

ЭКОЛОГИЯ

промышленного
производства



МЕЖОТРАСЛЕВОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

Выпуск 4
Москва 2023





Все новейшие достижения и современные разработки предприятий оборонного комплекса — в научно-технических журналах ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» является издателем следующих научных журналов:



Межотраслевой научно-технический журнал
Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России
(4 выпуска)
Подписной индекс **79379**
Издается с 1984 года



Межотраслевой научно-технический журнал
Конструкции из композиционных материалов
(4 выпуска)
Подписной индекс **80089**
Издается с 1981 года



Научно-технический журнал
Информационные технологии в проектировании и производстве
(4 выпуска)
Подписной индекс **79378**
Издается с 1976 года



Межотраслевой научно-практический журнал
Экология промышленного производства
(4 выпуска)
Подписной индекс **80090**
Издается с 1993 года



Научно-практический журнал
Вопросы защиты информации
(4 выпуска)
Подписной индекс **79187**
Издается с 1974 года

Все издания ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»:

✓ включены решением ВАК Министерства науки и высшего образования России в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук;

✓ метаданные выпусков включены в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Более подробную информацию об изданиях, подписке, дополнительных услугах можно получить по тел.: 8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-67, 8 (495) 491-77-20 (подписка);
факс: 8 (495) 491-44-80.
E-mail: izdanie@ntckompas.ru

ЭКОЛОГИЯ

промышленного

производства

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

Выпуск 4 (124)

Издается с 1993 г.

Москва 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ, УТИЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕРАБОТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ И БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Борисова О. Н., Суптаева Н. Л., Тыгер Л. М. Система раздельно-
го сбора отходов для МКД — "Новое время" 2

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДООЧИСТКА

Ксенофонтов Б. С., Ширних А. А. Разработка камеры переме-
шивания для комбифильтра 5

Нурбаева Ф. К., Серикбаева А. К., Уйсимбаева Ж. Т. Исследо-
вания по количественному испарению воды хвостохранилища в при-
сутствии отработанных моторных масел и двухслойных покрытий 12

Павелкова А. М. Методы восстановления отработанных регене-
рационных растворов натрий-катионитовых фильтров 16

Родькин О. И., Тавгень Т. А., Ксенофонтов Б. С. Использование
осадков сточных вод в качестве субстрата для выращивания энерге-
тических (технических) культур 22

Сидоренко О. В., Вялова Е. И. Очистка производственных сточ-
ных вод предприятия по выпуску строительных изделий 29

Шелест С. Н., Корчевская Ю. В., Троценко И. А., Волюнкина С. В.
Технологические решения для предотвращения образования хлор-
органических соединений в процессе водоподготовки 35

ОЧИСТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ

Володин А. М., Епихин А. Н., Киселева О. А. Новое решение в
конструкции абсорбера по технологии аммиачно-сульфатной серо-
очистки дымовых газов 39

Овчинников Е. В., Уютов С. Ю., Овчаренко А. С. Повышение эко-
логических показателей газодизельного двигателя 44

Филимонова И. В., Комарова А. В., Новиков А. Ю. Определение
структуры и динамики выбросов парниковых газов сектора "Энерге-
тика" в Новосибирской области 47

ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

Яковлев С. Ю., Шемякин А. С. К оценке неопределённости и риска
при обеспечении комплексной безопасности арктической зоны РФ 54

ВНЕДРЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Шитиков Е. С., Шацкая В. А., Беляева Е. А., Карлов С. П., Горде-
ева Е. В., Бардушкин В. В. О возможности повышения эффективно-
сти промышленных производств строительных материалов. Особен-
ности взаимодействия портландцементов с наноматериалами
различной природы в области их малых концентраций в водоце-
ментных системах 59

Главный редактор М. В. Слипечук,
д-р эконом. наук, проф., зав. кафедрой рациональ-
ного природопользования географического факуль-
тета МГУ им. М. В. Ломоносова

Заместители главного редактора:
В. Ф. Гракович, д-р техн. наук, проф., Националь-
ный Фонд содействия устойчивому развитию регио-
нов; А. Г. Ишков, д-р хим. наук, проф., ПАО "Газпром";
Н. П. Кузнецов, д-р техн. наук, проф., ИжГТУ им. М. Т. Ка-
лашника

Ответственный секретарь К. В. Трыкина,
начальник отдела научных и информационных
изданий ФГУП «НТЦ оборонного комплекса
«Компас»

Редакционный совет:

М. Ч. Залиханов, акад. РАН, проф., советник РАН;
И. Н. Мешков, акад. РАН, проф., Объединенный инсти-
тут ядерных исследований; Н. П. Тарасова, чл.-кор.
РАН, д-р хим. наук, проф., Институт проблем устойчи-
вого развития РХТУ им. Д. И. Менделеева

Редакционная коллегия:

А. М. Амирханов, канд. биол. наук, Федеральная
служба по надзору в сфере природопользования;
С. С. Бабкина, д-р хим. наук, проф., Институт тонких
химических технологий им. М. В. Ломоносова РТУ
МИРЭА; Я. И. Вайсман, д-р мед. наук, проф., Пермский
национальный исследовательский политехнический
университет; В. А. Девислов, д-р техн. наук, МГТУ им.
Н. Э. Баумана; О. Д. Доронина, д-р биол. наук, проф.,
Академия труда и социальных отношений; Е. Ю. Доро-
хина, д-р эконом. наук, проф., РЭУ им. Г. В. Плеханова;
М. Н. Дадашев, д-р техн. наук, проф., РГУ нефти и газа
им. И. М. Губкина; А. П. Глинушкин, акад. РАН, ФГУП
"НТЦ оборонного комплекса "Компас"; В. Г. Исаков, д-р
техн. наук, проф., ИжГТУ им. М. Т. Калашникова;
М. А. Корепанов, д-р техн. наук, ИжГТУ им. М. Т. Ка-
лашника; Б. С. Ксенофонтов, д-р техн. наук, проф.,
МГТУ им. Н. Э. Баумана; В. Н. Ложкин, д-р техн. наук,
проф., Санкт-Петербургский университет ГП МЧС
России; В. Ю. Мелешко, д-р техн. наук, проф., Институт
химической физики им. Н. Н. Семенова РАН; В. Ф. Мен-
щиков, канд. техн. наук, Госкорпорация "Росатом";
Н. Г. Рыбальский, д-р биол. наук, проф., НИА "При-
родные ресурсы"; И. Ш. Сайфуллин, д-р хим. наук,
проф., НИИ инновационного развития промышленно-
сти РЭУ им. Г. В. Плеханова; А. А. Соловьянов, д-р
хим. наук, проф., Центр научных исследований и раз-
работок ФГБУ "ВНИИ "Экология"; В. А. Тенев, д-р
физ.-мат. наук, проф., ИжГТУ им. М. Т. Калашникова;
В. В. Тетельмин, д-р техн. наук, проф., Общественный
совет при Минэнерго РФ; Ю. В. Трофименко, д-р техн.
наук, проф., НИИ энергетических проблем авто-
транспортного комплекса при МАДИ; Б. С. Фе-
доров, д-р техн. наук, проф., ООО "Концерн ЭКОМАШ";
С. Г. Харченко, д-р физ.-мат. наук, проф., РУДН;
С. С. Чеботарев, д-р эконом. наук, проф., АО "ЦНИИ
экономики, информатики и систем управления

© Федеральное государственное унитарное пред-
приятие «Научно-технический центр оборонного ком-
плекса «Компас» (ФГУП «НТЦ оборонного комплекса
«Компас»), 2023



Обезвреживание, утилизация и переработка промышленных и бытовых отходов

УДК.504.064.4

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_4_2

EDN: ECDEZH

Система раздельного сбора отходов для МКД — "Новое время"

О. Н. БОРИСОВА, канд. техн. наук; Н. Л. СУЛТАЕВА, канд. техн. наук;

Л. М. ТЫГЕР, канд. хим. наук

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет туризма и сервиса»,
пос. Черкизово, Пушкинский р-н, Московская обл., Россия

Рассмотрена электрогидравлическая сортировочная система для раздельного сбора, транспортировки, сортировки и утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) и приравненных к ним бытовых отходов. Рассмотрены два вида систем сортировки ТКО с поворачивающимся корпусом, встроенным в мусоропровод, распределяющим отходы по контейнерам, в зависимости от вида отходов с помощью панели управления на базе известной структуры вывоза ТКО, которая позволит максимальным образом сохранить отходы как сырье для последующего извлечения из него полезных элементов.

