of the most effective methods for trapping aerosol particles is the preliminary combination of particles into agglomerates under the action of high-intensity sinusoidal ultrasonic (US) oscillations (ultrasonic agglomeration) for further trapping of coarse particles by traditional methods (inertial or gravitational settling, filtration through a porous material, etc.). To date, the effectiveness of ultrasonic agglomeration has been repeatedly proven for particles larger than 2.5 μm [2–4]. However, ultrasonic agglomeration, based on the known mechanisms of particle interaction, is not very effective when exposed to particles smaller than 2.5 μm and especially less than 1 μm . At the same time, the capabilities of a linear acoustic field are well studied today and it has been established that exposure to a linear acoustic field does not provide effective coagulation of PM2.5. And with an increase in the sound pressure level of a linear acoustic field, enlarged particles (especially when it comes to solid particles) begin to break down. Therefore, the authors proposed to use nonlinear effects, which consist in the formation of vortex acoustic (Eckart) flows that can cause a local increase in the concentration of particles and, consequently, an increase in the efficiency of coagulation. It has been established that the formation of vortex acoustic flows in the resonant gap can additionally increase the efficiency of ultrasonic coagulation by at least 1.5 times [3].

Keywords

Eckartian flows, coagulation, ultrasonic, radiator, numerical model.

REFERENCES

- [1]. Halonen J., Lanki T., Yli-Tuomi T., et al. Particulate air pollution acute cardio respiratory hospital admissions and mortality among the elderly. *American Journal of Epidemiology*, 2009, vol. 20(1), pp. 1430153.
- [2]. Khmelev V. N., Shalunov A. V., Bochenkov A. S., Nesterov V. A. et al. Experimental Stand for the Research of the Process of Ultrasonic Coagulation of Aerosols *20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and*

¹ *Corresponding author:*
Email: shalunov@u-sonic.ru

Electron Devices. EDM'2019, 2019, pp. 221-226.

[3]. Khmelev V. N., Nesterov V. A., Bochenkov A. S., Shalunov A. V. The Limits of fine particles ultrasonic coagulation. *Symmetry*, 2021, vol. 13(9), pp. 1–19 DOI: 10.3390/sym13091607.

[4]. Gallego-Juarez J. A., Rodriguez G., Acosta V., Riera E. Power ultrasonic transducer with extensive radiator for industrial processing. *Ultrasonic Sonochemistry*, 2010, vol. 17, pp. 954–964.

[5]. Hext P. M., Rogers K. O., Paddle G. M., Evans M. et al. *The health effects of PM2.5 (including ultrafine particles)*. 1999 (Brussels: Concawe).

[6]. Chen H., Liu W., Li J., Xun X., Shen X. Experimental Study on Acoustic Agglomeration of Fine Particles from Coal Combustion. *International Conference on Digital Manufacturing and Automation*. 2010, vol. 1, pp. 702-705.

[7]. Andres R. R., Acosta V. M., Lucas M., Riera E. Modal analysis and nonlinear characterization of an airborne power ultrasonic transducer with rectangular plate radiator. *Ultrasonic*. 2018, vol. 82, pp. 954–964.

[8]. Sheng C., Shen X. Simulation of acoustic agglomeration processes of poly-disperse solid particles. *Aerosol Science and Technology*. 2007, vol. 41, pp. 1–13.

[9]. Sarabia E., Gallego-Juarez J. A., Rodrigues-Corral G., Elvira-Segura L., Gonzalez-Gomaz I. Application of high-power ultrasound enhance fluid/solid particle separation processes. *Ultrasonics*. 2000, vol. 38, pp. 642–646.

[10]. Khmelev V. N., Shalunov A. V., Nesterov V. A., Dorovskikh R. S., Golykh R. N.

Providing the Efficiency and Dispersion Characteristics of Aerosols in Ultrasonic Atomization. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017, vol. 90(4), pp. 831–844.

[11]. Khmelev V. N., Nesterov V. A., Shalunov A. V., Barsukov R. V., Tsyganok S. N. Longitudinally oscillating ultrasonic emitter for influencing gas-dispersed system. *Journal of Physics*. 2020, vol. 1679, pp. 1-8.

DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022008.

[12]. Khmelev V. N., Nesterov V. A., Shalunov A. V. Increasing the uniformity of distribution of the oscillations of the disc ultrasound radiators for gas media. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 862, pp. 1–8.

DOI: 10.1088/1757-899X/862/6/062079.

[13]. Khmelev V. N., Shalunov A. V., Golykh R. T., Nesterov V. A., Bochenkov A. S. Modelirovaniye vikhrevykh akusticheskikh techeniy v vozdushnom promezhutke kak faktora beskontaktnoy ull'trazvukovoy intensifikatsii khimiko-tekhnologicheskikh protsessov [Modeling of vortex acoustic flows in the air gap as a factor of non-contact ultrasonic intensification of chemical-technological processes] *Povysheniye energoresursoeffektivno-sti i ekologicheskoy bezopasnosti pro-tsessov i apparatov khimicheskoy i smezhnykh otrasley promyshlennosti [Improving the energy and resource efficiency and environmental safety of processes and apparatuses in the chemical and related industries] (ISTS "EESTE-2021")*, 2021, c. 190–194.

Shalunov A. V. — Dr. Sc.(Eng.), Head of the Department of Methods and Measuring Instruments and Automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Golykh R. N. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Khmelev V. N. — Dr. Sc. (Eng.), professor, deputy director for research, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Nesterov V. A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Bochenkov A. S. — Postgraduate student, Department of Methods and Measuring Instruments and Automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Развитие модели дискретной фазы для расчёта ультразвуковой коагуляции взвешенных частиц в экартовских течениях / А. В. Шалунов, Р. Н. Голых, В. Н. Хмелёв, В. А. Нестеров, А. С. Боченков // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 2(9). С. 33 – 42.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-33-42

Please cite this article as:

Shalunov A. V. , Golykh R. N., Khmelev V. N., Nesterov V. A., Bochenkov A. S. Improvement of the Discrete Phase Model for Calculating Ultrasonic Coagulation of Suspended Particles in Eckartian Flows. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 2(9), pp. 33 – 42.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-33-42

Исследование свойств текстильных материалов для защиты от термического воздействия электрической дуги

Ю. С. Шустов^{*1}, Ж. С. Пушкина^{*}

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

Аннотация

Вопросам разработки защитной одежды с каждым годом уделяется всё большее внимание, особенно если это связано с изготовлением рабочей одежды для защиты от термических воздействий. От качества материалов, из которых выполнена специальная одежда, во многом зависят защитные функции спецодежды, а значит и здоровье окружающих. В качестве объектов исследования были взяты 3 образца тканей различного волокнистого состава. В работе приведены сравнительные характеристики физико-механических свойств рассматриваемых тканей. Уровень защиты определяется максимальным значением падающей энергией теплового потока электрической энергии, при котором защитная одежда способна предохранять пользователя от ожогов 2 степени. Рассмотрены уровни защиты верха одежды, а также рассмотрены различные виды многослойных пакетов материалов. В результате исследования выявлены пакеты материалов, соответствующие требованиям стойкости к конвективному теплу.

Ключевые слова

Специальная одежда, воздействие электрической дуги, стирка, эксплуатация

Введение

В настоящее время рынок специальной одежды развивается достаточно динамично. Спецодежда включает: ведомственную, рабочую, защитную, корпоративную и др. Развитие происходит за счет того, что специалисты различных профессий испытывают потребность в использовании данного вида продукции.

Несмотря то что на рынке представлено достаточно большое количество разнообразных средств индивидуальной защиты, российские и иностранные компании все равно продолжают расширять

свой ассортимент, проектировать и создавать новые ткани со специальными свойствами.

От материала, выбранного для изготовления профессиональной одежды, во многом зависят ее специальные функции. При проектировании спецодежды также необходимо учитывать, что в процессе эксплуатации специальной одежды на нее одновременно действуют сразу несколько негативных составляющих окружающей среды, что делает создание универсальной спецодежды достаточно сложной задачей [1–5].

¹ Для переписки:

Email: shustov-yus@rguk.ru

В работе основной акцент был сделан на материалы для рабочей одежды для защиты от термических воздействий. Исходя из вышеизложенного, в качестве объектов исследования использовались ткани различного волокнистого состава и различных производителей. Данные ткани были выбраны для проведения испытаний, так как они являются наиболее распространенными и часто используемыми для электротехнических работ, что было подтверждено экспертным опросом, проведенным на строительных предприятиях. Было выбрано 3 вида тканей саржевого переплетения, представленных в таблице 1 [6].

Для производителей специальной одежды является важным обеспечение должного качества продукции, высоких защитных, эксплуатационных, технических и гигиенических свойств.

От качества материалов, из которых выполнена специальная одежда, во многом зависят защитные функции спецодежды, а значит и здоровье работающих. Требования к качеству материалов для изготовления специальной одежды для защиты от термических рисков электрической дуги регламентируются рядом нормативных документов.

Значимыми показателями качества, оказывающими наибольшее влияние на качество материалов, являются стойкость к термическому воздействию электрической дуги, поверхностная плотность, огнестойкость в течение 30 с, термостойкость при температуре 260 °С, сырьевой состав.

В таблице 2 приведены результаты сравнения испытаний верха в исходном виде, используемых для изготовления специальных костюмов для защиты от термических рисков электрической дуги. В перечень испытаний также вошли наиболее значимые показатели качества [7].

Уровень защиты однослойного костюма для защиты от воздействия электрической дуги из натурального материала незначительно выше. Костюмы из синтетических волокон более легкие. Оба материала впитывают влагу, поэтому костюмы, изготавливаемые из них, должны эксплуатироваться поверх гигроскопичного белья. Физико-механические показатели (стойкость к истиранию, разрывная и раздирающая нагрузка) ткани натурального материала несколько меньше, чем аналогичные показатели синтетического.

Таблица 1 — Объекты исследования

№	Название	Состав	Страна-производитель
1	Ткань верха «БиО-Терм®»	90% хлопок, 10% ПА, в т.ч. антистатическая нить	«Чайковский текстиль», Россия
2	Ткань верха «Номекс® Комфорт»	98% арамид, 2% антистатическое волокно	Германия
3	Ткань верха «ПРОтерм® 180»	98% арамид, 2% антистатическое волокно	«Чайковский текстиль», Россия

Таблица 2 — Структурные характеристики исследуемых тканей верха в исходном виде

Наименование показателей	Наименование ткани		
	БиОТерм®	Номекс® Комфорт	ПРОТерм®
Поверхностная плотность ткани, г/м ²	297	215	189
Воздухопроницаемость, дм ³ /м ² с	49.0	50.1	144.2
Гигроскопичность, %	17.5	5.5	7.3
Стойкость к истиранию, циклы, не менее 350	7910	6350	9460
Разрывная нагрузка (основа/уток), Н	1045/820	1430/1020	1480/1000
Раздирающая нагрузка (основа/уток), Н	41/45	64/53	137/132
Огнестойкость в течении 30 сек	Не горит, не тлеет и не расплавляется при выносе из пламени. Отсутствует остаточное горение и тление.		
Термостойкость Температура 260°С	не воспламеняется, не плавится Усадка, % -основа 0 -уток 0		

Уровень защиты — величина, определяющая максимальное значение падающей энергии теплового потока электрической энергии, при котором защитная специальная одежда способна предохранять пользователя от ожогов 2 степени, выраженная в кал/см² (кал/см²=41.868 кВт·с/м или 1 кДж/м = 0.023885 кал/см²).

Основным показателем защитных свойств комплекта от термического воздействия электрической дуги является способность ослаблять тепловое воздействие электрической дуги на кожу человека до уровня, который не сможет вызвать тяжелые ожоговые травмы. Этот показатель устанавливается экспериментально на основании результатов испытаний, проходящих в соответствии с требованиями методики МЭК(IEC) 61482.1 в

аккредитованных лабораториях на специальной установке Arc-Man®.

В основе методики лежат подтвержденные мировым научным сообществом экспериментальные данные (эталонная кривая Столл), которые определяют предел физиологических способностей кожи человека противостоять воздействию теплового излучения до возникновения ожогов II степени. Кривая задает предельные значения скорости изменения температуры на поверхности кожи человека, которые не приведут к возникновению ожогов.

Во время воздействия электрической дуги специальные калориметрические датчики измеряют температуру на поверхности манекена под одеждой. Полученные данные сравниваются со значением эталонной кривой Столл, обозначающей физиологический предел кожи человека,

после которого возникает ожог II степени (рисунок 1). Если показания датчиков оказались выше кривой Столл, значит, у человека появился ожог II или III степени, что представляет опасность для его жизни. Если же данные расположились ниже – защитный комплект ослабил тепловое воздействие электрической дуги на кожу человека до уровня, который не может вызвать тяжелые ожоговые травмы.



Рисунок 1 — Кривая роста температуры датчика в зависимости от времени

При проведении испытаний на стойкость к термическому воздействию электрической дуги термостойкая одежда должна быть подвергнута 5 и 50 циклам стирок. После испытаний термостойкая спецодежда должна сохранять функциональность застежки, не вскрываться, не воспламеняться и не плавиться. При этом значение ЗЭТВ не должно снижаться более чем на 5%.

Материал или пакеты материалов, предназначенные для изготовления термостойкой спецодежды, испытывают на стойкость к конвективному теплу (показатель передачи конвективного тепла должен быть не менее 3 секунд при прохождении теплового потока плотностью 80 кВт/м) и тепловому излучению (индекс передачи теплового излучения должен быть не менее 8 секунд при прохождении теплового потока плотностью 20 кВт/м)

после 5 и 50 стирок/химчисток, при этом эксплуатационные уровни должны быть не ниже В1 и С1 по ГОСТ Р ИСО 11612 (таблицы 3, 4).

Таблица 3 — Уровни защиты: испытание на конвективную теплопередачу

Уровень защиты	Показатель передачи тепла НТИ* 24 с	
	не менее	менее
В1	4.0	10.0
В2	10.0	20.0
В3	20.0	

* Индекс конвективной теплопередачи, определенный по ISO 9151

Таблица 4 — Уровни защиты: испытание на тепловое излучение

Уровень защиты	Показатель передачи тепла RHTI* 24 с	
	не менее	менее
С1	7.0	20.0
С2	20.0	50.0
С3	50.0	95.0
С4	95.0	

* Индекс передачи теплового излучения, определенный по ИСО 6942

Термостойкая спецодежда может быть изготовлена из одного или нескольких слоев материала с постоянными термостойкими свойствами. Результаты испытаний однослойного, двухслойного и многослойных пакетов материалов приведены в таблицах 5, 6.

Как видно из таблиц 5 и 6, эффективность многослойной защиты не соответствует арифметической сумме защитных свойств каждого слоя. Например, один из видов защитной ткани имеет порог защиты 15.0 кал/см², а двойной слой этой же ткани — 42.6 кал/см².

Таблица 5 — Уровни защиты тканей верха «БиОТерм®» (1), «Номекс® Комфорт» (2), «ПРОтерм® 180» (3)

	1	2	3
Уровень защиты ЗЭТВ, кал/см ² После 5 стирок/ После 50 стирок	15.0 / 15.8	13.9/13.6	19.4/18.6
Показатель передачи конвективного тепла, с Плотность теплового потока — 80 кВт/м ² После 5 стирок/ После 50 стирок	11.0/11.5	8.7/9.8	8.7/9.2
Уровни защиты: испытание на конвективную теплопередачу	B2	B1	B1
Индекс передачи теплового излучения, с Плотность теплового потока — 20 кВт/м ² После 5 стирок/ После 50 стирок	19.6/20.3	14.4/16.0	22.5/22.1
Уровни защиты: испытание на тепловое излучение	C1	C1	C2

Таблица 6 — Уровни защиты тканей верха «БиОТерм®» (1), «Номекс® Комфорт» (2), «ПРОтерм® 180» (3) в 2 слоя

	1 — 2 слоя	2 — 2 слоя	3 — 2 слоя
Уровень защиты ЗЭТВ, кал/см ² После 5 стирок/ После 50 стирок	42.6/44.9	34.1/36.0	32.9/34.3
Показатель передачи конвективного тепла, с Плотность теплового потока — 80 кВт/м ² После 5 стирок/ После 50 стирок	15.9/16.7	15.9/16.1	15.6/16.3
Уровни защиты: испытание на конвективную теплопередачу	B2	B2	B2
Индекс передачи теплового излучения, с Плотность теплового потока — 20 кВт/м ² После 5 стирок/ После 50 стирок	28.4/29.4	22.7/22.9	27.7/29.1
Уровни защиты: испытание на тепловое излучение	C2	C2	C2

С увеличением количества материалов, входящих в пакет для изготовления специальной одежды для защиты от термических рисков электрической дуги, увеличивается уровень защиты ЗЭТВ, что позволяет подбирать комплект для эксплуатации электрооборудования и электроустановок с различными параметрами

(например, сила тока короткого замыкания, напряжение, время воздействия дуги, расстояние до источника дуги, расстояние между токоведущими частями).

В результате определения стойкости к конвективному теплу и тепловому излучению пакетов материалов было выявлено, что все пакеты материалов соответствуют

требованиям в части их эксплуатационного уровня (не ниже В1 и С1) и сохраняют его после лабораторного износа.

Заключение

1. Все исследуемые материалы (ткани верха, утеплители и ткани подкладочные) не теряют устойчивость к открытому пламени и сохраняют термостойкие свойства при температуре 180 °С и 260 °С, после всех циклов лабораторного износа материалы не горят, не тлеют и не расплавляются, остаточное горение и тление отсутствует.

2. Стойкость к воздействию электрической дуги после лабораторного износа сохраняется, изменения происходят в пределах допустимых значений.

3. В результате определения стойкости к конвективному теплу и тепловому излучению пакетов материалов было выявлено, что все пакеты материалов соответствуют требованиям в части их эксплуатационного уровня (не ниже В1 и С1)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (ПОТЭЭ) № 30593; Введ. с 04.08.2014 г. Москва: Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти № 5 от 03.02.2014 г., 2013, 125 с.

[2]. Долин П. А. Основы техники безопасности в электроустановках. М.: Издательство Знак, 2000, 235 с.

[3]. ТР ТС 019/2011. О безопасности средств индивидуальной защиты. Москва: [б. и.], 2011, 108 с.

[4]. ГОСТ Р 12.4.234-2012. ССБТ. Одежда специальная для защиты от термических рисков электрической дуги. Общие технические требования и методы испытаний. Взамен ГОСТ Р 12.4.234-2007; Введ. с 01.12.2013 г. Москва: Стандартинформ, 2012, 69 с.

[5]. Пушкина Ж. С., Шустов Ю. С. Одежда для защиты от электрической дуги. Условия и требования. *Сборник научных трудов, посвященный 75-летию кафедры Материаловедения и товарной экспертизы*. М.: РГУ им. А. Н. Косыгина, 2019, с.67–71

[6]. Пушкина Ж. С. Специальная одежда для защиты от термического воздействия электрической дуги. *Инновационное развитие легкой и текстильной промышленности: сборник материалов Международной научной студенческой конференции*. Ч. 2, 2019, с. 64–67.