Ключевые слова: сортировочное устройство, твердые коммунальные отходы, контейнеры, мусоропроводы, раздельный сбор, вторичная переработка.

Отношение к охране окружающей среды — один из основных показателей уровня развития государства (во всяком случае, отражает его точнее, чем добыча и переработка природных ископаемых или производство продуктов питания). Проблема ТКО является, несомненно, важной проблемой современного общества. В период технической модернизации и преобразования российского общества, общества — потребления, одной из острых экологических проблем остается проблема переработки и утилизации отходов [1—3]. И одним из эффективных ее решений является организация селективного сбора отходов с их дальнейшим вторичным использованием [2].

По оценке Росприроднадзора, в России накоплено 90 млрд т отходов, из которых более 16 млрд т составляют твердые коммунальные отходы. Объем ежегод-

ного образования ТКО составляет более 40 млн т (~130 млн м³). В расчете на одного жителя страны приходится до 250 кг бытового мусора в год, что сопоставимо со среднеевропейскими показателями [4].

В России даже легальные полигоны захоронения отходов только разрастаются, их площади занимают миллионы гектаров, на которых могли бы расти деревья, сельскохозяйственные культуры, располагаться жилые, общественные, культурные объекты. Невосстановленный мусор не попадает в переработку, а гниет на свалках, тем самым загрязняет землю и океаны, убивает экосистемы. Загрязненная почва будет очень долго восстанавливаться — некоторым отходам необходимо несколько сотен лет для полного разложения. Например, полиэтиленовому пакету нужно 100—200 лет, алюминиевой банке — 500 лет и т. д. Сортировка отходов поможет использовать их более рационально: производить из них вещи или энергию, не вредя при этом планете. Именно поэтому образовавшиеся у населения отходы проще всего сортировать еще на этапах их сбора [5].

Будущее мусоропроводов в новом домостроении — это будущее строительной индустрии. Стоит отметить актуальность экологических преимуществ предложенной системы сортировки отходов в мусоропроводе, для сбора вторсырья в многоквартирном доме (МКД).

Борисова Оксана Николаевна, доцент.

E-mail: borisova-on@bk.ru

Султаева Наталья Леонидовна, доцент.

E-mail: sultaeva@gmail.com

Тыгер Любовь Михайловна, доцент.

E-mail: lyutyger@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 14 августа 2023 г.

© Борисова О. Н., Султаева Н. Л., Тыгер Л. М., 2023

Вторичная переработка с разработанной системой ПЛК (программируемый логический контроллер), может быть адаптирована к технологиям будущего. Панель загрузочного клапана имеет дополнительные опции, такие, как управление с помощью кнопки, управление с помощью кнопочного экрана [6—8].

Электрогидравлическая сортировочная система "Новое время" (рис. 1) представляет собой модернизированный мусоропровод, подойдя к которому, житель может нажатием кнопки выбрать, какой вид отходов он будет выбрасывать. Механизм повернет сопло в нужную сторону, чтобы в конце мусоропровода все попало в отдельный контейнер.



Рис. 1. Электрогидравлическая сортировочная система

Был разработан проект сортировочной системы, предусматривающий три кнопки: "стекло", "пластик" и "прочие отходы". Для того чтобы выбросить пластиковый пакет или бутылку, нужно сначала нажать на кнопку "Вторсырьё" и только затем открыть крышку. Воспользоваться мусоропроводом без нажатия на кнопку невозможно, так как крышка блокируется электромагнитом.

Внизу МКД, где стоят мусорные баки, установлена задвижка, закрывающая нижнюю часть мусоропровода от основного объёма приёмной камеры. Это сделано для того, чтобы защитить мусоропровод от вредоносных насекомых и грызунов, разносящих болезни и вирусы. Нижняя часть мусоропровода расположена на подвижной тележке, перемещающейся по направляющим. Её положение будет зависеть от выбора рода мусора. Именно такая схема (с делением на три фракции) была выбрана, потому что есть фирмы, готовые проспонсировать данную установку сортировочной системы в МКД и затем вывозить ТКО бесплатно для жителей, покрывая свои расходы только за счет получаемого вторсырья.

К таким фирмам можно отнести Ubirator. Эта компания занимается не только сбором и заготовкой вторсырья, но и популяризирует раздельный сбор отходов в обществе. Ubirator занимается экопросвещением образовательных учреждений и активно участвует в различных благотворительных проектах [9—12].

Система сортировщика с вращающимся на 360 градусов желобом приводится в действие двигателем. Агрегат будет позиционироваться в соответствии с заранее определенными типами сбора отходов и тележками.

Сепараторная система мультисортировщика имеет следующие характеристики:

- грузоподъемность 300 кг;
- планетарная передача;
- регулируемое управление на 360 градусов;
- специальное позиционирование под углом для смены позиции при перезапуске системы;
- простая настройка с панели управления;
- сортировка на разное количество контейнеров.

Электрогидравлические моторизованные сортировочные системы используют для распределения материалов из одного желоба в специальные контейнеры. Устройства для двойной сортировки (рис. 2) управляют кнопками на дверцах загрузочного клапана.



Рис. 2. Устройство двойной сортировки

Устройства для тройной сортировки (рис. 3) используют для сортировки трех различных типов отходов.

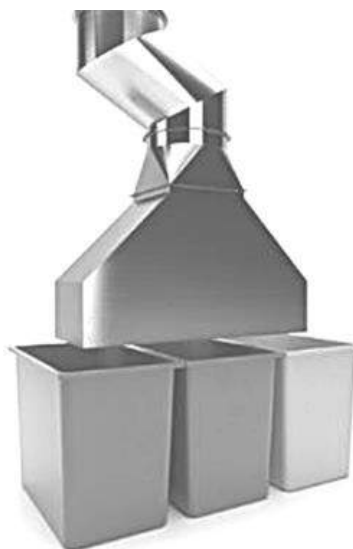


Рис. 3. Устройство тройной сортировки

Главная панель управления расположена в помещении для сбора мусора и управляется с помощью панели с кнопками. Используется для необходимого управления и настройки аксессуаров желоба.

ба, таких, как автоматическая система дезинфекции, вытяжной вентилятор, блок очистки и блокировка клапанов загрузки. Для блокировки желоба в случае пожара панель управления соединена с системами пожарной и дымовой сигнализации.

Эту конструкцию можно совершенствовать до бесконечности, к примеру, установить датчики наполняемости контейнеров, считывать сетчатку глаз и фиксировать, кто из жильцов, сколько и какого мусора выбросил, встраиваться в систему умного дома и так далее.

Основной целью совершенствования конструкции и режимов функционирования сортировочных устройств является минимизация расходов временных и энергетических ресурсов, особенно при формировании многогруппных составов. В этой связи задача определения оптимальных параметров предложенного трехстороннего вспомогательного сортировочного устройства является актуальной, обеспечивающей надежное разделение отходов, трансформируемое группой отсеков [13–16].