[7]. Пушкина Ж. С., Шустов Ю. С. Сравнение текстильных материалов, используемых для защиты от термических рисков электрической дуги. *Инновационное развитие техники и технологий в промышленности: сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием, посвященной Юбилейному году в ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н. Косыгина»*. Ч. 3, 2020, с. 138–140.

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)

Пушкина Жанна Сергеевна — 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)

Investigation of the properties of textile materials for protection from the thermal effects of an electric arc

Yu. S. Shustov^{*,1}, Zh. S. Pushkina^{*}

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

Abstract

Every year more and more attention is paid to the development of protective clothing, especially if it is connected with the manufacture of work clothing for protection against thermal effects. The protective functions of overalls, and hence the health of others, largely depend on the quality of the materials from which special clothing is made. As objects of study, 3 tissue samples of different fibrous composition were taken. The paper presents comparative characteristics of the physical and mechanical properties of the tissues under consideration. The level of protection is determined by the maximum value of the incident energy of the heat flow of electrical energy, at which protective clothing is able to protect the user from burns of the 2nd degree. The levels of protection of the top of the protection of the top of the clothing are considered, as well as various types of multilayer packages of materials are considered. As a result of the study, packages of materials were identified that meet the requirements for resistance to convective heat.

Keywords

Special clothing, electric arc exposure, washing, operation.

REFERENCES

- [1]. Pravila po okhrane truda pri ekspluatatsii elektroustanovok (POTEE) [Rules on labor protection during the operation of electrical installations] No. 30593; Introduction from 08/04/2014. Moscow: Bulletin of normative acts of federal executive authorities No. 5 dated 02/03/2014, 2013, 125 p. (In Russ.)
- [2]. Dolin P. A. Osnovy tekhniki bezopasnosti v elektroustanovkakh Fundamentals of safety in electrical installations. Moscow, Znak Publishing House, 2000, 235 p. (In Russ.)
- [3]. TR CU 019/2011. O bezopasnosti sredstv individual'noy zashchity [On the safety of personal protective equipment]. Moscow, 2011, 108 p. (In Russ.)
- [4]. GOST R 12.4.234-2012. SSBT. Odezhda spetsial'naya dlya zashchity ot termicheskikh riskov elektricheskoy dugi. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya i metody ispytaniy [Special clothing for protection against thermal risks of an electric arc. General technical requirements and test methods]; Introduction from December 1, 2013, Moscow: Standartinform Publ., 2012, 69 p. (In Russ.)

¹ *Corresponding author:*
Email: shustov-yus@rguk.ru

[5]. Pushkina Zh. S., Shustov Yu. S. Odezhda dlya zashchity ot elektricheskoy dugi. Usloviya i trebovaniya [Clothing for protection against electric arcs. Conditions and requirements]. *Sbornik nauchnykh trudov, posvyashchenny 75-letiyu kafedry Materialovedeniya i tovarnoy ekspertizy* [Collection of scientific papers dedicated to the 75th anniversary of the Department of Materials Science and Commodity Expertise], Moscow, 2019, pp. 67–71. (In Russ.)

[6]. Pushkina Zh. S. Spetsial'naya odezhda dlya zashchity ot termicheskogo vozdeystviya elektricheskoy dugi [Special clothing for protection against thermal effects of an electric arc] Innovatsionnoye razvitiye legkoy i tekstil'noy promyshlennosti: sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchnoy studentcheskoy konferentsii. Ch. 2 [Innovative development of light and textile industry: collection of materials of the International Scientific Student Conference. P. 2]. Moscow, 2019, pp. 64–67. (In Russ.)

[7]. Pushkina Zh. S., Shustov Yu. S. Sravneniye tekstil'nykh materialov, ispol'zuyemykh dlya zashchity ot termicheskikh riskov elektricheskoy dugi [Comparison of textile materials used to protect against thermal risks of an electric arc]. Innovatsionnoye razvitiye tekhniki i tekhnologiy v promyshlennosti: sbornik materialov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh issledovateley s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennoy Yubileynomu godu v FGBOU VO «RGU im. A. N. Kosygina». Ch. 3 [Innovative development of equipment and technologies in industry: collection of materials of the All-Russian Scientific Conference of Young Researchers with International Participation, dedicated to the Anniversary Year at the Russian State University A.N. Kosygin. P. 3], Moscow, 2020, pp. 138–140 (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).

Pushkina Zh. S. — 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 свойств текстильных материалов для защиты от термического воздействия электрической дуги / Ю. С. Шустов, Ж. С. Пушкина // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 2(9). С. 43 – 50.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-43-50

Please cite this article as:

Shustov Yu. S., Pushkina Zh. S. Investigation of the properties of textile materials for protection from the thermal effects of an electric arc. *Industrial processes and Technologies*, 2023, vol. 3, no. 2(9), pp. 43 – 50.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-43-50

Совершенствование насадочных контактных устройств массообменных аппаратов

М. Г. Беренгартен^{*,1}, А. С. Пушнов

** Московский политехнический университет, Москва, Россия*

Аннотация

В последние десятилетия существенно увеличилось число исследований, касающихся новых насадочных контактных устройств для массообменных и теплообменных аппаратов. Авторами проанализированы достоинства и недостатки различных нерегулярных и регулярных типов насадочных контактных устройств. Описаны основные направления исследований, позволяющие повысить энерго- и ресурсоэффективность таких процессов путем совершенствования контактных устройств технологическими и конструктивными методами. Рассмотрены регулярные геликоидно-структурные насадки с изменяемой геометрией укладки. Проанализировано влияние высоты слоя и перфорации таких насадок на гидравлическое сопротивление и массообменные характеристики. Особое внимание уделено комбинированному контактному устройству. Изучены комбинированные контактные устройства в виде вертикально установленных блоков из гофрированных листов с проставками из горизонтально уложенных винтовых элементов. Проведено сопоставление теплообменной эффективности таких комбинированных насадок со стандартными структурированными насадками. Намечены пути совершенствования насадочных контактных устройств.

Ключевые слова

Массообмен, насадочные контактные устройства, комбинированные контактные устройства, энерго- и ресурсоэффективность.

Введение

С тех пор как в 1890 году Фридрих Рашиг предложил способ фракционной дистилляции органических веществ в колоннах, заполненных керамическими кольцами, которые с того времени и называются кольцами Рашига (были запатентованы Ф. Рашигом в 1914 году), появилось достаточно много исследований, конструктивных и технологических решений по совершенствованию насадочных контактных

устройств для проведения массообменных процессов.

В середине 60-х годов XX века в мировой практике использовалось не более 10 различных насадок правильной формы. В следующие десятилетия количество новых регулярных и нерегулярных контактных насадочных устройств существенно расширилось [1].

Перспективные контактные устройства для осуществления различных тепло- и массообменных процессов

¹ Для переписки:

Email: berengarten@mail.ru

разрабатывались и исследовались в нашей стране в отраслевых институтах (ГИАП, НИУИФ), ИВЦ «Инжехим» (Казань), Казанском национальном исследовательском технологическом университете (КНИТУ), Санкт-Петербургском государственном университете технологии и дизайна, Ивановском государственном химико-технологическом университете, Московском государственном университете инженерной экологии, вошедшем в состав Московского политехнического университета, и других университетах Российской Федерации [2-9].

Повышение энергоэффективности тепломассообменных процессов в промышленных аппаратах химической технологии, нефтегазохимического комплекса, энергетики и ряда других отраслей промышленности по-прежнему является неотложной задачей. По меньшей мере частично эта задача может быть решена за счет совершенствования существующих и создания новых контактных устройств. Например, внедрение в 1990-е годы в отечественные агрегаты азотной промышленности насадки ГИАП-НЗ, разработанной в государственном институте азотной промышленности (ГИАП), позволило успешно решить задачу импортозамещения колец Палля, в больших объемах закупавшихся по импорту, и повысить эффективность массообменных колонн.

Различные направления совершенствования тепло- и массообменных аппаратов в какой-то мере могут быть обусловлены лимитирующей стадией процесса. Например, для процессов абсорбции лимитирующей, как правило, является массотдача в жидкой фазе, для процессов испарительного охлаждения — массотдача в

газовой фазе. Не случайно рекомендуемые расходы по жидкости при осуществлении процессов абсорбции (100 и более $\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$) и испарительного охлаждения ($8-10 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$) так сильно отличаются друг от друга [3-5, 10].

Наряду с указанными особенностями, связанными с лимитирующей стадией процесса, имеется много других общих явлений, влияющих на ресурсо- и энергоэффективность. К ним можно отнести турбулизацию взаимодействующих потоков «газ-жидкость» в системе противотока, организацию входных участков контактных устройств, на которых происходит перестроение потоков газа и жидкости и гидродинамическая стабилизация потока [10-12].

Существенное влияние на процессы тепло- и массообмена оказывают разрывы сплошного слоя регулярной насадки по высоте [12, 5, 7, 10, 14, 15]. Определенная интенсификация процессов тепло- и массообмена в слое регулярной насадки может быть получена при использовании решетчатых полимерных элементов [3, 8, 15].

Существует два основных направления совершенствования контактных устройств — технологические и конструктивные. В обоих случаях речь идет о технических решениях, направленных на значительное увеличение эффективности осуществляемых процессов при одновременном снижении энергозатрат на их осуществление. Анализ результатов исследований, выполненных в последние годы, позволяет предложить следующую классификацию способов интенсификации процессов тепло- и массообмена в контактных аппаратах химической технологии и теплоэнергетики (рисунок 1).

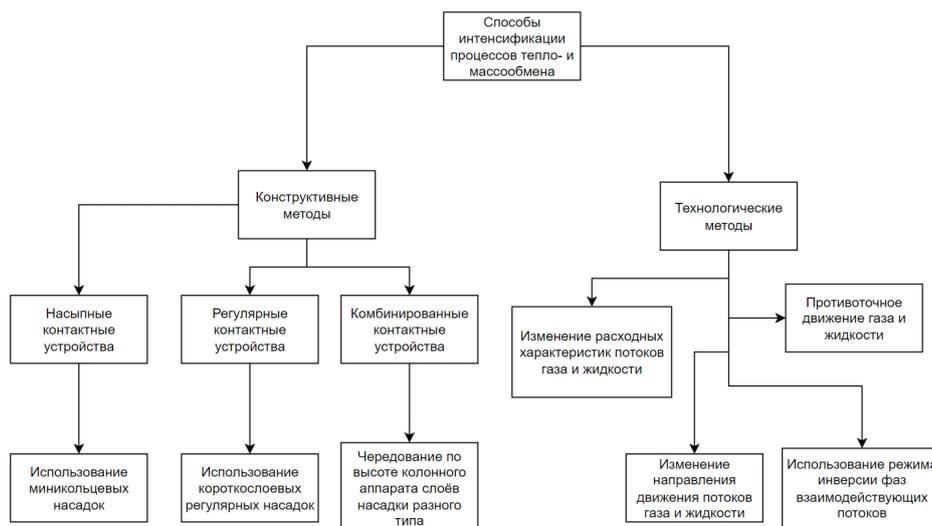


Рисунок 1 — Основные способы интенсификации процессов тепло- и массообмена

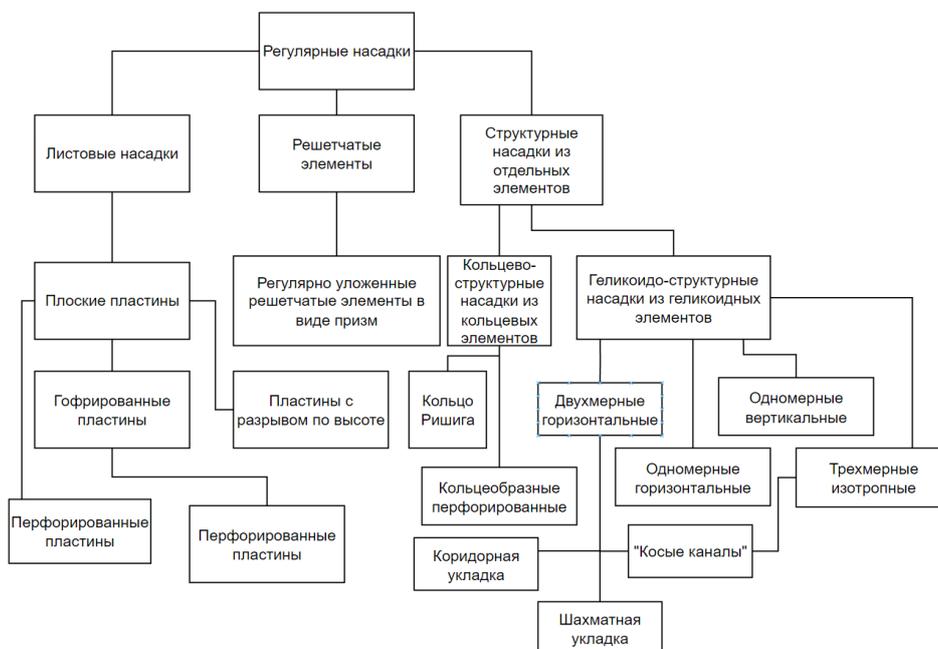


Рисунок 2 — Классификация регулярных насадок

Все эти направления совершенствования контактных устройств находят свое практическое воплощение в целом ряде работ, выполненных в разные годы в Московском институте инженерной экологии – Московском государственном университете инженерной экологии – Московском политехническом университете [4-9, 20-26 и другие].

В МГУИЭ были проведены стендовые испытания регулярных насадок различной

конструкции и комбинированных контактных устройств. Эти результаты сопоставлялись с литературными данными по наиболее распространенным насадкам. На рисунке 2 приведена классификация исследованных и наиболее распространенных регулярных насадок.

На рисунке 3 приведена схема одного из экспериментальных стендов МГУИЭ.

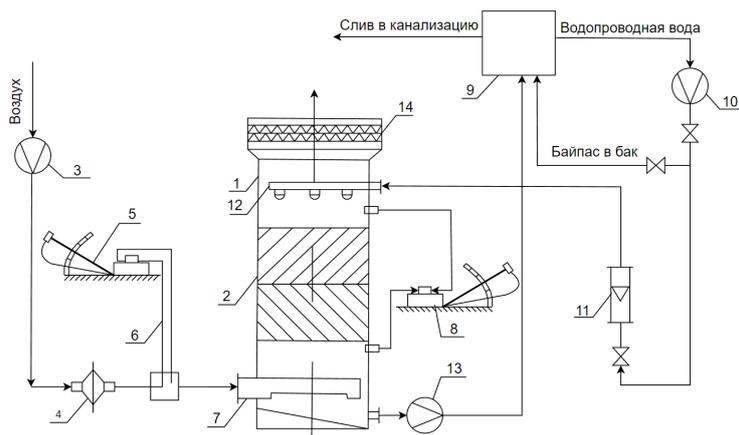


Рисунок 3 — Схема экспериментальной установки кафедры ЮНЕСКО МГУИЭ:

- 1 — абсорбционная колонна; 2 — насадка; 3 — газодувка; 4 — шиберная задвижка;
 5, 8 — микроманометры; 6 — трубка Пито; 7 — распределитель газа; 9 — бак с водой;
 10, 13 — насосы; 11 — ротаметр; 12 — ороситель; 14 — сепаратор

Часть гидродинамических испытаний проводили на стенде ВНИИГ им. Ю. Е. Веденеева [29].

Проанализируем некоторые результаты исследований насадок различного типа.

Регулярные геликоидно-структурные насадки с изменяемой геометрией укладки

Регулярные насадки различного типа — пленочные, капельные и капельно-пленочные из различных материалов — полимерных, металлических, иногда деревянных, в настоящее время эксплуатируются в больших масштабах в вентиляторных секционных и башенных градирнях систем оборотного водоснабжения.

Наряду с известными в промышленности регулярными насадками появляются новые технические решения осуществления тепломассообменных процессов при непосредственном контакте взаимодействующих потоков с использованием осесимметричных тел вращения — турбулизаторов потока, собранных в блоки различной конфигурации. Наиболее целесообразным для интенсификации процесса представляется расположение элементов с дистанцией между ними, соизмеримой с

диаметральным линейным размером указанных элементов [7].

Регулярная насадка, выполненная из четырёх лопастных винтообразных (геликоидных) горизонтальных полимерных элементов, плотно уложенных в пакет с поворотом на 90° от слоя к слою, целиком соответствует предложенному в работе [6] определению структурированных насадок. Вместе с тем, в отличие от регулярных насадок пленочного типа, например известных насадок фирмы «Зульцер», гофрированные листы которой образуют совокупность отдельных замкнутых и не сообщающихся между собой каналов, насадка из геликоидных элементов образует открытую многоканальную ячеистую структуру постоянно сообщающихся между собой по высоте каналов переменного сечения. С учетом этой особенности регулярная насадка, собранная из геликоидных элементов, может быть отнесена к новому типу так называемых «структурных» насадок [4], образуя в их ряду новый вид — геликоидно-структурных насадок.

В известной монографии В. М. Рамма [13] было получено соотношение для расчета коэффициента массоотдачи:

$$\beta = 11,6 u^{0,786} l^{-0,785}, \quad (1)$$

из которого следует, что наибольшее влияние на эффективность процесса при плотностях орошения ниже $50 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ оказывает длина пути пленки жидкости l . Из анализа соотношения (1) следует, что при указанных нагрузках по жидкости, характерных, в частности, для вентиляторных градилен, оптимальной высотой элемента регулярной насадки (длиной пути плёнки жидкости) будет величина $\sim 100 \text{ мм}$. Этому условию вполне отвечают геометрические размеры геликоидов в опытах, описанных в работе [7] — $\varnothing 75 \text{ мм}$. Объяснить это можно тем, что основная доля теплосъёма в регулярных структурах плёночного типа приходится именно на область входного участка гидродинамической стабилизации потока, протяжённость которого соизмерима с величиной l .

Далее приведены некоторые результаты выполненного в МГУИЭ систематического исследования влияния основных параметров (высоты слоя H , дистанции между соседними элементами в ряду t и по высоте между отдельными ярусами S , площади перфорации элементов, а также нагрузок по газу q_G и жидкости q_L) на гидравлическое сопротивление и эффективность геликоидно-структурной насадки.

На рисунке 4 показаны различные варианты укладки насадки типа геликоидно-структурной насадки типа PN-2D.

Влияние высоты насадки изучалось при значениях высоты блока H : 350 мм, 500 мм и 750 мм. При этом дистанция между соседними геликоидами выдерживалась постоянной и составляла $x_t = 2$, где $x_t = t/d$, t — шаг между центральными осями соседних геликоидов, d — наружный диаметр геликоида.

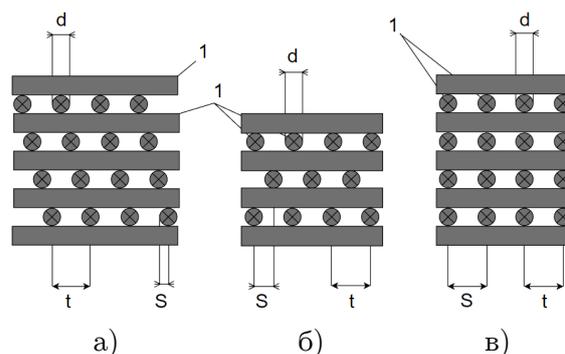


Рисунок 4 — Различные схемы укладки блоков геликоидно-структурной насадки типа PN-2D: а) — «косые каналы $S = 0.5d$ »; б) — шахматная укладка геликоидов; в) — коридорная укладка; 1 — геликоиды; d — наружный диаметр геликоида в одном ряду; t — шаг между осями симметрии геликоидов в одном ряду; S — смещение осей геликоидов в соседних рядах по высоте насадки

На рисунках 5 и 6 результаты опытов представлены в виде зависимостей для насадки PN-2D коэффициента гидравлического сопротивления ξ от высоты насадки H при фиксированном значении геометрического параметра $x_t = 2$ (рисунок 5) и величины ξ/H от значения геометрического параметра x_t (рисунок 6).

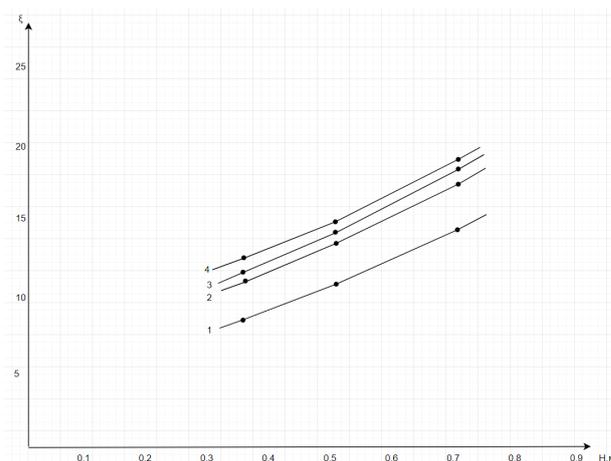


Рисунок 5 — Влияние высоты насадки типа PN-2D на величину коэффициента гидравлического сопротивления ξ в автомодельной области при $W_0 = 2.0 \text{ м/с}$ при плотностях орошения q_L ($\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$): 1 — 0; 2 — 7.0; 3 — 9.0; 4 — 11.0.

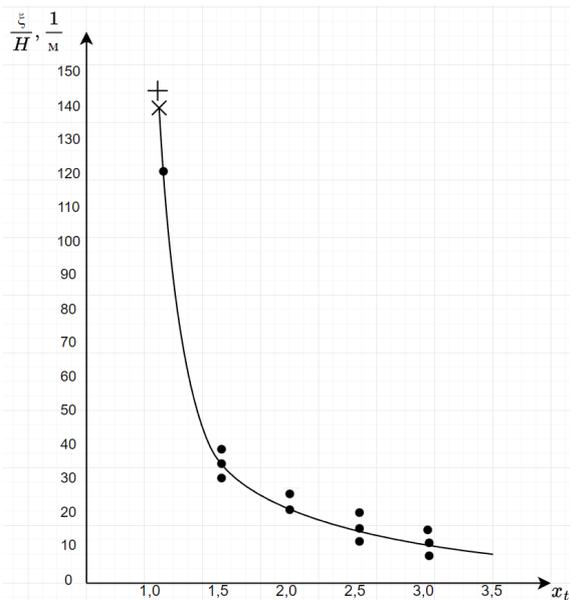


Рисунок 6 — Влияние геометрического параметра x_t на величину ξ/H для насадки типа PN-2D при $w_0 = 2.0$ м/с и различных плотностях орошения (от 7.0 до 10.0 м³/м²·ч)

Коэффициент гидравлического сопротивления ξ рассчитывали по измеренному значению потери напора в слое насадки ΔP с использованием известной формулы Дарси-Вейсбаха.

Эффективность конструкции испытуемой насадки оценивали по значению коэффициента A в уравнении для числа испарения [15, 27]

$$K_{PV} = A\lambda^m, \quad (2)$$

где $\lambda = \frac{q_G}{q_L}$; q_G — удельный расход воздуха, м³/м²·ч; q_L — удельный расход жидкости м³/м²·ч.

Область автомодельности по коэффициенту гидравлического сопротивления ξ наступала при скорости воздушного потока W_0 выше 2 м/с. Как видно из рисунка 6, в автомодельной области (при $W_0 = 2$ м/с) увеличение высоты блока насадки с 0.3 до 0.7 м (в 2.3 раза) приводит к увеличению гидравлического сопротивления ξ сухой насадки в 1.85 раза.

Влияние геометрического параметра x_t на относительную величину гидравлического сопротивления ξ/H геликоидно-

структурной насадки PN-2D (рисунок 6) в автомодельной области (при $W_0 = 2$ м/с) во всем испытанном диапазоне плотностей орошения q_L от 7 до 10 м³/м²·ч вполне удовлетворительно описывается одной кривой. При уменьшении величины x_t с 3.0 до 1.0 относительное сопротивление ξ/H в расчете на высоту слоя насадки 1 м изменяется от 10 до 140 (при $x_t = 1$, что соответствует наиболее плотной упаковке в блоке).

На рисунке 7 представлена зависимость относительной эффективности A (1/м) от величины x_t , из которой следует, что уменьшение величины x_t существенно увеличивает эффективность процесса.

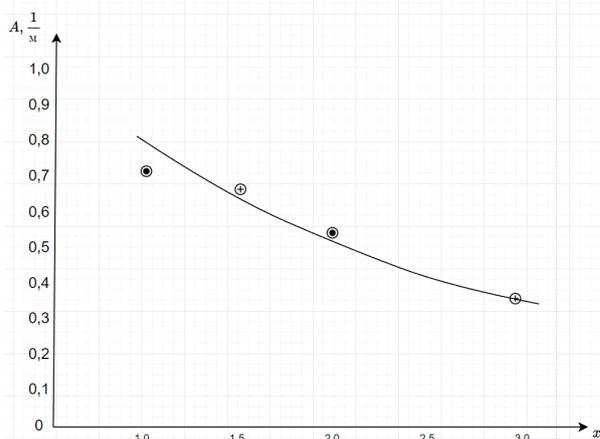


Рисунок 7 — Влияние геометрического параметра x_t насадки типа PN-2D на величину коэффициента A

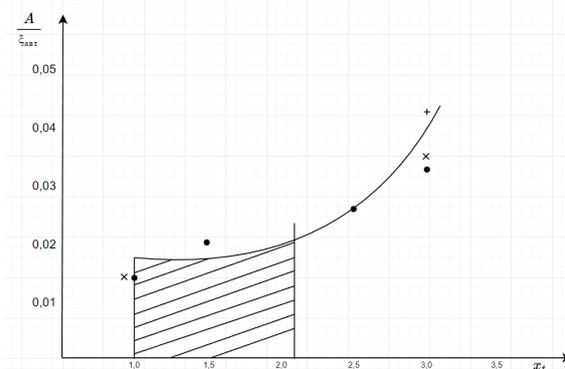


Рисунок 8 — Зависимость A/ξ_{aem} от геометрического параметра x_t : заштрихованная область оптимальных значений симплекса A/ξ_{aem} , соответствующая диапазону x_t от 1.0 до 2.0

На рисунке 8 представлена зависимость симплекса $A/\xi_{автомод}$ от геометрического параметра x_t . Область оптимальных значений величины x_t отмечена на рисунке штриховкой.

На основании обработки результатов аэротермических испытаний блоков насадки PN-2D с различной площадью перфорации было выяснено, что перфорация геликоидных элементов в изученном диапазоне нагрузок по газу и жидкости незначительно влияет на величину коэффициента гидравлического сопротивления ξ . При увеличении площади перфорации F с 10 до 20% при нагрузках по жидкости q_L 7 и 11 $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ (при $W_0 = 2$ м/с) коэффициент гидравлического сопротивления ξ снижается только на 8–20%. Это можно объяснить особенностями обтекания перфорационных отверстий пленкой жидкости. Как показали визуальные наблюдения, пленка обтекает стороной весь периметр отверстий перфорации, не перекрывая сколько-нибудь заметно их живое сечение.

Зависимость $\xi=f(W_0)$ для перфорированной насадки PN-2D приведена на рисунке 9. Влияние изменения площади перфорации блоков насадки высотой $H = 0.5$ м показано на рисунке 10.

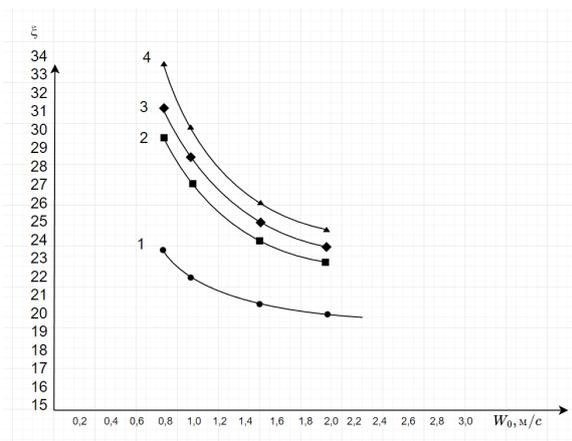


Рисунок 9 — Влияние перфорации насадки PN-2D на зависимость $\xi=f(W_0)$; $H = 1.0$ м; отверстия перфорации $\varnothing 15$ мм; шаг отверстий 50 мм при удельных расходах по жидкости q_L , ($\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$): 1 — 0; 2 — 7.0; 3 — 9.0; 4 — 11.0

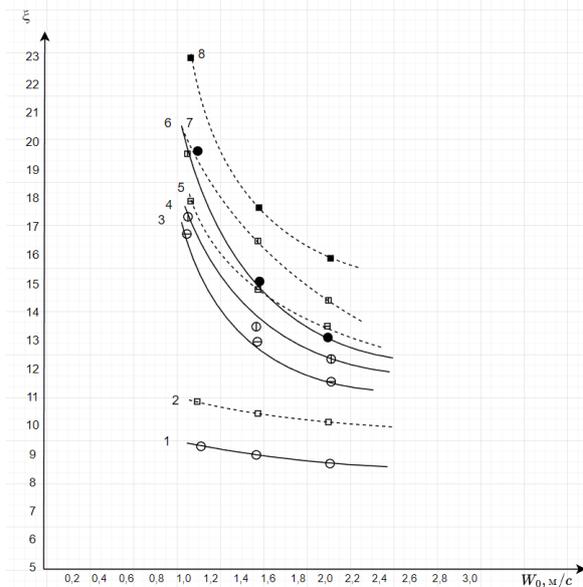


Рисунок 10. Влияние площади перфорации на гидравлическое сопротивление насадки типа PN-2D высотой $H \approx 0.5$ м, отверстия перфорации $\varnothing 15$ мм; при разном шаге отверстий и разных удельных расходах по жидкости q_L , ($\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$):

Шаг 25 мм	Шаг 50 мм
1 — $q_L = 0$	2 — $q_L = 0$
3 — $q_L = 7,0$	4 — $q_L = 7,0$
5 — $q_L = 9,0$	6 — $q_L = 9,0$
7 — $q_L = 11,0$	8 — $q_L = 11,0$

При увеличении площади перфорации с 10 до 20% (в 2 раза) коэффициент гидравлического сопротивления сухой насадки ξ в автомобильной области снижается с 10.0 до 8.7, т. е. всего на 13 %. В то же время нужно иметь в виду, что перфорация геликоидов позволяет существенно интенсифицировать процессы тепло- и массообмена.

Величина коэффициента A в эмпирической формуле (2) для числа испарения K_{PV} , характеризующая эффективность процесса испарительного охлаждения, составляет

- $A = 0.46$ при площади перфорации 10 %;
- $A = 0.48$ при площади перфорации 20 %.

В формуле (2) коэффициенты λ и m имеют следующие значения:

$$\lambda = 0.41, m = 0.6.$$

Было также изучено влияние разрыва блоков насадки по высоте. В работе [15] было показано, что значительная интенсификация охлаждающего эффекта в градирнях может быть достигнута за счет разрывов сплошных листов насадки пленочного типа по высоте (т. е. разрывов между ярусами). При этом отмечалось снижение общего гидравлического сопротивления насадки и уменьшение расхода материала на ее изготовление. Вместе с тем для насадок капельного типа из решетчатых элементов такой конструктивный прием оказался малоэффективным [15].

Поскольку геликоидно-структурные насадки занимают промежуточное положение и относятся к пленочно-капельному типу, представлялось целесообразным изучить влияние разрыва между ярусами такой насадки.

Результаты сравнительных гидравлических и аэротермических испытания геликоидно-структурной насадки PN-2D с разрывом между ярусами высотой по 0.5 м каждый показали, что уменьшение величины разрыва с 1.0 до 0.5 м при том же гидравлическом сопротивлении ($\xi = 27.0$ при $q_L = 11 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ и $W_0 = 2.0 \text{ м/с}$) приводит к некоторому увеличению коэффициента A в выражении для числа испарения (уравнение (2) на $\sim 3\%$ (с 0.61 до 0.63)).

По сравнению со сплошным блоком насадки PN-2D высотой $H = 1.0 \text{ м}$ (без разрывов) наличие разрыва позволило увеличить коэффициент A с 0.56 до указанных выше значений 0.61 и 0.63, т. е. на 8.2% и 11.1% соответственно. При этом гидравлическое сопротивление практически сохранилось на прежнем уровне ($\xi = 26.0$).

Следовательно, в тех случаях, когда габаритные ограничения аппарата не

являются лимитирующими (что имеет место при реконструкции градирен), ярусный вариант выполнения геликоидно-структурной насадки целесообразен.

Полученные в МГУИЭ результаты показали перспективность использования геликоидно-структурной насадки типа PN-2D при реконструкции промышленных градирен после выполнения соответствующего поверочного расчета по методике, изложенной в работе [7].

Комбинированные контактные устройства

Представляется перспективным для повышения энерго- и ресурсоэффективности тепло- и массообменных процессов применение различных вариантов комбинированных контактных устройств.

Так в МГУИЭ были изучены комбинированные контактные устройства в виде вертикально установленных блоков из гофрированных листов с проставками из горизонтально уложенных винтовых элементов [28]. За счет такой конструкции обеспечивался разрыв пленки жидкости, омывающей поверхность соседних по высоте пакетов насадки. Испытания проводились на стенде ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева (рисунок 3) по испарительной методике [5, 29].

Основная идея такой комбинированной насадки состояла в следующем. Насадки, организующие капельную поверхность контакта фаз, отличаются значительно меньшей удельной поверхностью по сравнению с пленочными контактными устройствами, а следовательно, и более низкой эффективностью, хотя и обеспечивают свободное сообщение между газовой и жидкой фазами в поперечном сечении аппарата. Сочетание пленочного и капельного режима позволяет повысить эффективность насадочных контактных устройств.

Были проведены исследования тепло-массообменных и гидравлических характеристик регулярной насадки, сочетающей элементы пленочного и пленочно-капельного насадочного устройства. Комбинированная регулярная насадка состояла из пакетов структурированной насадки (СН) размером 1.0x0.5x0.5 м, разделенных по высоте проставками размерами 1.0x0.5x0.21 м в виде блоков регулярно уложенных винтовых элементов. Пакеты СН были собраны из вертикально установленных гофрированных листов из поливинилхлорида, соприкасающихся друг с другом выступающими трапециевидными гофрами, которые наклонены в соседних листах в противоположные стороны под углом 60° к горизонту. Листы были скреплены между собой наборными дистанцирующими стержнями в местах соприкосновения вершин трапециевидных гофров (высота гребня 23.5 мм, основания 51 и 4 мм, угол гофрирования 90°) и расположены с шагом 60 мм. Блоки проставки состояли из трех рядов горизонтально уложенных четырехзаходных винтовых элементов из полиэтилена высокой плотности с условным диаметром 70 мм и шагом винта 100 мм, размещенных в ряду параллельно друг другу с зазором, равным диаметру отдельного элемента, и ориентированных по высоте укладки в соседних рядах перпендикулярно относительно друг друга. Одна трехрядная проставка состояла из 20 винтовых элементов: по 8 элементов длиной 0.5 м в верхнем и нижнем рядах и 4 элемента длиной 1 м в среднем ряду.

Геометрические параметры исследуемой комбинированной насадки и ее структурных составляющих приведены в таблице 1.

Общая высота исследуемой насадки, состоящей из трех пакетов СН и двух блоков проставок, составляла 1.92 м.

Таблица 1

Параметр	Комбинированная насадка	Структурированная насадка СН	Проставка
Удельная поверхность $\text{м}^2/\text{м}^3$	116.25	136.2	45
Гидравлический диаметр сухих каналов, м	0.03	0.019	0.07

Гидродинамические испытания проводили при атмосферном давлении и различных нагрузках по газу и жидкости на системе «воздух — вода». Тепломассообменные характеристики насадки определяли методом испарительного охлаждения также на системе «воздух — вода» в условиях противотока. Тепломассообменные испытания проводили при трех режимах орошения, удельная нагрузка по жидкости составляла 5, 10 и 15 $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ при линейной скорости воздуха в колонне от 0.5 до 2.7 м/с. Замеряли расходы воздуха и воды, температуру воды на входе и выходе из колонны, температуру воды и влажность воздуха на входе в колонну. Результаты экспериментов обрабатывали в виде зависимости числа Меркеля от относительного расхода воздуха [15]:

$$Me = \frac{\beta_{GV} h}{q_L} = \frac{\beta_{GL} F}{G_L} = A \lambda^m, \quad (3)$$

где β_{GV} — объемный коэффициент массоотдачи в газовой фазе, $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$; β_{GL} — поверхностный коэффициент массоотдачи в газовой фазе, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; h — высота насадки, м; F — площадь поверхности насадки (поверхность массообмена) $F = a_p V$, м^2 ; a_p — удельная поверхность насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$; V — объем насадки, м^3 ; G_L — массовый расход жидкости, $\text{кг}/\text{с}$;

λ — относительный расход воздуха;
 q_L — удельный массовый расход жидкости, кг/м²·с; A, m — коэффициент и показатель степени, экспериментально определяемые для каждого типа насадки.

Для исследуемой насадки было получено соотношение

$$Me = 2,63\lambda^{0,37}. \quad (4)$$

На рисунке 11 представлены зависимости числа Меркеля от относительного расхода воздуха для комбинированной насадки (кривая 2) и исходной структурированной насадки СН (кривая 1).

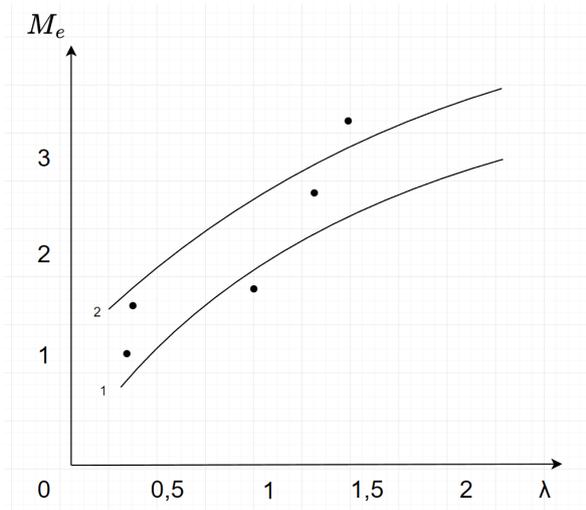


Рисунок 11 — Тепломассообменная эффективность (критерий Me) исходной структурированной насадки (1) и комбинированной насадки (2)

При проведении гидродинамических испытаний было исследовано гидравлическое сопротивление сухой и орошаемой насадок при различных удельных нагрузках по жидкости L_0 . Во время проведения экспериментов фиксировали значения расходов и коэффициента сопротивления ξ_G .