ЛИТЕРАТУРА

1. Шубов Л. Я., Борисова О. Н. Утилизация ценных компонентов твердых бытовых отходов // ЖКХ. 2013. № 8. С. 59–64.
2. Гречишкин В. С., Борисова О. Н. Практика переработки твердых бытовых отходов и тенденции развития технологии: сб. "Современные проблемы туризма и сервиса". Мат. Всеросс. науч. конф. аспирантов и молодых ученых. 2013. С. 128–132.
3. Doronkina I. G., Borisova O. N., Malyutin G. V., Ereemeeva V. V. Safety in ecological tourism / World Applied Sciences Journal. 2014. V. 30. № 30. P. 39–40.
4. Шубов Л. Я., Борисова О. Н. Управление ТБО: реалии и возможность муниципалитетов // Практика муниципального управления. 2014. № 3. С. 75–78.
5. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Ненавязчивые советы по наболевшей проблеме // Твердые бытовые отходы. 2014. № 7(97). С. 15–19.
6. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Резервы повышения эффективности санитарной очистки российских городов как подотрасли жилищно-коммунального хозяйства // Сервис в России и за рубежом. 2014. № 1(48). С. 163–173.
7. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Требования технологической эффективности деятельности по обращению с ТКО // Твердые бытовые отходы. 2015. № 11(113). С. 40–44.
8. Доронкина И. Г., Борисова О. Н. Эволюция технологических подходов при решении проблемы твердых бытовых отходов // Сервис в России и за рубежом. 2015. Т. 9. № 4(60). С. 102–111.
9. Борисова О. Н., Тыгер Л. М., Жаров В. Г. Аналитический обзор оборудования для дробления и переработки техногенного сырья (обзор) // Экология промышленного производства. 2023. № 1(121). С. 11–18.
10. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Оптимизация системы комплексного управления ТБО в российской федерации (обосновывающие материалы и стратегия) // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. 2018. № 1. С. 2.
11. Доронкина И. Г., Борисова О. Н., Гречишкин В. С. Оптимизация процесса утилизации твердых бытовых отходов (ТБО) // Сервис в России и за рубежом. 2011. № 1(20). С. 62–67.
12. Борисова О. Н. Предпосылки для рационального ресурсосбережения — создание экотехнопарков // Славянский форум. 2018. № 2(20). С. 124–129.
13. Борисова О. Н. Ресурсоэффективное использование техногенного сырья в строительстве: новые горизонты для эко-инноваций: сб. "Наука — сервису". Мат. XXIII Межд. науч.-практ. конф. 2018. С. 294–303.
14. Борисова О. Н. Сравнительный анализ технологий по сортировке отходов компании "BENLI RECYCLING GROUP" и регионального оператора "ТБО "ЭКОСЕРВИС" // Экология промышленного производства. 2021. № 1(113). С. 8–11.
15. Шубов Л. Я., Борисова О. Н. Об оптимизации управления твердыми бытовыми отходами в системе ЖКХ // ЖКХ. 2013. № 11. С. 20–29.
16. Борисова О. Н., Тыгер Л. М. Принципы оптимизации технологии и выбор оборудования при вовлечении ТКО в производственные процессы // Экология промышленного производства. 2022. № 2(118). С. 2–5.

Separate waste collection system for apartment buildings — "New time"

O. N. BORISOVA, N. L. SULTAEVA, L. M. TYGER

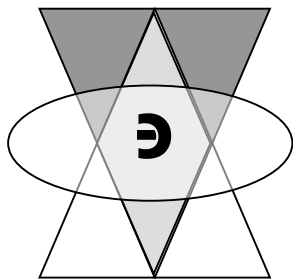
Russian State University of Tourism and Service, Cherkizovo, Moscow region, Russia

The article considers an electrohydraulic sorting system for separate collection, transportation, sorting and disposal of solid municipal and equivalent household waste. Two types of waste sorting systems are considered, with a rotating body built into a garbage chute that distributes waste into containers, depending on the type of waste using a control panel based on a well-known waste disposal structure, which will maximize the preservation of waste as raw materials for the subsequent extraction of useful elements from it.

Keywords: sorting device, solid municipal waste, containers, waste chutes, separate collection, recycling.

Bibliography — 16 references.

Received August 14, 2023



Водоподготовка и водоочистка

УДК 628.16.0

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_4_5

EDN: EKYNPM

Разработка камеры перемешивания для комбифильтра

Б. С. КСЕНОФОНТОВ, д-р техн. наук; **А. А. ШИРНИЕХ**

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

Показана возможность использования камеры перемешивания, размещенной внутри корпуса фильтра, для интенсификации процесса коагуляции. С помощью программного продукта Ansys была рассмотрена конструкция камеры перемешивания. На основе полученных результатов при моделировании создана камера перемешивания с размещением ее на лабораторный стенд, а также выбрана эффективная перемешивающая загрузка. Выявлено, что использование разработанной камеры перемешивания улучшает процесс фильтрования.

Ключевые слова: моделирование, Ansys, контактная коагуляция, этапы коагуляции, камера перемешивания, фильтры.

Согласно данным Государственного доклада "О состоянии и об охране окружающей среды" за 2006—2021 гг., можно сделать вывод, что в среднем 33,5 % от всего объема водоотведения составляет сброс загрязненных сточных вод. Этот объем сброса загрязненных сточных вод вызван их недостаточной очисткой. Для повышения качества очистки авторы предлагают интенсифицировать наиболее распространенную ступень очистки — фильтрование с использованием фильтра осветлительного вертикального. Повышение эффективности очистки этой ступени позволит повысить эффективность очистки на любом производстве ввиду распространенности подобных фильтров. Интенсифицировать процесс очистки можно за счет использования дополнительной камеры внутри корпуса фильтра.

Предлагаемое решение с использованием камеры перемешивания внутри корпуса фильтра [1] представлено на рис. 1. Камеру перемешивания при этом располагают внутри корпуса фильтра в его верхней части.

Ксенофонтов Борис Семенович, профессор кафедры "Экология и промышленная безопасность".
E-mail: kbsflot@mail.ru

Ширниех Альберт Албиерович, аспирант.
E-mail: al-3x@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 мая 2023 г.

© Ксенофонтов Б. С., Ширниех А. А., 2023

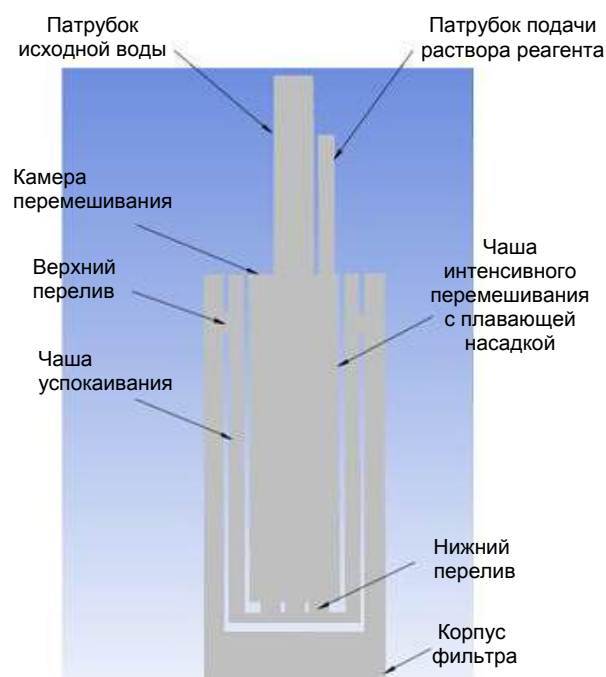


Рис. 1. Проточная часть камеры перемешивания

Процесс коагуляции проходит в 2 этапа [2] — пекрекинетическую и ортокинетическую. Используемая камера перемешивания состоит из двух чаш: чаша

интенсивного перемешивания, чаша успокаивания. Режим течения жидкости в каждой из чаш соответствует определенному этапу коагуляции. Так, например, чаша интенсивного перемешивания соответствует первой ступени коагуляции (перекинетической), а чаша успокаивания — второй ступени (ортокинетической).