Коэффициент сопротивления насадки представляли в виде числа Эйлера, рассчитываемого как функция числа Рейнольдса для газовой фазы:

$$Eu = \frac{\Delta P_{dry}}{\rho_G w_0^2} = \frac{\xi_G}{2} \frac{h}{d_{hg,dry}} = \frac{A}{Re_G^n} \frac{h}{d_{hg,dry}}, \quad (5)$$

где ΔP_{dry} — гидравлическое сопротивление сухой насадки, Па; w_0 — фиксированная скорость газа в колонне, отнесенная к ее полному поперечному сечению, м/с; ρ_G — плотность газа, кг/м³; h — высота насадки в колонне, м; $d_{hg,dry}$ — гидравлический диаметр сухих треугольных каналов течения газа, м; A, n — коэффициент и показатель степени, определяемые для каждого типа насадки. Re_G — число Рейнольдса для газовой фазы:

$$Re_G = \frac{\rho_G w_0 d_{hg,dry}}{\mu_G}, \quad (6)$$

где μ_G — динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Обработка опытных данных позволила получить расчетную формулу для определения числа Эйлера для сухой исследуемой насадки в диапазоне чисел Re_G от 500 до 6000

$$Eu = 0,4 Re_G^{-0,078} \frac{h}{d_{hg,dry}}. \quad (7)$$

Определив коэффициент сопротивления сухой насадки из уравнения (5), с учетом уравнения (7) рассчитывали гидравлическое сопротивление сухой насадки

$$\frac{\Delta P_{dry}}{h} = \xi_G \frac{1}{d_{hg,dry}} \frac{\rho_G w_0^2}{2}. \quad (8)$$

Для определения гидравлического сопротивления орошаемой насадки ΔP_{wet} использовали соотношение

$$\frac{\Delta P_{wet}}{\Delta P_{dry}} = 1 + A w_0^n L_0^m \quad (9)$$

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод, что применение комбинированных насадочных устройств позволяет компенсировать недостатки отдельных пленочных и капельно-пленочных

устройств и, соответственно, повысить в целом эффективность массообменных колонных аппаратов или аппаратов испарительного охлаждения (градирен).

Как видно из данных, приведенных на рисунке 11, по тепломассообменным характеристикам комбинированная насадка превосходит традиционную структурированную насадку, из пакетов которой она частично состоит, примерно на 25% во всем диапазоне рабочих нагрузок.

Применение комбинированной насадки по сравнению с традиционными структурированными насадками СН из гофрированных листов позволяет [5]:

- повысить интенсивность процессов тепло- и массообмена за счет турбулизации газовых потоков, поступающих из закрытых каналов расположенного ниже проставки пакета из гофрированных листов за счет их дополнительной закрутки и перемешивания в блоке проставки;

- создать дополнительную пленочно-капельную зону контакта фаз, что обеспечивает повышение массообменной эффективности насадки и сокращение капитальных затрат;

- повысить интенсивность процессов тепло- и массообмена за счёт перераспределения жидкости (поступающей из закрытых каналов расположенного выше проставки пакета из гофрированных листов) путем ее дополнительного перемещения по поверхности элементов блока проставки в горизонтальном направлении, что обеспечивает перемешивание жидкости и ее равномерное распределение по поперечному сечению аппарата.

Заключение

Насадочные контактные устройства, применяемые в химической промышленности, теплоэнергетике и других отраслях промышленности, уже более 100 лет постоянно совершенствуются и за счёт новых конструктивных решений, и за счёт

применения новых материалов, и за счёт комбинирования как самих насадок, так и в сочетании с другими контактными устройствами.

Основными направлениями их совершенствования являются:

- увеличение развиваемой поверхности контакта фаз;

- упрощение и удешевление технологии массового производства;

- апробация новых дешевых и доступных полимерных, в том числе тканых, и сетчатых материалов;

- поиск аэродинамически совершенных форм элементов насадки с хорошей омываемостью контактирующими потоками всей геометрической поверхности насадки;

- стремление максимально снизить величину гидравлического сопротивления слоя насадки при одновременном увеличении развиваемой удельной поверхности;

- использование «концевых» эффектов при конструировании элементов регулярной насадки;

- создание благоприятных условий для частого обновления (разрыва) пленки жидкости;

- разработка комбинированных контактных устройств, позволяющих сочетать в объеме одного аппарата достоинства высокоразвитой удельной поверхности регулярных структурированных насадок с постоянным обновлением пленки жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Сокол Б. А., Чернышев А. К., Баранов Д. А., Беренгартен М. Г., Левин Б. В. Насадки массообменных колонн / Под ред. Баранова Д. А. М.: ООО «Инфохим», 2009, 358 с.

[2]. Лаптев А. Г., Башаров М. М. Эффективность теплообмена и разделения гетерогенных сред в аппаратах

нефтегазохимического комплекса. Монография, Казань: Центр инновационных технологий, 2016, 344 с.

[3]. Лаптев А. Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов. Казань: Изд. Казанского университета, 2007, 500 с.

[4]. Коморович Т., Магера Я., Баранов Д. А., Беренгартен М. Г. Высокоэффективные кольцево-структурные насадки. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2001, № 8, с. 8–19.

[5]. Дмитриева Г. Гидродинамика и массообмен в структурированных насадках из гофрированных листов. Дисс. ... канд. техн. наук, Иваново, 2007.

[6]. Дмитриева Г. Б., Беренгартен М. Г., Ключенкова М. И., Пушнов А. С. Эффективные конструкции структурированных насадок для процессов тепломассообмена. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2005, № 8, с. 28–32.

[7]. Рябушенко А.С. Гидродинамика и испарительное охлаждение в насадках для градирен. Дисс. ... канд. техн. наук, М.: МГУИЭ, 2009.

[8]. Generozov A., Berengarten M., Klushenkova M., Pushnov F. The ventilating gas cleaning system for guarantee microclimate of stockbreeding farm. *Proceeding of the International Conference. Technical and technological progress in aeroculture*. 2007, Raunas, pp. 143–146.

[9]. Пушнов А. С., Беренгартен М. Г., Лагуткин М. Г. и др. Влияние геометрии каналов регулярной керамической насадки на гидродинамику тепло- и массообменных процессов. *Химическое и нефтегазовой машиностроение*, 2008, № 6, с. 3–4.

[10]. Махнин А. А., Совершенствование процессов и аппаратов для очистки паровоздушных смесей от органических

растворителей сорбционными методами. Автореферат диссертации ... д-ра техн. наук, Ярославль, Ярославский государственный технический университет, 2010, 34 с.

[11]. Пушнов А. С., Лозовая Н. П. Входной участок гидродинамической стабилизации потока в регулярной насадке. *Химическая промышленность*, 2009, т. 86, № 5, с. 241–248.

[12]. Пушнов А. С., Лозовая Н. П., Лагуткин М. Г. Модель входного участка гидродинамической стабилизации потока в регулярной насадке. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, 2010, №1, с. 4–7.

[13]. Рамм В. М. Абсорбция газов, изд. 2, перераб. М.: Химия 1976, 471 с.

[14]. Лозовая Н. П., Пушнов А. С. Влияние геометрических характеристик регулярной насадки на особенности гравитационного течения пленки жидкости. *Химическая промышленность*, 2010, т. 87, № 7, с. 353–356.

[15]. Пономаренко В. С., Арефьев Ю. И. Градирни промышленных и энергетических предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1998, 376 с.

[16]. Дмитриева Г. Б., Беренгартен М. Г., Ключенкова М. И., Пушнов А. С. Расчет гидродинамических параметров регулярных структурированных насадок. *Химическое и нефтегазовой машиностроение*, 2005, №12, с. 5–9.

[17]. Пушнов А. С., Чиж К. В. Геометрические характеристики насыпных объемных решетчатых насадок для контактных аппаратов. *Химическая промышленность*, 2014, т.91, № 3, с. 142–145.

[18]. Пушнов А. С., Витковская Р. Ф., Беренгартен М. Г. и др. Современные проблемы науки в области защиты окружающей среды. Контактные устройства для очистки газовых выбросов:

учебное пособие. Спб.: ФГБОУ ВО «СПбГУПТД», 2016, 96 с.

[19]. Беренгартен М. Г., Витковская Р. Ф., Городилов А. А., Пушнов А. С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Насадочные скрубберы для контактного теплообмена: учебное пособие, Спб.: ФГБОУ ВПО «СПбГУТД», 2014, 82 с.

[20]. Витковская Р. Ф. Разработка и исследование полимерных волокнистых катализаторов и контактных элементов для ресурсосбережения и охраны окружающей среды. Дисс. ... д-р техн. наук, Спб, СПбГУТД, 2005.

[21]. Харитонов А. А. Испарительное охлаждение в регулируемом контактном устройстве градирни. Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. Иваново: Ивановский гос. Химико-технологический университет, 2013, 16 с.

[22]. Цурикова Н. П. Влияние высоты блока регулярной насадки на процесс испарительного охлаждения в вентиляторных градирнях. Автореферат дисс. ... канд. техн. наук, Москва: МИТХТ им. М. В. Ломоносова, 2013, 24 с.

[23]. Систер В. Г., Пушнов А. С., Пирогова О. В., Карпенко А. С. Современные методы интенсификации процессов

тепло-массообмена в контактных аппаратах с насадкой. *Химическая технология*. 2018, т. 19, № 2, с. 81–87.

[24]. Соколов А. С. Влияние типа керамической кольцевой насадки на процесс абсорбции газов. Автореферат дисс. ... к.т.н. М.: МГУИЭ, 2009, 16 с.

[25]. Пушнов А. С., Карпенко А. С. Геометрические характеристики насадок и эффективность процессов тепло- и массообмена в колонных аппаратах. *Химическая технология*, 2015, т. 16, № 9, с. 557–563.

[26]. Коган А. М., Юдина Л. А., Пушнов А. С. Гидравлическое сопротивление и удельная поверхность нерегулярных насадок. *Химическая промышленность*, 2009, т. 85, № 3, с. 147–152

[27]. Пушнов А. С., Беренгартен М. Г., Каган А. М., Рябушенко А. С. Геликоидно-структурные насадки с изменяемой геометрией укладки. *Химическая промышленность*, 2007, т. 84, № 5, с. 249–251.

[28]. Сухов Е. А., Гельфанд Р. Е. Определение коэффициентов тепло- и массотдачи оросительных устройств по опытными данным. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*, 1971, т. 96, с. 256–262.

Беренгартен Михаил Георгиевич — канд. хим. наук, профессор, профессор кафедры «Аппаратурное оформление и автоматизация технологических производств им. проф. М. Б. Генералова», Московский политехнический университет (Российская Федерация, 107023, Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38)

Пушнов Александр Сергеевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Московский политехнический университет (Российская Федерация, 107023, Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38)

Improving the nozzle contact devices of mass transfer equipment

М. Г. Беренгартен^{*,1}, А. С. Пушинов

** Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia*

Abstract

In recent years the number of studies concerning new nozzle contact devices for mass transfer and heat and mass transfer devices has increased significantly. The authors analyzed the advantages and disadvantages of various irregular and regular types of nozzle contact devices. The main directions of research are described, which make it possible to increase the energy and resource efficiency of such processes by improving contact devices by technological and constructive methods. Regular helicoid-structural nozzles with variable laying geometry are considered. The influence of the height of the deflection and perforation of such nozzles on the hydraulic resistance and mass transfer characteristics is analyzed. Special attention is paid to combined contact devices. Combined contact devices in the form of vertically mounted blocks of corrugated sheets with spacers of horizontally stacked screw elements have been studied. A comparison of the heat and mass transfer efficiency of such combined nozzles with standard structured nozzles has been carried out. The ways of improving the attachment contact devices are outlined.

Keywords

Mass transfer, nozzle contact devices, combined contact devices, energy and resource efficiency.

REFERENCES

- [1]. Sokol B. A., Chernyshev A. K., Baranov D. A., Berengarten M. G., Levin B. V. *Nasadki massoobmennykh kolonn [Packing for mass transfer columns]* / Ed. by D. A. Baranov. Moscow: LLC "Infokhim" Publ., 2009, 358 p. (In Russ.)
- [2]. Laptsev A. G., Basharov M. M. *Effektivnost' teplo- i massoobmena i razdeleniya geterogennykh sred v apparatakh neftegazokhimicheskogo kompleksa [Efficiency of heat and mass transfer and separation of heterogeneous media in equipment for the oil and gas chemical complex]*. Monograph, Kazan: Tsentr innovatsionnykh tekhnologiy Publ., 2016, 344 p. (In Russ.)
- [3]. Laptsev A. G. *Modeli pogranychnogo sloya i raschet teplo- i massoobmennykh protsessov [Boundary layer models and calculation of heat and mass transfer processes]*. Kazan: Izd. Kazanskogo universiteta, 2007, 500 p. (In Russ.)

¹ *Corresponding author*

Email: berengarten@mail.ru

- [4]. Komorovich T., Magera Ya., Baranov D. A., Berengarten M. G. Vysokoeffektivnyye kol'tsevo-strukturnyye nasadki [Highly effective ring-structure packings]. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2001, no. 8, pp. 8–19. (In Russ.)
- [5]. Dmitrieva G. *Gidrodinamika i massoobmen v strukturirovannykh nasadkakh iz gofirovannykh listov* [Hydrodynamics and mass transfer in structured packings made of corrugated sheets]. Diss. ... Cand. of Tech. Sci., Ivanovo, 2007. (In Russ.)
- [6]. Dmitrieva G. B., Berengarten M. G., Klyushenkova M. I., Pushnov A. S. Effektivnyye konstruksii strukturirovannykh nasadok dlya protsessov teplo- i massoobmena [Effective designs of structured packings for heat and mass transfer processes]. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2005, no. 8, pp. 28–32. (In Russ.)
- [7]. Ryabushenko A. S. *Gidrodinamika i isparennoye okhlazhdeniye v nasadkakh dlya gradiren* [Hydrodynamics and evaporative cooling in packings for cooling towers]. Diss. ... Cand. of Tech. Sci., Moscow: MGUIE, 2009. (In Russ.)
- [8]. Generozov A., Berengarten M., Klushenkova M., Pushnov F. The ventilating gas cleaning system for guarantee microclimate of stockbreeding farm. *Proceeding of the International Conference. Technical and technological progress in aeroculture*. 2007, Raunas, pp. 143–146.
- [9]. Pushnov A. S., Berengarten M. G., Lagutkin M. G. et al. Vliyanie geometrii kanalov regulyarnoy keramicheskoy nasadki na gidrodinamiku tepломassoobmennykh protsessov [The influence of channel geometry of a regular ceramic packing on the hydrodynamics of heat and mass transfer processes]. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2008, no. 6, pp. 3–4. (In Russ.)
- [10]. Makhnin A. A. *Sovershenstvovanie protsessov i apparatov dlya ochistki parovozdushnykh smesey ot organicheskikh rastvoriteley sorbttsionnymi metodami* [Improvement of processes and equipment for cleaning air-vapor mixtures from organic solvents by sorption methods]. Doctoral dissertation abstract, Yaroslavl State Technical University, 2010, 34 p. (In Russ.)
- [11]. Pushnov A. S., Lozovaya N. P. Vkhodnoy uchastok gidrodinamicheskoy stabilizatsii potoka v regulyarnoy nasadke [The inlet section of hydrodynamic flow stabilization in a regular packing]. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 2009, vol. 86, no. 5, pp. 241–248. (In Russ.)
- [12]. Pushnov A. S., Lozovaya N. P., Lagutkin M. G. Model' vkhodnogo uchastka gidrodinamicheskoy stabilizatsii potoka v regulyarnoy nasadke [The model of the inlet section of hydrodynamic flow stabilization in a regular packing]. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2010, no. 1, pp. 4–7. (In Russ.)
- [13]. Ramm V. M. *Absorbtsiya gazov* [Gas absorption], 2nd ed., rev. Moscow: Khimiya Publ., 1976, 471 p. (In Russ.)
- [14]. Lozovaya N. P., Pushnov A. S. Vliyanie geometricheskikh kharakteristik regulyarnoy nasadki na osobennosti gravitatsionnogo techeniya plenki zhidkosti [The influence of the geometric characteristics of a regular packing on the features of gravitational flow of a liquid film]. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 2010, vol. 87, no. 7, pp. 353–356. (In Russ.)
- [15]. Ponomarenko V. S., Arefyev Yu. I. Gradirni promyshlennykh i energeticheskikh predpriyatiy [Cooling towers of industrial and power plants]. Moscow:

Energoatomizdat Publ., 1998, 376 p. (In Russ.)

[16]. Dmitrieva G. B., Berengarten M. G., Klyushenkova M. I., Pushnov A. S. Raschet gidrodinamicheskikh parametrov regulyarnykh strukturirovannykh nasadok [Calculation of hydrodynamic parameters of regular structured packings]. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2005, no. 12, pp. 5–9. (In Russ.)

[17]. Pushnov A. S., Chizh K. V. Geometricheskiye kharakteristiki nasypnykh ob'yemnykh reshetchatykh nasadok dlya kontaknykh apparatov xGeometric characteristics of bulk lattice packings for contact devices]. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 2014, vol. 91, no. 3, pp. 142–145. (In Russ.)

[18]. Pushnov A. S., Vitkovskaya R. F., Berengarten M. G. et al. Sovremennyye problemy nauki v oblasti zashchity okruzhayushchey sredy. Kontaknyye ustroystva dlya ochistki gazovykh vybrosov: uchebnoye posobiye [Modern problems of science in the field of environmental protection. Contact devices for gas emission cleaning: a textbook]. St. Petersburg: FGBOU VO "SPbGUPDT" Publ., 2016, 96 p. (In Russ.)

[19]. Berengarten M. G., Vitkovskaya R. F., Gorodilov A. A., Pushnov A. S. Protsessy i apparaty zashchity okruzhayushchey sredy. Nasadochnyye skrubbery dlya kontaknogo teploobmena: uchebnoye posobiye [Processes and apparatuses for environmental protection. Nozzle scrubbers for contact heat exchange: a textbook], St. Petersburg: FGBO VPO "SPbGUTD" Publ., 2014, 82 p. (In Russ.)

[20]. Vitkovskaya R. F. Razrabotka i issledovaniye polimernykh voloknistykh katalizatorov i kontaknykh elementov dlya resursosberezheniya i okhrany

okruzhayushchey sredy [Development and research of polymer fibrous catalysts and contact elements for resource saving and environmental protection]. Dr. Techn. Sci. Diss., SPb, SPbGUTiD, 2005. (In Russ.)

[21]. Kharitonov A. A. Isparitel'noye okhlazhdeniye v reguliruyemom kontaktnom ustroystve gradirni [Evaporative cooling in a controllable contact device of a cooling tower]. Abstract of Cand. Tech. Sci. Diss., Ivanovo: Ivanovo State Polytechnic University, 2013, 16 p. (In Russ.)

[22]. Tsurikova N. P. Vliyaniye vysoty bloka regulyarnoy nasadki na protsess isparitel'nogo okhlazhdeniya v ventilyatornykh gradirnyakh [The influence of the height of the regular packing block on the process of evaporative cooling in fan cooling towers]. Abstract of Cand. Tech. Sci. Diss., Moscow: M.V. Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technology, 2013, 24 p. (In Russ.)

[23]. Sister V. G., Pushnov A. S., Pirogova O. V., Karpenko A. S. Sovremennyye metody intensivatsii protsessov teplo-massoobmena v kontaknykh apparatakh s nasadkoy [Modern methods of intensifying heat and mass transfer processes in contact devices with a packing]. *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical technology], 2018, vol.19, no. 2, pp. 81–87. (In Russ.)

[24]. Sokolov A. S. Vliyaniye tipa keramicheskoy kol'tsevoy nasadki na protsess absorbitsii gazov [Influence of the type of ceramic ring packing on gas absorption process]. Author's abstract of dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow: Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science, 2009, 16 p. (In Russ.)

[25]. Pushnov A. S., Karpenko A. S. Geometricheskiye kharakteristiki nasadok i effektivnost' protsessov teplomassoobmena v kolonnykh apparatakh [Geometric

characteristics of packings and the efficiency of heat and mass transfer processes in column apparatus]. *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical technology], 2015, vol. 16, no. 9, pp. 557–563. (In Russ.)

[26]. Kogan A. M., Yudina L. A., Pushnov A. S. Gidravlicheskoje soprotivleniye i udelnaya poverkhnost' neregulyarnykh nasadok [Hydraulic resistance and specific surface of irregular packings]. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 2009, vol. 85, no. 3, pp. 147–152. (In Russ.)

[27]. Pushnov A. S., Berengarten M. G., Kagan A. M., Ryabushenko A. S. Gelikoidno-strukturnyye nasadki s izmenyaemoy geometriyey ukladki [Helicoidal-structured

packings with variable packing geometry]. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 2007, vol. 84, no. 5, pp. 249–251. (In Russ.)

[28]. Sukhov E. A., Gelfand R. E. Opredeleniye koeffitsientov tepla i massopredachi orositel'nykh ustroystv po opytным dannym [Determination of heat and mass transfer coefficients of irrigating devices based on experimental data]. *Izvestiya VNIIG im. B. Ye. Vedeneyeva* [Proceedings of the VNIIG named after B. E. Vedeneyev], 1971, vol. 96, pp. 256–262. (In Russ.)

Berengarten M. G. — Cand. Sc. (Chem.), professor, Department of Hardware design and automation of technological production named after prof. M. B. Generalov, Moscow Polytechnic University (B. Semenovskaya st., 38, Moscow, 107023, Russian Federation).

Pushnov A. S. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Moscow Polytechnic University (B. Semenovskaya st., 38, Moscow, 107023, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Совершенствование насадочных контактных устройств массообменных аппаратов / М. Г. Беренгартен, А. С. Пушнов // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 2(9). С. 51 – 67.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-51-67

Please cite this article as:

Berengarten M. G., Pushnov A. S. Improving the nozzle contact devices of mass transfer equipment. *Industrial processes and Technologies*, 2023, vol. 3, no. 2(9), pp. 51 – 67.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-51-67

УДК 547.565.3

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-68-78

К вопросу о синтетическом потенциале 2,4,6-тригидрокситолуола — некоторые особенности строения ацильных производных

Ю. М. Атрощенко^{*}, И. В. Блохин^{*}, К. И. Кобраков^{**}, Д. Н. Кузнецов^{**},
В. С. Селезнёв^{**1}, Н. Ю. Совостьянов^{**}

^{*} Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого,
Тула, Россия

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

Аннотация

В работе представлены результаты изучения методами квантовой химии и ЯМР ¹H – спектроскопии образования внутримолекулярных водородных связей в молекулах 2,4,6-тригидрокси-3-метилбензальдегида и 1-(2,4,6-тригидрокси-3-метилфенил)этан-1-она. На основании данных по полным энергиям возможных конформаций и длинам водородных связей сделаны выводы о предпочтительном образовании связей между карбонильной группой и атомами водорода групп ОН, связанных со вторым атомом углерода карбоцикла. Сделанные выводы хорошо согласуются с данными ЯМР ¹H-спектров исследованных соединений.

Сделано заключение, что полученные данные имеют важное значения для трактовки результатов свойств производных 1,3,5-тригидроксибензола и 2,4,6-тригидрокситолуола.

Ключевые слова

2,4,6-тригидрокситолуол, ацилирование, 2,4,6-тригидрокси-3-метилбензолкарбальдегид, 1-(2,4,6-тригидрокси-3-метилфенил)этан-1-он, водородная связь, метод DFT.

Введение

Общеизвестно, что одним из определяющих векторов развития современного социума является следование принципам устойчивого развития общества (УРО) [1].

В соответствии с этими принципами химии (как синтетики — исследователи, так и технологи) в своих работах концентрируют внимание на использовании «зеленых» технологий, сырья двойного

назначения, техногенных и антропогенных отходов и т. п.

Изложенное явилось побудительным мотивом того, что в начале двухтысячных годов одним из основных научных направлений кафедры органической химии РГУ им. А. Н. Косыгина стало изучение синтетического потенциала продуктов химической трансформации старейшего

¹ Для переписки

Email: Sinntezz@mail.ru

бризантного взрывчатого вещества — 2,4,6-тринитротолуола (ТНТ, тол, тротил).

Большое теоретическое и практическое значение подобных исследований обусловлено следующими факторами: во-первых, к началу указанного периода невосребованные запасы ТНТ, подлежащие изъятию из снятых с вооружения боеприпасов только в РФ составляли несколько сотен тысяч тонн [2], во вторых, производство ТНТ является одним из наиболее технологичных, безопасных и безотходных, а сам продукт имеет химическое строение, предопределяющее широкий спектр возможных химических превращений, приводящих к таким востребованным веществам как анилины, фенолы, азопроизводные, О,N, содержащие гетероциклические соединения и т. д. и т. п.

Для РФ обсуждаемая тематика имеет особое значение, т. к. превращение ТНТ в сырьё «двойного назначения» может стать этапом возрождения в стране подотрасли малотоннажной химии и создания «импортоопережающих» технологий.

В результате систематических исследований, проведенных в период 2003–2023 гг. и частично обобщенных в работе [3], установлено, что ТНТ является доступным, недорогим и синтетически «химически гибким» прекурсором для широкой гаммы органических соединений самого разнообразного строения, перспективных для ряда отраслей практического применения.

В процессе работ по оценке синтетического потенциала таких продуктов химической трансформации ТНТ как 1,3,5-тригидроксibenзол (ТГБ) и 2,4,6-тригидрокситолуол (ТГТ), являющихся в РФ доступными продуктами (реагентами) [4, 5], выявлены неожиданные особенности их реакционной способности, обусловленные химическим и электронным строением.

Эти особенности проявляются, в частности, при проведении реакции электрофильного замещения. Показано, что в «стандартных условиях» реакции азосочетания с фенолами, т. е. при $pH = 7 \div 12$ в случае ТГТ, реакция, независимо от соотношения реагентов, температуры процесса или порядка прибавления реагентов, проходит с образованием смеси продуктов моно- и бисазосочетания. Только в сильно кислой среде при значениях pH, близких к 1, удается с выходами, близкими к количественным, получить продукты моноазосочетания. На селективность реакции также значительное влияние оказывает электронное строение диазосоставляющей компоненты [6, 7].

В работе [8] впервые описана реакция нитрозирования ТГТ и показано, что при широком варьировании соотношения реагентов и условий реакций всегда получается либо только продукт биснитрозирования, либо смесь моно- и биснитрозопродукта, а также не вступившего в реакцию ТГТ.

Изучение реакции бромирования в интервале температур от -70°C до $+25^\circ\text{C}$, соотношении реагентов ТГТ: Br_2 от 1 : 0.2 до 1 : 2.5, в различных растворителях также показало, что всегда образуется смесь продуктов моно- и бисзамещения в соотношении моно : бис = 1 : 2 [7].

На наш взгляд, описанные особенности химического поведения ТГТ обусловлены лабильностью электронной системы тригидроксибензильного фрагмента, которая претерпевает выраженные возмущения при изменении кислотности среды, введении в бензольное ядро групп, склонных к таутомерным превращениям (азо-гидразоформа, нитрозо-гидроксииминная формы), групп и атомов, имеющих легкополяризуемые (подвижные) электронные пары, а также возможность образования

сильных, разнообразных и многоцентровых водородных связей.

Однозначно все эти факторы должны приниматься во внимание при дизайне структур, планируемых к синтезу на базе ТГБ и ТГТ, подборе условий проведения реакций и интерпретации результатов.

В настоящей статье мы приводим данные, полученные при изучении электронной структуры моноформил- и моноацетилпроизводных ТГТ, полученные по результатам квантовохимических расчетов и спектров ЯМР ^1H , подтверждающие вышеизложенные положения.

Материалы и методы решения задач

Изученные в работе моноформил- и моноацетилпроизводные ТГТ синтезированы по методикам, приведенным в [9, 10].

Спектры ЯМР ^1H снимали на приборе Bruker AM300.

Оптимизацию геометрических параметров исследуемых структур, расчет полной энергии проводили в программном пакете Firefly 8.2.0 [11] в рамках приближения теории функционала плотности с использованием гибридного трехпараметрического обменного функционала Беке [12] с корреляционным функционалом Ли-Янга-Парра [13] (B3LYP) [14] и базисного набора Даннинга aug-cc-pVDZ [15]. Полная оптимизация геометрии проводилась без ограничений по типу симметрии. Все рассчитанные в данной работе структуры являются стационарными точками на ППЭ, что было подтверждено анализом теоретического колебательного спектра, рассчитанного из гессиана, при этом для минимумов на ППЭ диагонализированная матрица Гесса содержит только положительные члены. Учет влияния модельного растворителя — воды и ДМСО реализован в рамках континуальной модели РСМ [16] при 298.15 К.

Результаты и обсуждение

Синтез 2,4,6-тригидрокси-3-метилбензальдегида (2) и 1-(2,4,6-тригидрокси-3-метилфенил)этан-1-она (3) осуществлялся ацилированием ТГТ (1) по методикам, описанным ранее [9, 10] и несколько модифицированным нами.

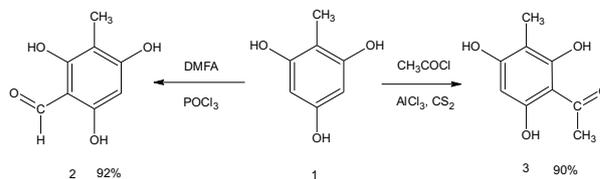


Рисунок 1 — Схематическое описание путей синтеза 2,4,6-тригидрокси-3-метилбензальдегида **2** и 1-(2,4,6-тригидрокси-3-метилфенил)этан-1-она **3**

В спектре ЯМР ^1H соединения **2** имеются сигналы: 1.8 м.д., (с, CH₃); 6.0 м.д. (с, H ар.); 9.9 м.д. (с, CHO); 10.5 м.д. (с, OH); 10.6 м.д. (с, OH); 12.3 м.д. (с, OH).

В спектре ЯМР ^1H соединения **3** имеются сигналы: 1.8 м.д., (с, CH₃); 2.6 м.д. (с, CH₃CO); 6.0 м.д. (с, H ар.); 10.3 м.д. (с, OH); 10.5 м.д. (с, OH); 13.9 м.д. (с, OH).

В обоих спектрах обращают на себя внимание сигналы, относящиеся к протонам групп OH. Если сигналы двух протонов (в каждом соединении) лежат в области, в общем-то, «обычной» для протонов фенольных групп 10.3–10.6 м.д., то третий сигнал находится в значительно более слабом поле: 13.9 м.д. (соед. **3**) и 12.3 м.д. (соед. **2**). В ранее опубликованных работах [17, 18] подобные сдвиги протонов гидроксильных групп в карбонильных производных ТГТ отмечались, но не обсуждались.

Поскольку синтез соединений **2** и **3** выполнялся в русле работ, направленных на получение на базе ТГТ продуктов с хелатофорными свойствами и конечная цель заключалась в изучении возможности создания хелатофорных центров с участием групп –OH и >C=O, представлялось теоретически и практически интересным и

значимым объяснить наблюдаемый экспериментальный факт.

Теоретические спектры соединений 1 и 2, полученные с использованием программы ACDLabs, демонстрируют, что ацетильный заместитель вызывает повышение кислотности групп ОН и, как следствие, сдвиг всех сигналов протонов групп ОН с 11.5 м.д. до 12.6 м.д.

Таким образом, наблюдаемый нами в экспериментальных спектрах значительный слабopольный сдвиг сигнала только одного протона из трех нельзя объяснить лишь электроноакцепторным влиянием карбонильной группы.

Нами сделано предположение, что наблюдаемый сдвиг сигнала связан с образованием сильной внутримолекулярной водородной связи.

С целью доказательства возможности образования внутримолекулярных водородных связей была проведена геометрическая оптимизация и расчет полной энергии конформаций соединения 2, в которых карбонильная группа теоретически может образовывать водородную связь как с гидроксильной группой в положении 2, так и 6 бензольного кольца (рисунок 1) в газовой

фазе, воде и диметилсульфоксиде (ДМСО) (таблица 1).

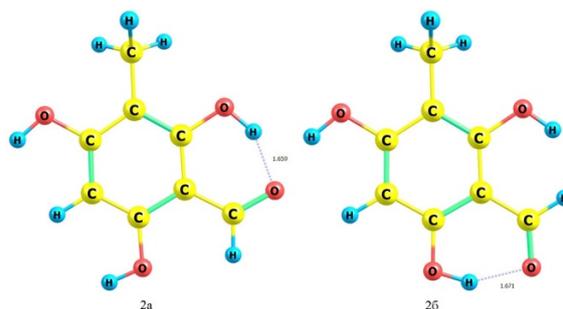


Рисунок 2 — Геометрическая структура конформеров 2,4,6-тригидрокси-3-метилбензолкарбальдегида 2а и 2б, оптимизированная методом DFT/B3LYP/aug-сс-pVDZ в воде

Как видно из данных таблицы 1, наименьшую полную энергию во всех трех средах имеет конформация 2а, в которой карбонильная группа образует водородную связь с гидроксильной группой во втором положении бензольного ядра, причем наиболее устойчивая структура образуется в воде, наибольшая разница в энергиях конформаций наблюдается также в воде и ДМСО. Эти данные подтверждаются также значением длины водородных связей (таблица 2).

Таблица 1 — Полные энергии конформеров 2,4,6-тригидрокси-3-метилбензолкарбальдегида 2а и 2б в газовой фазе, воде и ДМСО, рассчитанные методом DFT/B3LYP/aug-сс-pVDZ

Структура	Газовая фаза		Вода		ДМСО	
	Полная энергия, Хартри	Относительная полная энергия*, кДж/моль	Полная энергия, Хартри	Относительная полная энергия*, кДж/моль	Полная энергия, Хартри	Относительная полная энергия*, кДж/моль
2а	-610.6620828	42.71	-610.6783515	0.00	-610.6780971	0.67
2б	-610.6597888	48.74	-610.6748962	9.07	-610.6746639	9.68
Разность энергий		6.02		9.07		9.01

* Энергия наиболее устойчивого соединения принята за ноль.

Таблица 2 — Длины внутримолекулярных водородных связей конформеров 2,4,6-тригидрокси-3-метилбензолкарбальдегида **2a** и **2б** в газовой фазе, воде и ДМСО, рассчитанные методом DFT/B3LYP/aug-cc-pVDZ

Структура	Длина водородной связи, (Å)		
	Газовая фаза	Вода	ДМСО
2a	1.661	1.659	1.659
2б	1.685	1.671	1.671

Как видно из данных таблицы 2, наименьшая длина водородной связи также наблюдается для конформации **2a** в воде и ДМСО (таблица 2). Особенно эта разница в длине водородной связи между конформациями **2a** и **2б** заметна при расчётах в газовой фазе, где она составляет 0.024 Å, тогда как в воде и ДМСО — в два раза меньше.

На следующем этапе работы нами также была проведена геометрическая оптимизация и расчет полной энергии конформаций соединения **3** (1-(2,4,6-тригидрокси-3-метилфенил)этан-1-она), в которых карбонильная группа теоретически может образовывать водородную связь как с гидроксильной группой в положении 2, так и 6 (рисунок 2) в газовой фазе,

воде и диметилсульфоксиде (ДМСО) (таблица 3).

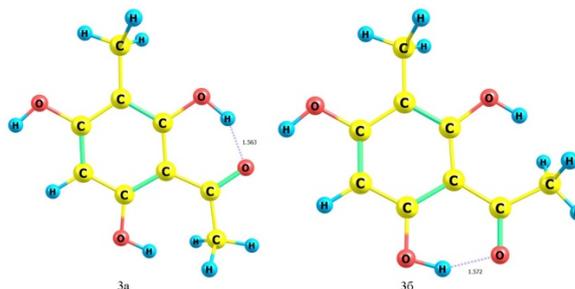


Рисунок 3 — Геометрическая структура конформеров 1-(2,4,6-тригидрокси-3-метилфенил)этан-1-она **3a** и **3б**, оптимизированная методом DFT/B3LYP/aug-cc-pVDZ в воде

Анализ таблицы 3 показывает, что также как и для соединения **2**, наиболее устойчивой конформацией 1-(2,4,6-тригидрокси-3-метилфенил)этан-1-она является та, в которой карбонильная группа образует водородную связь с гидроксильной группой в положении 2 (структура **3a**), причем, в отличие от вещества **2**, наибольшая разница в энергиях конформаций наблюдается при расчётах в газовой фазе, однако наиболее устойчивая конформация образуется по-прежнему в водной среде. В целом, разница в энергиях конформаций в 4–8.5 раз меньше, чем в случае 2,4,6-тригидрокси-3-метилбензолкарбальдегида (**2**).

Таблица 3 — Полные энергии конформеров 1-(2,4,6-тригидрокси-3-метилфенил)этан-1-она **3a** и **3б** в газовой фазе, воде и ДМСО, рассчитанные методом DFT/B3LYP/aug-cc-pVDZ

Структура	Газовая фаза		Вода		ДМСО	
	Полная энергия, Хартри	Относительная полная энергия*, кДж/моль	Полная энергия, Хартри	Относительная полная энергия*, кДж/моль	Полная энергия, Хартри	Относительная полная энергия*, кДж/моль
3a	-649.9825703	39.29	-649.9975358	0.00	-649.9973328	0.53
3б	-649.9820148	40.75	-649.9971275	1.07	-649.9968722	1.74
Разность энергий		1.46		1.07		1.21

* Энергия наиболее устойчивого соединения принята за ноль.

Значения длин внутримолекулярных водородных связей конформеров 1-(2,4,6-тригидрокси-3-метилфенил)этан-1-она **3а** и **3б** представлены в таблице 4.