Принцип работы камеры заключается в следующем. В первую камеру интенсивного перемешивания под напором подается коагулянт и исходная вода. В камере расположена перемешивающая загрузка, которая без дополнительных затрат электроэнергии, используя напор исходной воды, быстро и равномерно перемешивает два потока. Благодаря действию коагулянта заряд коллоидных частиц становится нейтральным [3] и с помощью вынужденного движения частиц, которое обеспечивается перемешивающей загрузкой, будет происходить сближение коллоидных частиц.

В камере интенсивного перемешивания за счет дополнительной поверхности раздела фаз (поверхность загрузки) будет происходить ускорение процесса формирования хлопьев за счет контактной коагуляции [4—6]. Но она будет проходить только когда коллоидные частички преодолеют электростатические силы отталкивания [7], а значит, для интенсификации контактной коагуляции необходимо предусмотреть ввод коагулянта перед камерой перемешивания, а не непосредственно в нее.

Вторая ступень характеризуется более плавным течением потока, поэтому для гашения турбулентного потока предусматривается нижний перелив. Он также выполняет функцию защиты вымывания загрузки из чаши.

Через нижний перелив поток поступает в чашу успокаивания, которую используют в качестве камеры хлопьеобразования для укрупнения хлопьев с размером примерно 1 мкм [8] в более крупные. Далее с помощью верхнего перелива поток поступает в корпус фильтра.

Предлагаемое решение обладает следующими преимуществами:

- экономия производственных площадей;
- сформировавшиеся хлопья не разбиваются в трубопроводах при перетекании из емкости в емкость;
- контактная коагуляция обеспечивает независимость процесса коагуляции от щелочности и температуры воды.

Разработку конструкции камеры проводили с помощью компьютерного моделирования многофазных течений [9] в системе конечно-элементного анализа Ansys. Так как все дальнейшие эксперименты проводили на учебно-лабораторном стенде "Очистка сточных вод" (рис. 2), то в программе были смоделированы условия течения жидкости именно для фильтровальной колонны лабораторного стенда, диаметр которой составляет 10 см, а диаметр патрубка, подводящего и отводящего исходную воду — 20 мм.

Расход коагулянта на текущем этапе был принят равным 0,25 мл на 100 мл исходной воды. Диаметр подводящего реагент патрубка 8 мм. Характеристики скоростей вводимых жидкостей приведены в табл. 1.



Рис. 2. Учебный лабораторный стенд "Очистка сточных вод"

Таблица 1

Скорости потоков вводимых жидкостей

Наименование патрубка	Скорость потока, м/с
Вход исходной воды	0,318471
Ввод реагента	0,005
Выход исходной воды с коагулянт	0,319267

Решение вопроса с нижним переливом принципиально было рассмотрено с использованием двух подходов.

Вариант первый — исполнение нижнего перелива на дне камеры. Вне зависимости от исполнения отверстий (круглые, прямоугольные) получаемый результат был одинаков для всех моделей. Уменьшение размера отверстия приводило к повышению градиента, а увеличение — к потенциальному вымыванию загрузки.

Вариант второй — размещение перелива в боковой стенке позволило значительно увеличить площадь перелива. Рассматривали различное количество разрезов (от 4 до 16) и их высота (от 10 до 50 мм). Оптимальным было принято 16 разрезов высотой 50 мм. Благодаря увеличению площади поверхности перелива удалось обеспечить минимальное значение градиента скорости при минимальной ширине зазоров перелива.

На рис. 3 приведены результаты моделирования нижнего перелива.

На рис. 4 представлено сравнение результатов моделирования верхнего перелива, на котором видно, что увеличение размера перелива с 10x10 мм до 20x30 мм уменьшает градиент скорости в рассматриваемой точке. А его перенос в верхнюю точку камеры позволит потоку воды избежать застойных зон и обеспечить чуть большее время пребывания воды в камере.

Следующим вариантом был выбор способа введения коагулянта. На рис. 5 представлено распределение коагулянта в долях по объему камеры. В результате рассмотрения различных способов введения коагулянта в камеру из-за сильной диспропорции в расходе реагента и воды, реагент всегда прибывает в стенке камеры. Решить эту проблему удалось лишь введением коагулянта непосредственно в сам патрубок исходной воды.

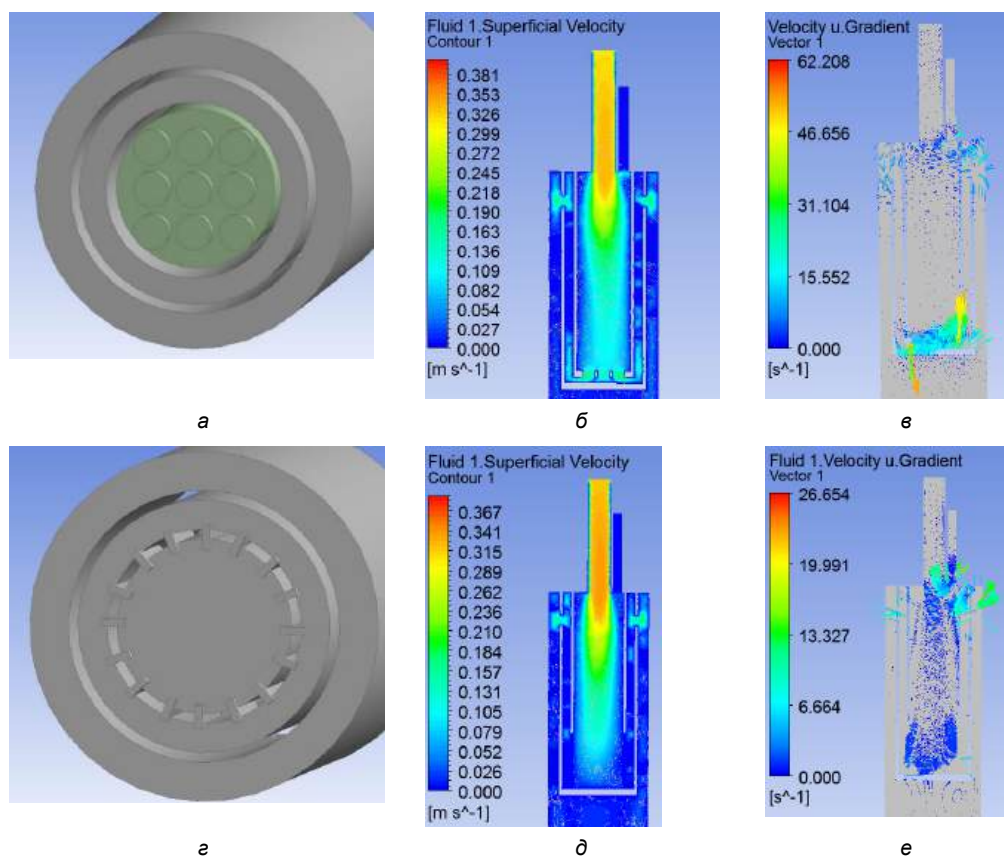


Рис. 3. Результаты моделирования нижнего перелива:

а, г — внешний вид нижнего перелива; б, д — распределение скорости течения внутри корпуса камеры;
в, е — распределение градиента скорости внутри корпуса камеры

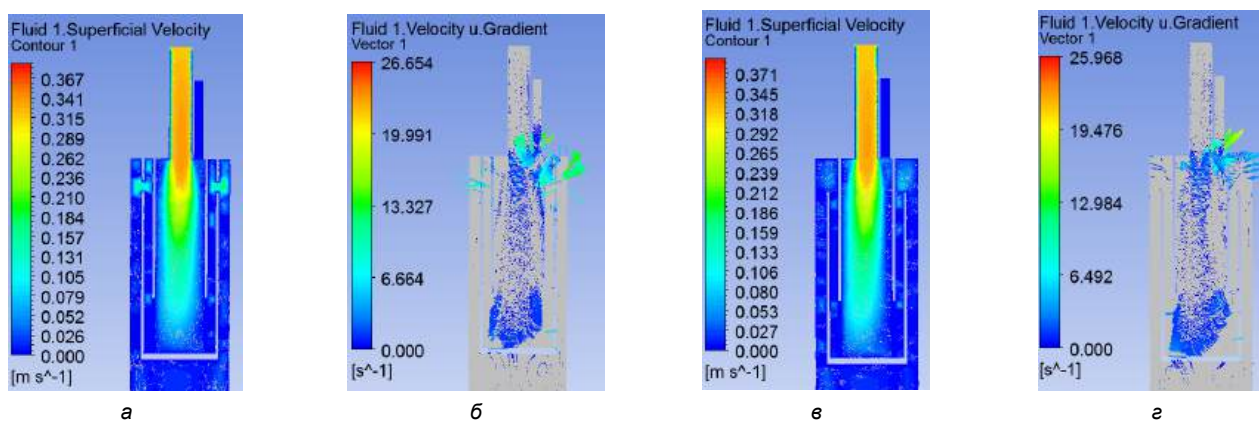


Рис. 4. Результаты моделирования верхнего перелива:

а, в — распределение скоростей в камере; б, г — распределение градиента скорости в камере

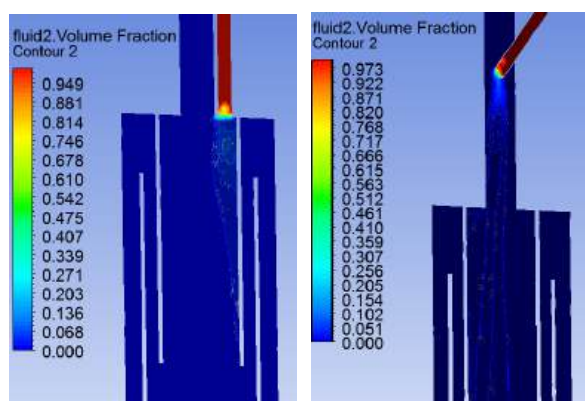


Рис. 5. Результаты моделирования верхнего распределительного устройства

Предположение о потенциально возможном завихрении под плоским дном камеры оказалось справедливым. На рис. 6 представлены линии движения тока, по которым видно завихрение под дном камеры. Однако эта проблема легко решается благодаря использованию конусной вставки снизу. При этом высота конуса составляет всего 20 мм.

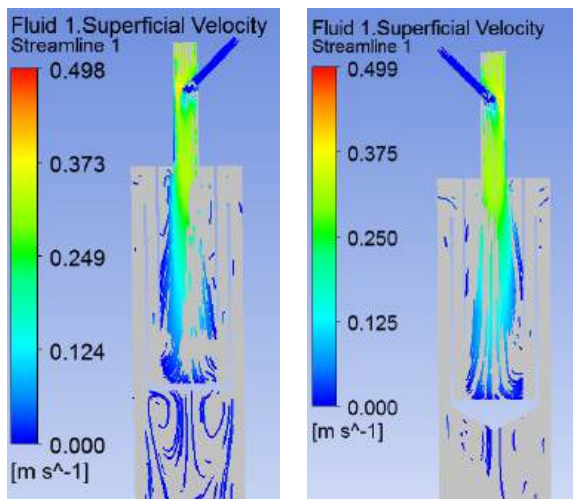


Рис. 6. Результаты моделирования конусной вставки

В результате моделирования были определены размеры камеры (рис. 7).

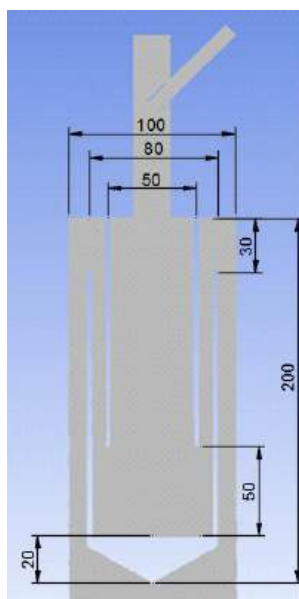


Рис. 7. Конструкция камеры перемешивания

Вторым ключевым фактором для работы камеры перемешивания является определение перемешивающей загрузки. Основные требования, которые к ней предъявляются:

- механическая прочность;
- перемешивание всего объема камеры;
- отсутствие микрэлементов, переходящих из загрузки в воду.

Выбор наиболее эффективной загрузки проходил в 3 этапа:

1. Определение оптимального диапазона размера загрузки.

2. Определение материала и формы загрузки.

3. Определение количества загрузки.

Для проведения эксперимента была собрана внутренняя часть камеры — чаша перемешивания с нижним переливом (рис. 8), диаметр которой составляет 50 мм. При проведении эксперимента использовали струю водопроводной воды из-под крана. Каждый опыт проводили не менее трех раз, продолжительность подачи воды составляла не менее 10 секунд.

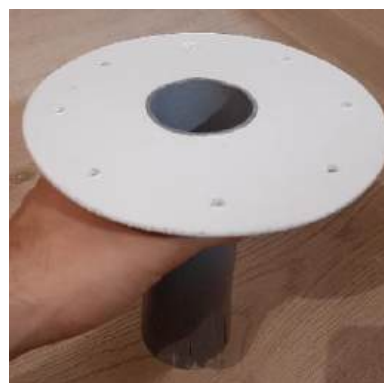


Рис. 8. Чаша интенсивного перемешивания

Оценка эффективности перемешивания проводили визуально, в качестве критерия качества перемешивания оценивали способность загрузки перемешивать весь объем чаши интенсивного перемешивания при меньшем количестве перемешивающих элементов.

Этап 1. Определение оптимального диапазона размера загрузки.

Для данного этапа использовались 6 пенопластовых сфер различного диаметра (рис. 9)

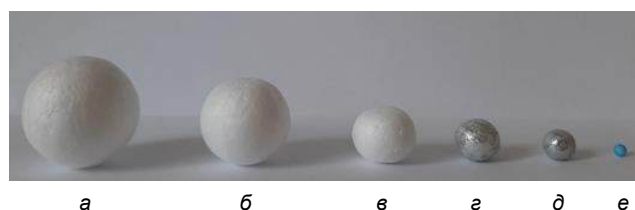


Рис. 9. Пенопластовая загрузка:
а — сфера диаметром 25 мм; б — сфера диаметром 20 мм;
в — сфера диаметром 15 мм; г — сфера диаметром 10 мм;
д — сфера диаметром 5 мм; е — сфера диаметром 3 мм

Начиная с загрузки большего диаметра в камеру помещали по 1 сфере, постепенно увеличивая их количество до тех пор, пока они не начинали сами себе мешать, тем самым прекращая перемешивание. Для сферы диаметром 25 мм критическим количеством стало 2 ед. загрузки, вторая сфера подпирает первую снизу и не дает ей опуститься ниже. Для загрузки в 20 мм критическим количеством стало 5 ед. загрузки.