Таблица 4 — Длины внутримолекулярных водородных связей конформеров 1-(2,4,6-тригидрокси-3-метилфенил)этан-1-она **3а** и **3б** в газовой фазе, воде и ДМСО, рассчитанные методом DFT/B3LYP/aug-ss-pVDZ

Структура	Длина водородной связи, (Å)		
	Газовая фаза	Вода	ДМСО
3а	1.584	1.563	1.563
3б	1.592	1.572	1.572

Как видно из таблицы 4, в отличие от вещества **2**, водородная связь в исследуемом соединении **3** короче в среднем на 0.093 Å, что свидетельствует о большей её прочности. Наименьшая длина по-прежнему наблюдается у конформера **3а**, в котором карбонильная группа образует связь с гидроксогруппой у второго углеродного атома, хотя разница в энергиях между конформациями **3а** и **3б** менее существенная, чем для конформеров 2,4,6-тригидрокси-3-метилбензолкарбальдегида **2а** и **2б**.

Заключение

1. Приведенные результаты убедительно показывают, что в молекулах 2,4,6-тригидрокси-3-метилбензолкарбальдегида и 1-(2,4,6-тригидрокси-3-метилфенил)этан-1-она реализуются внутримолекулярные водородные связи. Причем в обеих молекулах водородные связи, образованные карбонильной группой с гидроксигруппами у второго атома углерода, более стабильны (прочны), чем у четвертого атома углерода.

2. В настоящее время мы получили экспериментальные подтверждения заметно пониженной реакционной способности группы ОН в положении 2 ацильных

производных, а также в ряде соединений, синтезированных на их базе.

Результаты входят в материал публикации, направленной в печать.

3. Полученные в работе результаты являются, на наш взгляд, ещё одним подтверждением специфических химических свойств симметричных трехатомных фенолов и их производных, обусловленных их строением и объясняющих в определенной мере тот факт, что указанные фрагменты зачастую являются свойствоопределяющими структурными элементами в сложных молекулах. В частности, синтезированные и изученные производные ТГБ и ТГТ в сравнении со структурными аналогами имеют выраженные антиоксидантные свойства, пониженную токсичность, повышенные хелатирующие свойства, выраженную специфическую биологическую активность, например, цитотоксические свойства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Бузник В. М. Роль химии в устойчивом развитии общества. Хабаровск; Дальнаука, 1999. 30 с.
- [2]. Авсеенко И. М. Анализ содержания работ по утилизации обычных видов боеприпасов на предприятиях ОПК. VI международная научно-техническая конференция «Комплексная утилизация обычных видов боеприпасов», Сб. докладов, М., 2005, с. 3–8.
- [3]. Алексеев С. Г., Петрова Е. К., Кузнецов Д. Н., Кобраков К. И. Краткий исторический очерк по химической трансформации 2,4,6-тринитротолуола. *Бутлеровские сообщения*, 2020, т. 62, № 4, с. 1–11.
- [4]. Шевелев С. А., Шахнес А. Х., Воробьев С. С. Патент РФ 2292329 Способ получения 2,4,6 – тригидрокситолуола; заявитель Институт органической химии им.

Н. Д. Зелинского РАН. Заяв. 12.10.2005. Оpubл. 27.01.2007.

[5]. Шурова И. А., Сысолятин С. В., Малыхин В. В., Арбагозова А. А. Способ переработки 2,4,6-тринитротолуола: получение флороглюцина. *Южно-сибирский научный вестник*, 2010, т. 28., № 4, с. 214–218.

[6]. Ушкаров В. И., Кобраков К. И., Алафинов А. И., Шевелев С. А., Шахнес А. Х. Метилфлороглюцин – доступный полупродукт для синтеза азокрасителей. *Химическая технология*, 2006, № 87, с. 5–8.

[7]. Ушкаров В. И. Синтез и исследование свойств азосоединений на основе метилфлороглюцина : дисс...канд. хим. наук : 02.00.03, Москва, 2006, 140 с.

[8]. Кобраков К. И., Станкевич Г. С., Ручкина А. Г., и др. Новый полупродукт перспективных азокрасителей на основе 2,4,6 – тригидрокситолуола. *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*, 2012, № 3, с. 142–144.

[9]. Teng X., Wang Y., Gu J., Shi P., Shen Z., & Ye L. Antifungal Agents: Design, Synthesis, Antifungal Activity and Molecular Docking of Phloroglucinol Derivatives. *Molecules*, 2018, no. 23(12), p. 3116. DOI: 10.3390/molecules23123116

[10]. Wu J., Mu R., Sun M., Zhao N. et al. Derivatives of Natural Product Agrimophol as Disruptors of Intrabacterial pH Homeostasis in Mycobacterium tuberculosis. *ACS Infectious Diseases*, 2019, no. 5(7), p. 1087–1104.

DOI: 10.1021/acsinfecdis.8b00325

[11]. Granovsky A. A. Firefly version 8.0 [Electronic resource]. 2016. URL: <http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html>.

[12]. Becke A. D. Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange, *J. Chem. Phys*, 1993, vol. 98, no. 7, pp. 5648–5652. DOI: 10.1063/1.464913

[13]. Lee C., Yang W., Parr R. G. Development of the Colle-Salvetti correlation-energy formula into a functional of the electron density, *Physical review B*, 1988. vol. 37, no. 2. pp. 785.

DOI: 10.1103/physrevb.37.785

[14]. Stephens P. J. et al. Ab initio calculation of vibrational absorption and circular dichroism spectra using density functional force fields, *The Journal of Physical Chemistry*, 1994, vol. 98, no. 45, pp. 11623–11627.

DOI: 10.1021/j100096a001

[15]. Dunning Jr. T. H. Gaussian basis sets for use in correlated molecular calculations. I. The atoms boron through neon and hydrogen, *The Journal of chemical physics*, 1989, vol. 90, no. 2. pp. 1007–1023.

DOI: 10.1063/1.456153

[16]. Tomasi J., Mennucci B., Cammi R. Quantum mechanical continuum solvation models, *Chemical reviews*, 2005, vol. 105, no. 8, pp. 2999–3094.

DOI: 10.1021/cr9904009

[17]. Xiang Zh., Li En-Zhen, Liang H. et al. Concise synthesis and cellular evaluation of 3'-formyl-4',6'-dihydroxy-2'-methoxy-5'-methylchalcone (fmc) and its analogues. *Synthetic Communications*, 2014, vol. 44, pp. 3139–3147.

[18]. Kenneth K. C. Hong, Graham E. Ball, David StC. Black, Naresh Kumar. The Mosaic of Rottlerin. *J. Org. Chem*, 2015, no. 80(21), pp. 10668–10674.

DOI: 10.1021/acs.joc.5b01827

Атрощенко Юрий Михайлович — д-р хим. наук, профессор, профессор кафедры химии, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (Российская Федерация, 300026, Тула, пр-т Ленина, д. 125)

Блохин Игорь Васильевич — канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры химии, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (Российская Федерация, 300026, Тула, пр-т Ленина, д. 125)

Кобраков Константин Иванович — д-р хим. наук, профессор, профессор кафедры органической химии, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1)

Кузнецов Дмитрий Николаевич — канд. хим. наук, доцент, заведующий кафедрой органической химии, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1)

Селезнёв Владислав Сергеевич — аспирант кафедры органической химии, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1)

Совостьянов Никита Юрьевич — магистрант кафедры органической химии, Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1)

On the question of the synthetic potential of 2,4,6-trihydroxytoluene — some structural features of acyl derivatives

Yu. M. Atroshchenko^{*}, I. V. Blokhin^{*}, K. I. Kobrakov^{**}, D. N. Kuznetsov^{**},
V. S. Seleznev^{**1}, N. Yu. Sovost'ianov^{**}

^{*} Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, Tula, Russia

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

Abstract

The paper presents the results of studying the formation of intramolecular hydrogen bonds in 2,4,6-trihydroxy-3-methylbenzaldehyde and 1-(2,4,6-trihydroxy-3-methylphenyl)ethane-1-one molecules by quantum chemistry and NMR ¹H spectroscopy. Based on data on the total energies of possible conformations and the lengths of hydrogen bonds between the carbonyl group and the hydrogen atoms of OH groups associated with the second carbon atom of the carbocycle. The conclusions made are in good agreement with the NMR data of the ¹H spectra of the studied compounds. It is concluded that the data obtained are important for the interpretation of the results of the properties of 1,3,5-trihydroxybenzene and 2,4,6-trihydroxytoluene derivatives.

Keywords

2,4,6-trihydroxytoluene, acylation, 2,4,6-trihydroxy-3-methylbenzene carbaldehyde, 1-(2,4,6-trihydroxy-3-methylphenyl)ethane-1-one, hydrogen bonding, DFT method.

REFERENCES

- [1]. Buznik V. M. Rol' khimii v ustoichivom razvitii obshchestva [The role of chemistry in the sustainable development of society], Khabarovsk; Dal'nauka Publ., 1999, 30 p. (In Russ.)
- [2]. Avseenko I. M. Analiz sostoianiia rabot po utilizatsii obychnykh vidov boepripasov na predpriatiiakh OPK [Analysis of the state of work on the disposal of conventional types of ammunition at defense industry enterprises]. VI mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia "Kompleksnaia utilizatsiia obychnykh vidov boepripasov", Sb. dokladov [VI International Scientific and Technical Conference "Integrated disposal of conventional types of ammunition", Reports], Moscow, 2005, pp. 3–8 (In Russ.).
- [3]. Alekseev S. G., Petrova E. K., Kuznetsov D. N., Kobrakov K. I. Kratkii istoricheskii ocherk po khimicheskoi transformatsii 2,4,6-trinitrotoluola [A brief historical sketch of the chemical transformation of 2,4,6-trinitrotoluene], Butlerovskie soobshcheniia [Butler communications], 2020, vol. 62, no. 4. pp. 1–11 (In Russ.)

¹ Corresponding author
Email: Sinntezz@mail.ru

- [4]. Shevelev S. A., Shakhnes A. Kh., Vorob'ev S. S. Patent RF 2292329 Sposob polucheniia 2,4,6 – trigidroksitoluola [A method for producing 2,4,6 – trihydroxytoluene]; zaiavitel' Institut organicheskoi khimii im. N. D. Zelinskogo RAN [The applicant is the N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry of the Russian Academy of Sciences]. Zaiav. 12.10.2005, Opubl. 27.01.2007 (In Russ.)
- [5]. Shchurova I. A., Sysoliatin S. V., Malykhin V. V., Arbagozova A. A. Sposob pererabotki 2,4,6-trinitrotoluola: poluchenie florogliutsina [Method of processing 2,4,6-trinitrotoluene: obtaining phloroglucine]. *Iuzhno-sibirskii nauchnyi vestnik* [South Siberian Scientific Bulletin], 2010, vol. 28, № 4, pp. 214–218 (In Russ.)
- [6]. Ushkarov V. I., Kobrakov K. I., Alafinov A. I., Shevelev S. A., Shakhnes A. Kh. Metilflorogliutsin – dostupnyi poluprodukt dlia sinteza azokrasitelei [Methylfloroglucin – an affordable intermediate for the synthesis of azo dyes]. *Khimicheskaiia tekhnologiia* [Chemical Technology], 2006, № 87, pp. 5–8 (In Russ.)
- [7]. Ushkarov V. I. Sintez i issledovanie svoistv azosoedinenii na osnove metilflorogliutsina [Synthesis and investigation of properties of azo compounds based on methylfloroglucin]: diss... kand. khim.nauk [diss... Candidate of Chemical Sciences]: 02.00.03, Moscow, 2006, 140 p. (In Russ.)
- [8]. Kobrakov K. I., Stankevich G. S., Ruchkina A. G., et al. Novyi poluprodukt perspektivnykh azokrasitelei na osnove 2,4,6 – trigidroksitoluola [A new intermediate of promising azo dyes based on 2,4,6 – trihydroxytoluene]. *Izvestiia vuzov. Tekhnologiia tekstil'noi promyshlennosti* [Textile Industry Technology. Series: “Proceedings of Higher Educational Institutions”], 2012, № 3, pp. 142–144 (In Russ.)
- [9]. Teng X., Wang Y., Gu J., Shi P., Shen Z., & Ye L. Antifungal Agents: Design, Synthesis, Antifungal Activity and Molecular Docking of Phloroglucinol Derivatives. *Molecules*, 2018, no. 23(12), p. 3116. DOI: 10.3390/molecules23123116
- [10]. Wu J., Mu R., Sun M., Zhao N. et al. Derivatives of Natural Product Agrimophol as Disruptors of Intrabacterial pH Homeostasis in *Mycobacterium tuberculosis*. *ACS Infectious Diseases*, 2019, no. 5(7), p. 1087–1104. DOI: 10.1021/acsinfecdis.8b00325
- [11]. Granovsky A. A. Firefly version 8.0 [Electronic resource]. 2016. URL: <http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html>.
- [12]. Becke A. D. Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange, *J. Chem. Phys.*, 1993, vol. 98, no. 7, pp. 5648–5652. DOI: 10.1063/1.464913
- [13]. Lee C., Yang W., Parr R. G. Development of the Colle-Salvetti correlation-energy formula into a functional of the electron density, *Physical review B.*, 1988. vol. 37, no. 2. pp. 785. DOI: 10.1103/physrevb.37.785
- [14]. Stephens P. J. et al. Ab initio calculation of vibrational absorption and circular dichroism spectra using density functional force fields, *The Journal of Physical Chemistry*, 1994, vol. 98, no. 45, pp. 11623–11627. DOI: 10.1021/j100096a001
- [15]. Dunning Jr. T. H. Gaussian basis sets for use in correlated molecular calculations. I. The atoms boron through neon and hydrogen, *The Journal of chemical physics*, 1989, vol. 90, no. 2. pp. 1007–1023. DOI: 10.1063/1.456153
- [16]. Tomasi J., Mennucci B., Cammi R. Quantum mechanical continuum

solvation models, *Chemical reviews*, 2005, vol. 105, no. 8, pp. 2999–3094.

DOI: 10.1021/cr9904009

[17]. Xiang Zh., Li En-Zhen, Liang H. et al. Concise synthesis and cellular evaluation of 3'-formyl-4',6'-dihydroxy-2'-methoxy-5'-methylchalcone (fmc) and its analogues.

Synthetic Communications, 2014, vol. 44, pp. 3139–3147.

[18]. Kenneth K. C. Hong, Graham E. Ball, David StC. Black, Naresh Kumar. The Mosaic of Rottlerin. *J. Org. Chem.*, 2015, no. 80(21), pp. 10668–10674. DOI: 10.1021/acs.joc.5b01827

Atroshchenko Yu. M. — Dr. Sc. (Chem.), Professor of the Department of Chemistry, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Lenin Ave., 125, Tula, 300026, Russian Federation).

Blokhin I. V. — Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Professor of the Department of Chemistry, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Lenin Ave., 125, Tula, 300026, Russian Federation).

Kobraikov K. I. — Dr. Sc. (Chem.), Professor, Department of Organic Chemistry, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Kuznetsov D. N. — Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Professor, Head of the Department of Organic Chemistry, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Seleznev V. S. — Postgraduate student, Department of Organic Chemistry, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Sovost'ianov N. Yu. — undergraduate student, Department of Organic Chemistry, The Kosygin State University of Russia (Malaya Kaluzhskaya st., 1, Moscow, 119071 Russian Federation).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

К вопросу о синтетическом потенциале 2,4,6-тригидрокситолуола — некоторые особенности строения ацильных производных / Ю. М. Атрощенко, И. В. Блохин, К. И. Кобраков, Д. Н. Кузнецов, В. С. Селезнёв, Н. Ю. Совостьянов // *Промышленные процессы и технологии*. 2023. Т. 3. № 2(9). С. 68 – 78.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-68-78

Please cite this article as:

Atroshchenko Yu. M., Blokhin I. V., Kobraikov K. I., Kuznetsov D. N., Seleznev V. S., Sovost'ianov N. Yu. On the question of the synthetic potential of 2,4,6-trihydroxytoluene — some structural features of acyl derivatives. *Industrial processes and Technologies*, 2023, vol. 3, no. 2(9), pp. 68 – 78.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-68-78

Получение электрической энергии из промышленных сточных вод при помощи обратного электродиализа

В. И. Быков*, С. И. Ильина*, Л. В. Равичев*,¹

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

Аннотация

В работе рассматривается применение мембранных процессов как один из альтернативных методов получения электрической энергии. В качестве данных процессов рассмотрен обратный электродиализ. Выделены преимущества и недостатки процесса, а также проблемы его практического применения для получения энергии из морской и речной воды. Показано, что данный процесс нерентабелен, так как при больших производительностях потребление электроэнергии насосами превышает производительность электродиализатора. Были сделаны выводы о возможности применения процесса обратного электродиализа для рекуперации энергии из промышленных сточных вод. Показаны зависимости получаемой мощности от солесодержания низкоконцентрированного и высококонцентрированного растворов, а также от отношения их солесодержаний. На основании данных зависимостей сделаны выводы об оптимальном отношении солесодержаний.

Ключевые слова

Электродиализ, обратный электродиализ, мембранная технология.

Введение

Доступность энергоресурсов становится краеугольным камнем в человеческих отношениях, что подчас определяет межгосударственные взаимодействия. Энергетический кризис сказывается не только на работе промышленных предприятий, но и обыденной жизни населения.

К основным (или традиционным) источникам электроэнергии относят теплоэлектростанции, гидроэлектростанции, атомные электростанции. Главные проблемы их использования — расход

невозобновляемых ресурсов и загрязнение окружающей среды.

В настоящее время все шире стали применять в качестве источников электроэнергии возобновляемые ресурсы — энергию ветра, солнца, приливов.

Преимуществом альтернативного получения энергии, помимо использования возобновляемых ресурсов, является отсутствие загрязнений среды при производстве энергии, а главными недостатками — высокая стоимость получаемой энергии

¹ Для переписки

Email: ravichevlv@list.ru

(в разы превышающая стоимость энергии, получаемой традиционными способами) и наличие суточных флуктуаций при получении электроэнергии. Также стоит отметить загрязнение среды при производстве и утилизации компонентов электростанций — свалки лопастей ветрогенераторов, загрязнение среды при производстве солнечных панелей.

На данный момент ведутся исследования альтернативных методов получения энергии с применением полупроницаемых мембран — осмотические электростанции и обратный электродиализ. Оба метода в качестве движущей силы используют разность концентраций (например, морской и речной воды) [1].

В работе по изучению и практическому применению обратного электродиализа было отмечено, что его невозможно использовать в промышленных масштабах, так как при больших производительностях потребление электроэнергии насосами превышает количество произведенной энергии [2-4]. Возможными путями решения данной проблемы является использование небольших потоков с более высокой концентрацией, применение более энергоэффективных насосов, а также мембран и аппаратов с меньшим гидродинамическим сопротивлением. Кроме того, проанализировав достоинства и недостатки предлагаемого метода, был сделан вывод, что он может быть использован на химических предприятиях, где промышленные сточные воды имеют высокую концентрацию и перекачиваются насосами. Такой вариант может разрешить вышеуказанные проблемы и сгенерировать часть электроэнергии, которая может быть возвращена обратно в процесс.

Обратный электродиализ

Обратный электродиализ — это процесс, позволяющий преобразовать

разность концентраций потоков в разность потенциалов.

Схема процесса представлена на рисунке 1. Под действием диффузии в модуле создается направленный ток ионов за счет диффузии из камеры, где протекает поток электролита с более высокой концентрацией в камеру с потоком электролита с более низкой концентрацией. Катионы, согласно градиенту концентрации, диффундируют через полупроницаемую катионообменную мембрану из соленого потока в обессоленный. Таким же образом переходят анионы, но через полупроницаемую анионообменную мембрану. Ионный ток преобразуется в электрический на окислительно-восстановительных электродах [5-10].

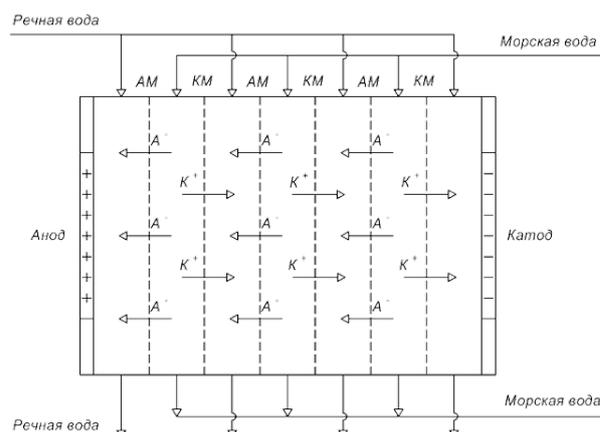


Рисунок 1 — Схема процесса обратного электродиализа

К преимуществам получения энергии при помощи градиента солености относятся: возобновляемость ресурсов (при использовании речной и морской воды), отсутствие различных загрязнений, отсутствие суточных флуктуаций.

Энергию градиента солености можно охарактеризовать как энергию смешения двух растворов с разной концентрацией соли. Мощность обратного электродиализа можно рассчитать по формуле 1, включающей в себя параметры аппарата (число и площадь мембран), параметры мембраны (селективность, сопротивление) и

параметры потоков (активности и удельное сопротивление растворов).

$$W_{max} = \frac{N * A \left[\left(\alpha \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{ac}{ad} \right) \right)^2 \right]}{(RAEM + RCEM + dc/kc + dd/kd)} \quad (1)$$

где α — селективность мембран, N — число мембранных пар (штук), A — площадь мембраны (m^2); ac и ad — активности концентрированного и разбавленного растворов соответственно; $RAEM$ и $RCEM$ — сопротивление анионообменной и катионообменной мембран ($Om \cdot m$); dc , dd — толщина отсеков концентрирования и обессоливания (m); kc и kd — удельное сопротивление концентрированного и разбавленного растворов соответственно.

Стоит отметить, что основное влияние на протекание процесса оказывает не разница концентраций, а отношение активностей концентрированного и разбавленного растворов.

Нами были проведены расчёты с целью уточнения оптимальных условий использования обратного электродиализа. Для расчета были выбраны мембраны производства компании “Fumasep”: FAD (анионообменные), FKD (катионообменные).

Параметры электродиализного аппарата:

- Количество ячеек (пар мембран): 200 ячеек.
- Площадь мембраны: $0.24 m^2$.
- Сопротивление мембраны: $5.9 \times 10^{-4} Om \cdot m^2$.
- Селективность мембраны: 0.88.
- Толщина камеры обессоливания: 2 мм.
- Толщина камеры концентрирования: 1 мм.

Как следует из формулы (1), для эффективного проведения процесса необходимы мембраны, обладающие низким сопротивлением. Также значительный вклад в выработку электроэнергии имеет

удельное сопротивление растворов, которое зависит от концентрации раствора.

В рассматриваемом нами интервале наблюдается следующая зависимость удельного сопротивления от содержания, представленная на рисунке 2. Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод, что при низком содержании (до ~ 5 г/л по NaCl) определяющим фактором является удельное сопротивление, так как с уменьшением содержания наблюдается резкий рост удельного сопротивления. Далее, при концентрациях выше ~ 5 г/л, удельное сопротивление почти не изменяется с ростом содержания. Таким образом, при низком содержании лимитирующей стадией будет удельное сопротивление раствора, а при высоком — отношение активностей растворов.

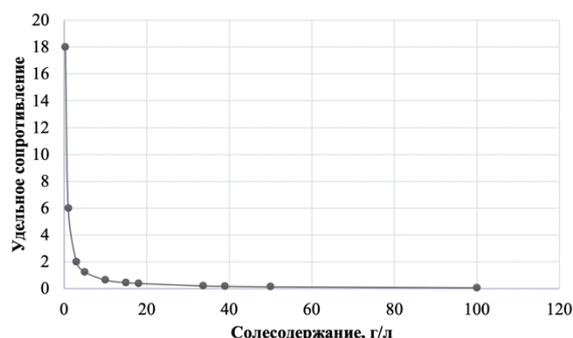


Рисунок 2 — Зависимость удельного сопротивления раствора от содержания

Нами были проведены расчеты мощности, получаемой с помощью обратного электродиализа, в зависимости от различных параметров. По соответствующим расчетам были получены графики, представленные ниже.

На основании представленной на рисунке 3 зависимости можно сделать вывод о росте мощности с увеличением содержания высококонцентрированного раствора.

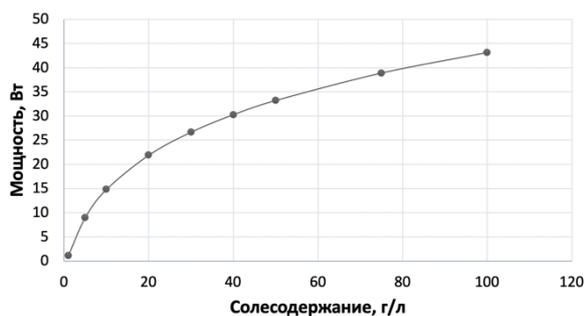


Рисунок 3 — Зависимость получаемой мощности от солевого содержания высококонцентрированного раствора при солевого содержания низкоконцентрированного раствора 0.3 г/л

Зависимость мощности от солевого содержания низкоконцентрированного раствора при постоянном солевого содержания показана на рисунке 4. Из графика видно, что с увеличением солевого содержания мощность сначала увеличивается из-за уменьшения удельного сопротивления низкоконцентрированного раствора, а далее снижается из-за уменьшения отношения активностей растворов.

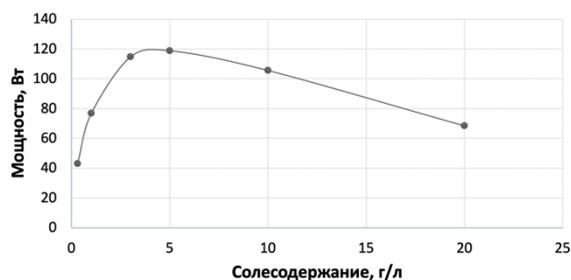


Рисунок 4 — Зависимость получаемой мощности от солевого содержания низкоконцентрированного раствора при солевого содержания высококонцентрированного раствора 100 г/л

Зависимость мощности от отношения концентраций при различных концентрациях высококонцентрированного раствора показана на рисунке 5, где можно наблюдать, что независимо от солевого содержания высококонцентрированного раствора график будет иметь максимум при отношении концентраций в пределах 15–25 г/л.

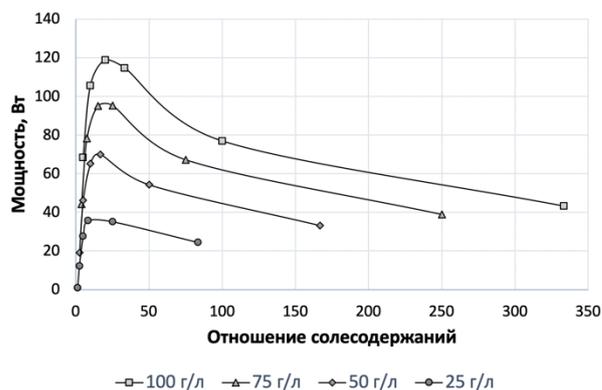


Рисунок 5 — Зависимость получаемой мощности от отношения концентраций

Заключение

Обратный электродиализ целесообразно применять для рекуперации энергии на промышленных предприятиях, используя потоки сточных вод.

При протекании процесса обратного электродиализа можно выделить следующие лимитирующие факторы: отношение активностей растворов и сопротивление модуля, причем при низком солевого содержания лимитирующей стадией будет удельное сопротивление раствора, а при высоком — отношение активностей растворов.

Обратный электродиализ является перспективным альтернативным направлением получения электроэнергии, однако, необходимо выбрать условия его оптимального использования. В данном случае оптимальным является отношение концентраций растворов в пределах 15–25 г/л.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. El Bassam N. Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities, Elsevier, 2021.
- [2]. Быков В. И., Ильина С. И., Равичев Л. В., Вегель Д. А., Титов А. А. Оценка эффективности получения электроэнергии методом обратного электродиализа. Сборник материалов XXVII международной научно-практической конференции

«Академическая наука — проблемы и достижения», 2021.

[3]. Veerman J., Saakes M., Metz S. J., Harmsen G. J. Reverse electrodialysis: Performance of a stack with 50 cells on the mixing of sea and river water. *Journal of Membrane Science*, 2009, no. 327, pp. 136–144.

[4]. Pattle R. E. Production of Electric Power by mixing Fresh and Salt Water in the Hydroelectric Pile. *Nature*, 1954, no. 174, p. 660.

[5]. Suda F., Matsuo T., Ushioda D. Transient changes in the power output from the concentration difference cell (dialytic battery) between seawater and river water. *Energy*, 2007, no. 32, p. 165–173.

[6]. Lacey R. E. Energy by reverse electrodialysis. *Ocean Engineering*, 1980, no. 7, p. 1–47.

[7]. Jagur-Grodzinski J., Kramer R. Novel process for direct conversion of free energy of mixing into electric power. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1986, no. 25, p. 443–449.

[8]. Brauns E. Towards a worldwide sustainable and simultaneous large-scale production of renewable energy and potable water through salinity gradient power by combining reversed electrodialysis and solar power. *Desalination*, 2008, no. 219, p. 312–323.

[9]. Brauns E. Salinity gradient power by reverse electrodialysis: effect of model parameters on electrical power output. *Desalination*, 2009, no. 237, p. 378–391.

[10]. Audinos R. Electric power produced from two solutions of unequal salinity by reverse electrodialysis. *Indian Journal of Chemistry*, 1992, no. 31A, p. 348–354.

Быков Владислав Игоревич — аспирант, ассистент кафедры процессов и аппаратов химической технологии, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9)

Ильина Светлана Игоревна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры процессов и аппаратов химической технологии, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9)

Равичев Леонид Владимирович — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой процессов и аппаратов химической технологии, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9)

Production of electrical energy from industrial wastewater using reverse electrodialysis

V. I. Bykov*, S. I. Il'ina*, L. V. Ravichev*,¹

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

Abstract

The paper considers the use of membrane processes as one of the alternative methods of obtaining electrical energy. Reverse electrodialysis is considered as these processes. The advantages and disadvantages of the process are highlighted, as well as the problems of its practical application for obtaining energy from sea and river water. It is shown that this process is unprofitable, since at high capacities the electricity consumption of pumps exceeds the performance of the electrodialyzer. Conclusions were drawn about the possibility of using the reverse electrodialysis process for energy recovery from industrial wastewater. The dependences of the received power on the salinity of low-concentrated and high-concentrated solutions, as well as on the ratio of their salinity, are shown. Based on these dependencies, conclusions are drawn about the optimal ratio of salinity.

Keywords

Electrodialysis, reverse electrodialysis, osmotic power plant, membrane technology.

REFERENCES

- [1]. El Bassam N. *Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities*, Elsevier, 2021.
- [2]. Bykov V. I., Ilyina S. I., Ravichev L. V., Vogel D. A., Titov A. A. Ocenka jeffektivnosti poluchenija jelektroenergii metodom obratnogo jelektrodializa [Assessment of the effectiveness of electricity generation by reverse electrodialysis method]. *Sbornik materialov HXVII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Akademicheskaja nauka — problemy i dostizhenija" [Collection of Materials of the XVII International Scientific and Practical Conference "Academic Science — Problems and Achievements"]*, 2021. (In Russ.)
- [3]. Veerman J., Saakes M., Metz S. J., Harmsen G. J. Reverse electrodialysis: Performance of a stack with 50 cells on the mixing of sea and river water. *Journal of Membrane Science*, 2009, no. 327, pp. 136–144.
- [4]. Pattle R. E. Production of Electric Power by mixing Fresh and Salt Water in the Hydroelectric Pile. *Nature*, 1954, no. 174, p. 660.
- [5]. Suda F., Matsuo T., Ushioda D. Transient changes in the power output from the concentration difference cell (dialytic battery) between seawater and river water. *Energy*, 2007, no. 32, p. 165–173.

¹ *Corresponding author*
Email: ravichevlv@list.ru

- [6]. Lacey R. E. Energy by reverse electro dialysis. *Ocean Engineering*, 1980, no. 7, p. 1–47.
- [7]. Jagur-Grodzinski J., Kramer R. Novel process for direct conversion of free energy of mixing into electric power. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1986, no. 25, p. 443–449.
- [8]. Brauns E. Towards a worldwide sustainable and simultaneous large-scale production of renewable energy and potable water through salinity gradient power by combining reversed electro dialysis and solar power. *Desalination*, 2008, no. 219, p. 312–323.
- [9]. Brauns E. Salinity gradient power by reverse electro dialysis: effect of model parameters on electrical power output. *Desalination*, 2009, no. 237, p. 378–391.
- [10]. Audinos R. Electric power produced from two solutions of unequal salinity by reverse electro dialysis. *Indian Journal of Chemistry*, 1992, no. 31A, p. 348–354.

Bykov V. I. — Postgraduate student, Assistant, Department of Processes and Devices of Chemical Technology of D.I. Mendeleev Russian State Technical University (Miuskaya square, 9, Moscow, 125047, Russian Federation).

Il'ina S. I. — Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Processes and Devices of Chemical Technology of D.I. Mendeleev Russian State Technical University (Miuskaya square, 9, Moscow, 125047, Russian Federation).

Ravichev L. V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Processes and Devices of Chemical Technology of D.I. Mendeleev Russian State Technical University (Miuskaya square, 9, Moscow, 125047, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Получение электрической энергии из промышленных сточных вод при помощи обратного электролиза / В. И. Быков, С. И. Ильина, Л. В. Равичев // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 2(9). С. 79 – 85.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-79-85

Please cite this article as:

Bykov V. I., Il'ina S. I., Ravichev L. V. Production of electrical energy from industrial wastewater using reverse electro dialysis. *Industrial processes and Technologies*, 2023, vol. 3, no. 2(9), pp. 79 – 85.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-79-85

УДК 628.854.33

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-86-94

Обзор и анализ свойств экологически чистых фреонов — рабочих жидкостей в воздушном тепловом насосе

С. В. Федосов^{*,**,1}, В. Н. Федосеев^{**}, И. А. Зайцева^{**}, В. А. Воронов^{**}

** Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия*

*** Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Россия*

Аннотация

Рост популярности применения теплогенераторов на основе возобновляемых источников — воздушных тепловых насосов сопровождается увеличением актуальности вопроса их модернизации с целью увеличения эффективности. При этом немаловажную роль играет рабочая среда внутреннего контура теплового насоса — хладагент (фреон). На выбор фреона накладывает ограничения Монреальский протокол, согласно которому использование веществ, разрушающих озоновый слой, запрещено. При выборе хладагента необходимо учитывать все качества и факторы, характеризующие возможности в условиях их работы. На основе информации из отечественных и международных нормативных документов можно сформировать группы требований, предъявляемых при выборе хладагента для воздушного теплового насоса, оптимальные по различным предъявляемым критериям. В частности, в отношении безвредности для человека можно также выделить группу требований для фреонов: практический предел концентрации хладагента и предельно допустимую концентрацию. На сегодняшний день крайне важным является оценка и учет показателей экологической безопасности хладагентов. В данной статье приводится оценка показателей экологичной безопасности выбранной группы фреонов, отобранных по критерию частоты использования. Оценивая показатели экологической безопасности анализируемых хладагентов, отобранные, приоритетные показатели были составлены в один обобщающий (интегральный) показатель, по значению которого появляется возможность судить об экологической безопасности хладагентов. Для этого рассматриваем наибольшие и наилучшие значения. Результаты исследования представлены в виде инфографической модели.

Ключевые слова

Воздушный тепловой насос, фреон, хладагент, экологическая безопасность, энергоэффективность, возобновляемые источники энергии, энергосбережение.

Введение

В условиях поиска и применения возобновляемых источников энергии для теплоснабжения зданий особую актуальность

приобретают вопросы повышения энергетической эффективности работы воздушных тепловых насосов (ВТН), где рабочей жидкостью является хладагент (фреон).

¹ Для переписки

Email: fedosovsv@mgsu.ru

Использование фреонов в последние годы связано с различными ограничениями, введенными международными соглашениями, например, Монреальским протоколом по веществам, разрушающим озоновый слой, и Киотским протоколом по веществам, влияющим на глобальное потепление. Технические разработки в настоящее время сосредоточены на том, чтобы переходить к экологически безопасным и безвредным при эксплуатации хладагентам при одновременном повышении энергоэффективности ВТН.

В качестве хладагентов используют вещества, обладающие особыми термодинамическими, физико-химическими и физиологическими свойствами, которые должны обеспечивать безопасную и экономичную (с малыми энергозатратами) эксплуатацию ВТН. Широкое использование фреонов привело к тому, что многие считают слова хладагент и фреон синонимами.

Обзор информации о фреонах, представленной в отечественных и международных нормативных документах [1–5], позволил систематизировать ряд требований, которым должны удовлетворять хладагенты:

- термодинамические (высокие холодопроизводительность, теплопроводность и теплопередача);
- физико-химические (низкая коррозионная активность и негорючесть);
- физиологические (безвредность для человека);
- экономические (низкая стоимость, доступность и распространенность);
- экологические (озонобезопасность и низкий потенциал глобального потепления).

Все эти требования удовлетворить невозможно, т. е. не существует идеального хладагента. Поэтому при выборе хладагента желательно учитывать все их

качества и факторы, характеризующие возможности в условиях их работы.

Для оценки экологической безопасности фреонов используют два критерия:

- озоноразрушающий потенциал (ОРП, ODP — OzoneDepletionPotential). Озоноразрушающую активность определяют наличием атомов хлора в молекуле;
- потенциал глобального потепления (ПГП, GWP — GlobalWarmingPotential). Парниковая активность фреонов в зависимости от марки и состава варьируется в пределах от 1300 до 8500 раз, что выше, чем у углекислого газа при одинаковых объемах.