Оптимальным является диапазон в 5—15 мм, при котором вне зависимости от количества загрузок не возникает запаривания верхнего ряда нижним. Однако стоит отметить, что для сфер размером 15 и 10 мм было замечено формирование "колодца". По краю чаши выстроился неподвижный ряд загрузки, а струя

воды била в центр чаши и перемешивала лишь небольшое количество единиц загрузки (рис. 10).



Рис. 10. Использование сфер диаметром 10 мм

При использовании загрузки диаметром 3 мм небольшая часть из них под напором исходной воды просачивалась через нижний перелив и вымывалась из чаши.

В результате работы было выявлено:

- пенопластовый материал очень легкий и стремится выплыть вверх, в связи с чем возникает потенциальный риск вымывания загрузки через патрубок подачи исходной воды;
- использование загрузки размером меньше 5 мм вызывает потенциальный риск вымывания загрузки через нижний перелив;
- количество, материал и форму загрузки необходимо выбрать таким образом, чтобы исключить возможность образования "колодца";
- оптимальный диапазон размера загрузки находится от 5 мм до 15 мм.

Этап 2. Определение материала и формы загрузки.

Для данного этапа использовались 6 загрузок различной формы и материала согласно рис. 11.



Рис. 11. Используемая загрузка для второй серии опытов:

а — пластиковая сфера диаметром 20 мм; б — полая перфорированная пластиковая сфера диаметром 25 мм; в — пенопластовая полусфера диаметром 20 мм; г — пластиковая сфера с рифленой поверхностью диаметром 10 мм; д — деревянная сфера диаметром 20 мм; е — деревянный цилиндр диаметром 10 мм и высотой 4 мм

В результате проведенного опыта было выявлено следующее:

- цельные пластиковые загрузки (рис. 11, а, г) слишком тяжелые, загрузка упала на дно, перемешивания не происходило;
- полая пластиковая загрузка (рис. 11, б) имеет большой диаметр и не подходит для описываемых целей;
- полусфера из пенопласта (рис. 11, в) показала плохой результат. Плоские части загрузки ударяются друг о друга, в результате чего две частички препятствуют перемешиванию друг другу;
- оптимальным материалом для загрузки оказалось дерево (рис. 11, д, е), причем из-за своего небольшого размера наиболее интересен вариант (рис. 11, е), т. к. количество перемешивающих единиц загрузки будет больше.

Этап 3. Определение количества загрузки.

В этом опыте определялся оптимальный объем используемой загрузки. Рассматривали варианты с заполнением камеры перемешивания на 10, 30 и 50 %. При заполнении камеры на 10 % в ней осталось достаточно много свободного пространства и такой объем не самый оптимальный. При использовании загрузки 50 % от объема камеры появлялись застойные зоны, которые ухудшали эффективность перемешивания. Оптимальный объем загрузки от объема камеры был принят равным 30 %. При таком значении отсутствуют застойные зоны, и эффект от перемешивания максимален.

После этого были проведены опыты с камерой перемешивания на лабораторном стенде. На основе результатов моделирования была собрана и установлена на лабораторный стенд камера перемешивания (рис. 12).

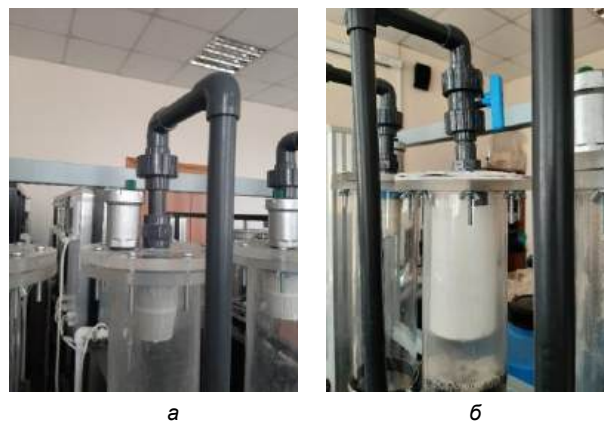


Рис. 12. Фильтровальная колонна лабораторного стенда: а — без камеры перемешивания; б — с камерой перемешивания

С помощью лабораторного стенда проведен ряд экспериментов, которые были направлены на изучение повышения эффективности очистки воды по такому показателю как мутность. Измерение мутности проводили на лабораторном турбидиметре модели НАСН 2100N. Опыты проводили на модельной воде и воде из реки Яузы на стенде с камерой и без нее. Модельная вода представляет собой водопроводную воду с добавлением порошкообразного активированного угля в пропорции 0,05 г угля на 100 мл воды.

Принципиальная схема стенда представлена на рис. 13.

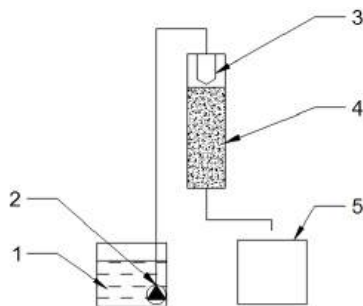


Рис. 13. Принципиальная схема лабораторного стенда: 1 — бак с исходной водой; 2 — насос подачи исходной воды; 3 — камера перемешивания; 4 — фильтровальная колонна; 5 — бак с очищенной водой

В табл. 2 представлены значения мутности исходной воды и очищенной для трех опытов без камеры перемешивания на модельной воде, а в табл. 3 даны результаты с камерой перемешивания.

Таблица 2

Результаты лабораторного определения мутности модельной воды без камеры перемешивания

№ опыта	NTU исходной воды	NTU очищенной воды
1	114	28
2	105	27,5
3	92	27,7

Таблица 3

Результаты лабораторного определения мутности модельной воды с камерой перемешивания

№ опыта	NTU исходной воды	NTU очищенной воды
1	76	9,42
2	73,7	9,1
3	79,2	8,7

Следует отметить, что степень очистки воды значительно лучше в фильтре с использованием камеры перемешивания. Как уже было описано ранее, такой результат удается получить за счет разбиения этапов коагуляции на стадии, а также использования перемешивающей загрузки в качестве дополнительной поверхности раздела фаз.

В табл. 4 представлены значения мутности исходной воды и очищенной для трех опытов без камеры перемешивания на речной воде, а в таблице 5 даны результаты с камерой перемешивания.

Таблица 4

Результаты лабораторного определения мутности речной воды без камеры перемешивания

№ опыта	NTU исходной воды	NTU очищенной воды
1	12,7	13,5
2	13,1	13,1
3	12,5	12,9

Таблица 5

Результаты лабораторного определения мутности речной воды с камерой перемешивания

№ опыта	NTU исходной воды	NTU очищенной воды
1	14,5	10,0
2	13,9	10,2
3	13,6	9,16

На примере опыта с использованием речной воды можно видеть, что результат очистки на установке фильтрования с камерой перемешивания лучше, чем без камеры перемешивания.

Для оценки режима перемешивания внутри камеры целесообразно использовать критерий Кэмпа [10], который определяют по формуле (1):

$$Ca = Gt \quad (1)$$

где t — время перемешивания, с;

G — градиент скорости, 1/с.

Для определения времени перемешивания необходимо воспользоваться формулой (2).

$$t = \frac{V}{Q} \quad (2)$$

где V — объем чаши перемешивания, м³;

Q — расход исходной воды, м³/с.

Градиент скорости можно определить по формуле (3)

$$G = \sqrt{\frac{\Delta p}{\mu t}} \quad (3)$$

где Δp — перепад давления в камере перемешивания, Па;

μ — динамическая вязкость воды, Па·с;

t — время перемешивания, с.

Гидравлическое сопротивление псевдоожиженного слоя, согласно [11], можно определить по формуле (4)

$$\Delta p = \frac{m_s g}{S} \quad (4)$$

где m_s — масса всех частиц, кг;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

S — площадь поперечного сечения камеры, м².

Объединив уравнения (1)–(4), получим уравнение для определения критерия Кэмпа для псевдоожиженного слоя (5)

$$\Theta = \sqrt{\frac{m_s g}{S \mu t}} \frac{V}{Q} \quad (5)$$

Таким образом, с помощью компьютерного моделирования были рассмотрены режимы течения жидкости внутри камеры перемешивания и предложены решения по улучшению ее конструкции. Дополнительно определена перемешивающая загрузка, ее оптимальный размерный диапазон, а также количество загрузки в камере. На основе полученных результатов была смоделирована камера перемешивания и ее размещение на лабораторном стенде. На лабораторном стенде проведен ряд экспериментов, подтверждающих эффективность работы предложенного комбифильтра [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ксенофонов Б. С. Комбифильтр для очистки воды. Патент RU 209470 U1 Российская Федерация № 2021132892. Опубликовано 16.03.2022.
2. Дерябин В. А., Фарафонов Е. П. Физическая химия дисперсных систем: учеб. пособие. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 88 с.
3. Зимон А. Д. Коллоидная химия: Общий курс. — Изд. 6. — М.: Кранд, 2015. — 342 с.
4. Алексеева Л. П. Оценка эффективности применения оксихлорида алюминия по сравнению с другими коагулянтами // Водоснабжение и санитарная техника. 2003. № 2. С. 11—14.
5. Кургаев Е. Ф., Бабенков Е. Д., Гуртовенко В. Е. и др. Способ реагентной обработки воды с применением рециркуляции. Патент № 182602 Российская Федерация. Бюллетень № 11. 1996.
6. Азров М. Э., Тодес О. М., Наринский Д. А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. — Л.: Химия (ЛО), 1979. — 176 с.

7. Аксенов В. И., Ладыгичев М. Г., Ничкова И. И., Никулин В. А., Кляйн С. Э., Аксенов Е. В. Водное хозяйство промышленных предприятий: справочное издание. В 2-х книгах. Кн. 1 / Под ред. Аксенова В. И. — М.: Теплотехник, 2005. — 640 с.

8. Синайский Э. Г., Лапига Е. Я., Зайцев Ю. В. Сепарация многофазных многокомпонентных систем. — М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2002. — 621 с.

9. Шарай Е. Ю. Компьютерное моделирование многофазных течений при решении задач техносферной безопасности: учеб. пособие / Под ред. Девисилова В. А. — М.: ИНФРА-М, 2019. — 128 с.

10. Ксенофонтов Б. С. Водоподготовка и водоотведение: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки 20.04.01 "Техносферная безопасность", 20.04.02 "Природообустройство и водопользование (квалификация (степень) "магистр)". — М.: Форум: Инфра-М, 2018. — 296 с.

11. Жедяевский Д. Н., Косьмин В. Д., Лукьянов В. А., Круглов С. С. Гидромеханические процессы. Руководство к практическим занятиям в лаборатории процессов и аппаратов нефтегазопереработки. — М.: РГУ нефти и газа, 2012. — 60 с.

Development of the mixing chamber for the combi-filter

B. S. KSENOFONTOV, A. A. SHIRNIEKH

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The proposed work considers the use of a mixing chamber placed inside the filter housing to intensify the coagulation process. Using the Ansys software product, the design of the mixing chamber was considered. Based on the results obtained in the simulation, a mixing chamber was created with its placement on a laboratory stand, as well as an effective mixing load. As a result of laboratory studies, it was found that the use of the developed mixing chamber improves the filtration process.

Keywords: modeling, Ansys, contact coagulation, coagulation stages, mixing chamber, filters.

Bibliography — 11 references.

Received May 29, 2023

УДК 621.43:665.66
DOI: 10.52190/2073-2589_2023_4_12
EDN: GXWGBK

Исследования по количественному испарению воды хвостохранилища в присутствии отработанных моторных масел и двухслойных покрытий

Ф. К. НУРБАЕВА, канд. техн. наук; **А. К. СЕРИКБАЕВА**, канд. техн. наук
Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова,
г. Актау, Мангистауская обл., Казахстан

Ж. Т. УЙСИМБАЕВА, канд. техн. наук
Таразский региональный университет имени М. Х. Дулати,
г. Тараз, Казахстан

Представлены результаты исследований по предотвращению испарения воды с поверхности искусственных водоемов, при этом установлено, что способ является работоспособным при использовании покрытий в присутствии добавок отработанных моторных масел.

Ключевые слова: хвостохранилище, моторные масла, поверхность водоема, испарение воды, покрытия, вентиляция, температура.

Площадь, занимаемая хвостохранилищем Кошкар-Ата (Казахстан, Мангистауская обл.) $\sim 77 \text{ км}^2$. Площадь восстановленных хвостовых отложений, которая имеет тенденцию к увеличению, составляет $\sim 14 \text{ км}^2$ с предполагаемым увеличением до $\sim 21 \text{ км}^2$ по мере снижения уровня воды в отстойнике. Решение вопросов стабилизации водной фазы и обеспыливания "пляжей" является сложной задачей с точки зрения технических решений, объема капитальных и эксплуатационных затрат.

Поставленная задача является сложной, так как поверхность отстойного пруда составляет десятки квадратных километров, что осложняет выбор способа практической реализации разработки.

В процессе проведения литературного и патентного поиска не выявлено эффективных способов сокращения потерь воды с большой поверхности токсичных водоемов.

Необходимо было изыскать средства или вещества, которые в виде добавок способны резко уменьшить испарение воды с поверхности водоема [1, 2]. Уменьшение водной поверхности происходит вследствие комбинированного воздействия на водоем комплекса природных факторов [3].

К таким факторам относятся сильный ветер, движение атмосферных слоев воздуха, жаркий климат, температура воды, наличие в воде тех или иных ве-

ществ, помимо солей минерального происхождения и т. д. Во всяком случае, имеет место испарение воды с поверхности хвостохранилища в атмосферу, обмеление береговой зоны и обнажение песков, что вызывает образование мелкодисперсной пыли, неблагоприятно влияющей на организм человека [4]. Попытки использовать различные материалы и реагенты (полиэтиленовые шарики, пленку, масла, и др.) для уменьшения испарения в той либо иной степени могут лишь временно решить эту проблему для относительно небольших по площади резервуаров [5].

В случае такого огромного водоема, каким является хвостохранилище "Кошкар-Ата", требуются новые нетрадиционные, оригинальные технологические решения, позволяющие проблеме уменьшения испарения воды решать кардинально и при небольших капитальных и эксплуатационных затратах.

Как было указано, интерес представляет использование отработанных моторных масел, которые также, как и неиспользованные масла, способны при смешивании с водой образовать устойчивую пленку [6]. В работе авторами было использовано отработанное моторное масло марки АС-8, представляющее собой смесь дистилляционного и остаточного масел (не менее 14 %). Важно отметить, что масла группы А отличаются незначительным содержанием слабо действующих присадок и пригодны преимущественно для нефорсированных карбюраторных двигателей и дизелей; буква С означает чистоту (селективность) масла.

Материалы и методы исследований

В экспериментах использовали пикнометрический метод для установления удельного веса образца отхода (с/ч^{20}). Он составил $0,8736 \text{ г/см}^3$ (при 20°C).

Нурбаева Фарида Куантхановна, доцент.

E-mail: farida.nurbayeva@yu.edu.kz

Серикбаева Акмарал Кабылбековна, профессор.