Группа физиологических требований, характеризующих безвредность для человека, может быть представлена следующими показателями [6]:

ППНЧ — Практический предел концентрации хладагента при нахождении человека в помещении. Определяют как предельную концентрацию хладагента в помещении, не приводящую к вредным воздействиям на человека и не требующую срочных мер по эвакуации в случае непреднамеренной разгерметизации холодильного контура и попадания всего количества хладагента в атмосферу помещения. Этот показатель используют при определении максимально допустимой величины заправки контура данным хладагентом для конкретного применения;

ПДК / ПНК — Предельно допустимая концентрация токсического воздействия или значение концентрации, приводящее к нехватке кислорода. ПДК — предельно допустимая концентрация хладагента в воздухе ($\text{мг}/\text{м}^3$), которая при длительном воздействии в рабочее время в течение всего рабочего стажа не может вызвать заболеваний и отклонений в состоянии здоровья человека. ПДК устанавливает Министерство здравоохранения и социального развития Российской Федерации.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения

К наиболее реально используемым в настоящее время [7-9] рабочим жидкостям в тепловых насосах для обогрева помещений относятся R134, R404, R410, R507 и ряд др.

Оценивая показатели экологической безопасности анализируемых хладагентов, отобранные, приоритетные показатели были составлены в один обобщающий (интегральный) показатель, по значению которого появляется возможность судить об экологической безопасности хладагентов. Для этого рассматриваем наибольшие и наилучшие значения. Реализуя эти данные, строим площадную диаграмму (рисунок 1).

Отраженная на диаграмме (рисунок 1) информационная композиция показывает позицию «идеального» хладагента. Она характеризуется «веревочным» многоугольником, соответствующим принятым

в нашем случае наилучшим значениям показателей на каждом луче диаграммы.

Результаты

Площадь фигуры, обобщенно ограниченной многоугольником, отражает достоинства рассматриваемых хладагентов. Чем она больше, тем лучше подходит хладагент для ВТН, используемого в системе обогрева помещения. Замер площадей по построенной диаграмме и соотношение площадей, соответствующих каждому хладагенту, с площадью «идеального» хладагента, позволяет оценить эффективный уровень каждого хладагента. Для наглядности проанализируем и проранжируем хладагенты в порядке уменьшения значений интегрального показателя экологической безопасности (рисунок 2).

Ранжирование хладагентов позволило установить, что наиболее экологически безопасным для воздушного теплового насоса является фреон R-134A.

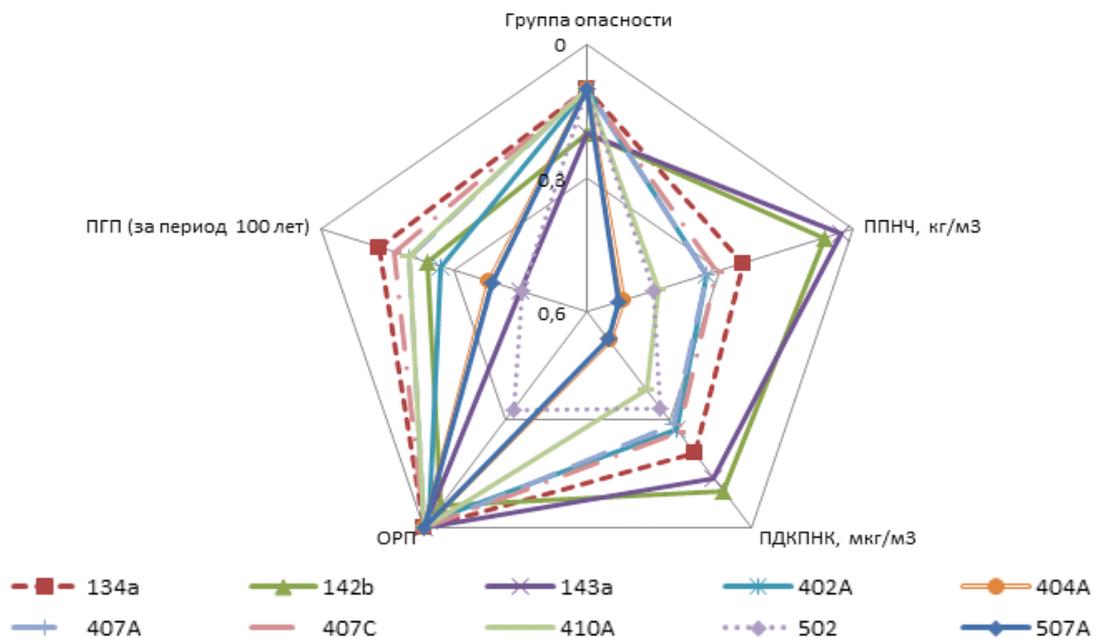


Рисунок 1 — Композиционная инфографическая модель экологической безопасности хладагентов ВТН для систем отопления

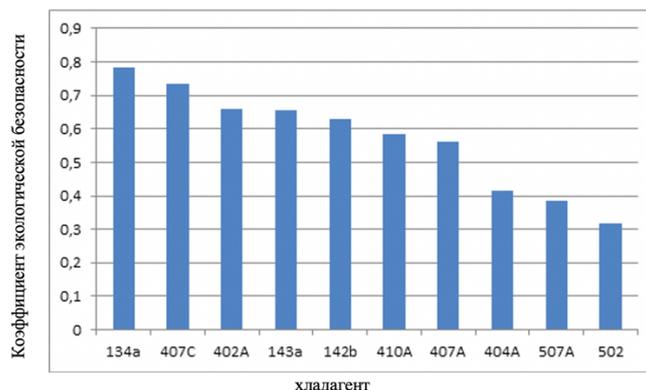


Рисунок 2 — Ранги анализируемых хладагентов по уровню экологической безопасности

Обсуждение полученных результатов

Экологические и химические свойства фреонов — не единственные их характеристики. Важны и их физические свойства: температура кипения, критические температура и давление и другие. Именно эти свойства определяют, подойдет хладагент для решения конкретной задачи или нет. Главным критерием при выборе заменителей ОРВ является близость физико-химических и эксплуатационных свойств к аналогичным характеристикам заменяемых ОРВ.

В исследовании [10] авторами сделан вывод, что фреон R134 наиболее близок к значению идеального интегрального показателя по уровню термодинамической активности фреонов (ТДАФ), а также его экологической безопасности, энергетической эффективности и стоимости. ТДАФ — это интегральный показатель, объединяющий в себе следующие показатели: «относительная молекулярная масса», «коэффициент энергоэффективности», «теплота парообразования», «давление», «объем фреона», «работа компрессора».

Несмотря на разные перспективы использования, требования к хладагентам довольно близки, если соблюдать отечественные законы. Они должны быть:

- безопасными по Конституционным требованиям России;
- безопасными по Трудовому праву и Санитарным нормам России;
- энергоэффективными, коррозионно-инертными, стабильными при многократно повторяющихся циклах сжатия в компрессорах;
- иметь диапазон температуры кипения: для кондиционеров ($-10...+30^{\circ}\text{C}$), среднего ($-20...-30^{\circ}\text{C}$) и низкого уровня холода ($-40...-50^{\circ}\text{C}$);
- для крупных полугерметичных машин должны быть недорогие моно вещества или азеотропные смеси;
- совместимыми с недорогими минеральными маслами;
- термостабильными на уровне не менее 200°C для холодильных машин, кондиционеров и ГеоТЭС; $500-650^{\circ}\text{C}$ для альтернативной энергетики и для АЭС;
- должны производиться в России по отечественным ГОСТам, соответствовать ТУ и быть на отечественном рынке по доступной цене.

Перечисленные требования являются основой для формирования Технического задания на использование рабочего тела — хладагента в агрегате и цикле. Они подробно изложены как в отечественных, так и в зарубежных научных публикациях [4, 5, 6, 7]. В условиях разработки конкретного рабочего проекта диапазон

требований к рабочему телу расширяется, поскольку конкретные условия эксплуатации ВТН, отражаемые в Техническом задании, могут иметь свой конкретный диапазон.

Хладагент, являющийся рабочим телом ВТН, выбирается разработчиками систем с учетом большого числа факторов: высокой эффективности работы оборудования, низкой стоимости, пожаробезопасности и токсичности. Требования к хладагенту постоянно пополняются и конкретизируются. Основными факторами, определяющими выбор хладагента согласно нашим изысканиям, безусловно, являются его термодинамические и теплофизические характеристики. Они влияют на эффективность, эксплуатационные показатели и конструктивные характеристики оборудования.

Заключение

Сегодня в мире намечается тенденция активного использования хладагентов четвертого поколения, имеющих высокую термодинамическую эффективность, не влияющих на озоновый слой и оказывающих минимальное воздействие на глобальное потепление.

В последние 10–15 лет активно идет поиск смесей, не имеющих в составе атомы ни хлора Cl, ни фтора F. К безопасным природным фреонам относятся бутан, изобутан, углекислый газ и аммиак. Но самым безопасным и перспективным является пропан (R290). Он не оказывает разрушающего воздействия на озоновый слой и имеет очень низкий потенциал влияния на глобальное потепление. Характеристики этого газа почти не отличаются от фреона R22. Примером таких, чисто коммерческих, фреонов является азеотропный хладагент MCOOL 22.

В настоящем и будущем развитие и поиск экологически чистых рабочих жидкостей для воздушных тепловых насосов

будет заключаться в технической модернизации фреонового контура, высокой надежности и усовершенствовании самих воздушных тепловых насосов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Алоян Р. М., Федосеев В. Н., Петрухин А. Б. и др. Эффективность отопления тепловым насосом автономных текстильных производств в зависимости от уровня термодинамической активности фреонов. *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*, 2017, № 1, с. 179–184.
- [2]. Харитонов Б. П. Безопасность фреонов. АВОК, №2, 2009, с. 44–46.
- [3]. Маке В., Эккерт Г.-Ю., Кошпен Ж.-Л. Учебник по холодильной технике. Перевод с французского д-р техн. наук В. Б. Сапожников. М., 1998, 1142 с.
- [4]. Перельштейн И. И., Парушин Е. Б. Термодинамические и теплофизические свойства рабочих веществ холодильных машин и тепловых насосов. М.: Лег. и пищ. пром-сть, 1984, 232 с.
- [5]. Хейвуд Р. В. Анализ циклов в технической термодинамике. Москва, 1979.
- [6]. Федосов С. В., Федосеев В. Н., Зайцева И. А. Рециркуляционный воздушный тепловой насос с рекуперацией: опыт применения. *АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика*, 2020, № 8, с. 54–57.
- [7]. Федосов С. В., Федосеев В. Н., Воронов В. А., Емелин В. А., Логинова С. А. Качество воздухообмена в помещении с эффектом очищения окружающей среды. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*, 2022, № 72(4), с. 69–74.

DOI: 10.6060/snt.20227204.00010

[8]. Федосов С. В., Федосеев В. Н., Воронов В. А., Емелин В. А., Логина С. А. Комплексное теплообеспечение и устойчивое состояние тепловлажностной среды внутри помещения с уровнем качества CO₂. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*, 2022, № 69(1), с. 76–82.

DOI: 10.6060/snt.20226901.00010

[9]. Lapidus A., Fedoseev V., Ostryakova J., Voronov V., Sokolov A. Organizational and technological aspects of the design and construction of heat supply systems based on heat pumps in low-rise construction. *E3S Web of Conferences. XXIV*

International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2021), 2021, vol. 263, 02025. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302025

[10]. Fedosov S., Fedoseev V., Voronov V., Loginova S. Energy-efficient state of the room microclimate with a combined heat pump air exchange system and built-in sanitary and hygienic system. In: Solovev D. B., Kyriakopoulos G. L., Venelin T. (eds) *SMART Automatics and Energy. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022, vol. 272, pp. 555–561.

DOI: 10.1007/978-981-16-8759-4_57

Федосов Сергей Викторович — д-р техн. наук, профессор, академик РААСН, профессор кафедры «Технологии и организация строительного производства», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26)

Федосеев Вадим Николаевич — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Организация производства и городское хозяйство», Ивановский государственный политехнический университет (Российская Федерация, 153000, Иваново, Шереметевский пр., д. 21)

Зайцева Ирина Александровна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Организация производства и городское хозяйство», Ивановский государственный политехнический университет (Российская Федерация, 153000, Иваново, Шереметевский пр., д. 21)

Воронов Владимир Андреевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Организация производства и городское хозяйство», Ивановский государственный политехнический университет (Российская Федерация, 153000, Иваново, Шереметевский пр., д. 21)

Overview and analysis of the properties of environmentally friendly freons — working fluids in an air source heat pump

S. V. Fedosov^{*,**,1}, V. N. Fedoseev^{**}, I. A. Zayceva^{**}, V. A. Voronov^{**}

^{*} *National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia*

^{**} *Ivanovo State Polytechnical University, Ivanovo, Russia*

Abstract

The growing popularity of the use of heat generators based on renewable sources - air source heat pumps is accompanied by an increase in the urgency of the issue of their modernization in order to increase efficiency. In this case, an important role is played by the working medium of the internal circuit of the heat pump — the refrigerant (freon). The Montreal Protocol imposes restrictions on the choice of freon, according to which the use of substances that destroy the ozone layer is prohibited. When choosing a refrigerant, it is necessary to take into account all the qualities and factors that characterize the possibilities in their working conditions. Based on information from domestic and international regulatory documents, it is possible to form groups of requirements for choosing a refrigerant for an air source heat pump, which are optimal according to various criteria. In particular, with regard to harmlessness to humans, a group of requirements for freons can also be distinguished: the practical limit of the refrigerant concentration and the maximum permissible concentration. Today, it is extremely important to evaluate and take into account the indicators of environmental safety of refrigerants. This article provides an assessment of the environmental safety indicators of a selected group of freons, selected according to the criterion of frequency of use. Assessing the indicators of environmental safety of the analyzed refrigerants, the selected priority indicators were compiled into one generalizing (integral) indicator, by the value of which it becomes possible to judge the environmental safety of refrigerants. For this, we consider the largest and best values. The results of the study are presented in the form of an infographic model.

Keywords

Air source heat pump, freon, refrigerant, environmental safety, energy efficiency, renewable energy, energy saving

REFERENCES

- [1]. Aloyan R. M., Fedoseev V. N., Petrukhin A. B. et al. Effektivnost' otopleniya teplovym nasosom avtonomnykh tekstil'nykh proizvodstv v zavisimosti ot urovnya termodinamicheskoi aktivnosti freonov [Efficiency of heating by a heat pump of autonomous textile industries depending on the level of thermodynamic activity of freons]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi*

¹ *Corresponding author*

Email: fedosovsv@mgsu.ru

promyshlennosti [Proceedings of higher education institutions. Textile industry technology], 2017, no. 1, pp. 179–184. (In Russ.)

[2]. Kharitonov B. P. Bezopasnost' freonov [Freon safety]. AVOK [AVOK: ventilation, heating, air conditioning, heat supply, and building heat physics], no. 2, 2009, pp. 44–46. (In Russ.)

[3]. Make V., Ekker G.-Yu., Koshpen Zh.-L. Uchebnik po kholodil'noi tekhnike. Perevod s frantsuzskogo d-r tekhn. nauk V. B. Sapozhnikov [Refrigeration textbook. Translated from French by Dr. V. B. Sapozhnikov]. Moscow, 1998, 1142 p. (In Russ.)

[4]. Perel'shteyn I. I., Parushin E. B. Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva rabochikh veshchestv kholodil'nykh mashin i teplovykh nasosov [Thermodynamic and thermophysical properties of working substances of refrigeration machines and heat pumps]. Moscow: Leg. i pishch. prom-st' Publ., 1984, 232 p. (In Russ.)

[5]. Heywood R. V. Analiz tsiklov v tekhnicheskoi termodinamike [Cycle analysis in technical thermodynamics]. Moscow, 1979. (In Russ.)

[6]. Fedosov S. V., Fedoseev V. N., Zaitseva I. A. Recirkulyatsionnyi vozdushnyi teplovoi nasos s rekuperatsiei: opyt primeneniya [Recirculating air heat pump with recovery: application experience]. AVOK: Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika [AVOK: ventilation, heating, air conditioning, heat supply, and building heat physics], 2020, no. 8, pp. 54–57. (In Russ.)

[7]. Fedosov S. V., Fedoseev V. N., Voronov V. A., Emelin V. A., Loginova S. A. Kachestvo vozdukhobmena v pomeshchenii s efektom ochishcheniya okruzhayushchei sredy [Quality of air exchange in

a room with the effect of cleaning the environment]. Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie [Modern science-intensive technologies. Regional Supplement], 2022, no. 72(4), pp. 69–74. (In Russ.)

DOI: 10.6060/snt.20227204.00010

[8]. Fedosov S. V., Fedoseev V. N., Voronov V. A., Emelin V. A., Loginova S. A. Kompleksnoe teploobespechenie i ustoychivoe sostoyanie teplovlazhnostnoi sredy vnuri pomeshcheniya s urovnem kachestva CO₂ [Integrated heat supply and stable state of indoor heat and moisture environment with CO₂ quality level]. Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie [Modern science-intensive technologies. Regional Supplement], 2022, № 69(1), pp. 76–82. (In Russ.)

DOI: 10.6060/snt.20226901.00010

[9]. Lapidus A., Fedoseev V., Ostryakova J., Voronov V., Sokolov A. Organizational and technological aspects of the design and construction of heat supply systems based on heat pumps in low-rise construction. *E3S Web of Conferences. XXIV International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2021)*, 2021, vol. 263, 02025.

DOI: 10.1051/e3sconf/202126302025

[10]. Fedosov S., Fedoseev V., Voronov V., Loginova S. Energy-efficient state of the room microclimate with a combined heat pump air exchange system and built-in sanitary and hygienic system. In: Solovev D. B., Kyriakopoulos G. L., Venelin T. (eds) *SMART Automatics and Energy. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2022, vol. 272, pp. 555–561.

DOI: 10.1007/978-981-16-8759-4_57

Fedosov S. V. — Academician of the RAACS, Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Department of Technologies and Organization of Construction Production, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoe sh., 26, Moscow, 129337, Russian Federation).

Fedoseev V. N. — Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Department «Organization of production and urban economy», Ivanovo State Polytechnic University (Sheremetevskiy av., 21, Ivanovo, 153000, Russian Federation).

Zayceva I. A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of the Department «Organization of production and urban economy», Ivanovo State Polytechnic University (Sheremetevskiy av., 21, Ivanovo, 153000, Russian Federation).

Voronov V. A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of the Department «Organization of production and urban economy», Ivanovo State Polytechnic University (Sheremetevskiy av., 21, Ivanovo, 153000, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Обзор и анализ свойств экологически чистых фреонов — рабочих жидкостей в воздушном тепловом насосе / С. В. Федосов, В. Н. Федосеев, И. А. Зайцева, В. А. Воронов // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 2(9). С. 86 – 94.
DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-86-94.

Please cite this article as:

Fedosov S. V. , Fedoseev V. N. , Zayceva I. A. , Voronov V. A. Overview and analysis of the properties of environmentally friendly freons — working fluids in an air source heat pump. Industrial processes and Technologies, 2023, vol. 3, no. 2(9), pp. 86 – 94.
DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-86-94

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

**Том 3
Выпуск 2(9)**

Июль 2023

Выходит 4 раза в год

Формат 60 × 84 1/8. Усл. печ. л. 11,04. 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»