E-mail: akmaral.serikbayeva@yu.edu.kz

Уйсимбаева Жанар Тлеукуловна, доцент.

E-mail: zhanara_mm@mail.ru

Статья поступила в редакцию 1 февраля 2023 г.

© Нурбаева Ф. К., Серикбаева А. К., Уйсимбаева Ж. Т., 2023

Фактически удельный вес образца весьма близок к данным вещества, упомянутого источником [7]. Необходимо учесть, что продукт является отходом (содержит влагу, тончайшие частицы металла, их оксиды и другие загрязнения).

Количество масла по высоте резервуара варьировало в пределах 1,0—10,0 мм. Для технологии по предотвращению испарения воды с ее поверхности использовать огромные количества масла нецелесообразно ввиду его большого тоннажа применительно к зеркалу водоема. Однако самой сложной задачей являлось определение минимального количества масла, при котором можно свести до минимума процесс испарения воды.

Методически экспериментальные опыты осуществляли следующим образом. В резервуар установки помещали воду из хвостохранилища ниже нулевой отметки на 10 мм (1 см). Затем микропипеткой на поверхность воды дозировали отход масла марки АС-8 в заданных количествах, согласно пределам по толщине 1,0—10,0 мм с учетом того, что одно деление по объему поверхности составляет 0,1 дм³. Опыты осуществляли при тех же температурах, что и при отсутствии масла (+20, +25, +30 и +35 °С), и создании вихревых потоков на поверхности жидкости (приточная вентиляция, пропеллерный вентилятор, смонтированный под углом наклона к поверхности жидкости 45°). Следует принять во внимание, что необходимо использовать такие минимальные количества масла, которые бы позволили создать равномерный слой на поверхности исследуемой воды [8].

Были осуществлены 3 варианта опытов при вышеуказанных температурах при высоте уровня моторного масла (марка "АС-8"), равного 0,25; 0,5; 5 и 10 мм. Поскольку визуально фиксировать небольшую высоту практически невозможно, количество добавки можно рассчитать [9]. Объем масла (V_M) равен

$$V_M = \pi R^2 \cdot H \quad (1)$$

где R — радиус резервуара установки (равен 17,7 см).

Тогда $V_M = 3,14 \cdot (17,7)^2 \cdot 0,025 = 24,5925 \approx 24,6 \text{ см}^3$.

H — высота столба масла (равна 0,025 см).

Отбор масла осуществляют из мерной колбы (25,0 см³) пипеткой; отбирают 0,4 см³, а остаток вымывают в резервуар установки. Колбу несколько раз смывают водой в опыте. Таким образом, уровням высоты масла в установке (0,25 мм; 0,5 мм; 5 мм и 10 мм) соответствует объем масла соответственно 24,6 см³; 49,2 см³; 492,0 см³ и 984,0 см³.

Результаты исследований и обсуждение

Результаты опытов по испарению воды хвостохранилища "Кошкар-Ата" в присутствии добавок масла представлены в таблице.

Из таблицы отчетливо видно, что при толщине слоя моторного топлива, равного 0,25 мм (это соответствует 0,25 дм³/м² поверхности воды), имеет место небольшое испарение воды хвостохранилища в пределах 0,5—0,8 дм³/м²·сут. при температурах в пределах +20—+35 °С.

Результаты опытов по испарению воды хвостохранилища в присутствии моторного топлива АС-8 во времени и при различных температурах (температура воздуха +10°С; время суток 1,0)

№ опыта	Температура воды, °С	Количество испаряемой воды, дм ³ /м ²	Среднее количество испаряемой воды, дм ³ /м ²	Высота уровня масла АС-8, мм
1	20	0,50 0,51 0,50 0,49 0,50	0,5	0,25
2	25	0,6 0,59 0,61 0,6 0,6	0,6	0,25
3	30	0,68 0,67 0,69 0,68 0,68	0,68	0,25
4	35	0,39 0,81 0,80 0,81 0,79	0,8	0,25
5	20	0	0	0,5
6	25	0	0	0,5
7	30	0	0	0,5
8	35	0	0	0,5
9	20	0	0	5,0
10	25	0	0	5,0
11	30	0	0	5,0
12	35	0	0	5,0
13	20	0	0	10,0
14	25	0	0	10,0
15	30	0	0	10,0
16	35	0	0	10,0

Следует полагать, что толщина масляного слоя, равного 0,25 мм на поверхности воды недостаточна, чтобы полностью предотвратить испарение воды. Тем не менее, масляное пятно на поверхности воды весьма однородно, что свидетельствует о хорошей текучести топлива. Показано также, что при увеличении толщины масляного слоя до 0,5 мм и выше испарение воды хвостохранилища Кошкар-Ата предотвращается практически на 100 %. Об этом свидетельствует стабильный (первоначальный) уровень воды, используемый в опыте и фактически дозы масла в количествах 0,50 дм³ и выше достаточно нанести на поверхность воды хвостохранилища, чтобы предотвратить полное испарение воды. Обращает на себя внимание, что далее нагрев воды до +35 °С вовсе не разрушает поверхностный слой масла [10].

Во всех вариантах опытов, представленных в таблице, на поверхности водного слоя полностью отсутствует корка солей. Это дополнительно свидетельствует о полном предотвращении испарения воды, в отличие от опытов по испарению воды хвостохранилища "Кошкар-Ата" при отсутствии моторного топлива, где постоянно на поверхности воды образуется весьма плотная корка минеральных солей. Таким образом, на основе проведенных экспериментальных работ по испарению воды хвостохранилища Кошкар-Ата в присутствии добавок моторного масла (АС-8) четко определена минимальная доза, при которой полностью предотвращается испарение воды (0,25 дм³/м² поверхности или с учетом удельного веса масла 0,8736 кг/дм³·0,25 дм³ = 0,2184 кг/м² поверхности). С учетом случайных обстоятельств (сорбция масла различными материалами, потери в условиях применения и т. д.) минимальной дозой, предотвращающей испарение, следует считать дозу масла АС-8 в количестве 0,25—0,50 дм³/м² поверхности либо 0,22—0,44 кг/м² поверхности [11, 12]. Результаты таблицы представлены и на рис. 1.

Для подтверждения полученных результатов экспериментальных исследований по снижению степени испарения воды в присутствии добавок моторных масел проведена апробация предлагаемой технологии в практических условиях. Предотвращение испарения воды с поверхности загрязненных минерализованных водных сред обусловлено образованием на поверхности вода—воздух весьма устойчивой пленки моторного масла, неразрушающейся даже при повышенных температурах (+30,4—+35) °С.

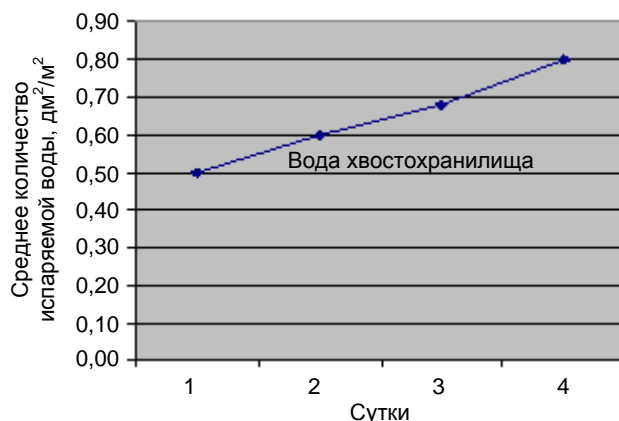


Рис. 1. Среднее количество испаряемой воды в присутствии масла АС-8 (при температуре воздуха 10 °С, воды (20, 25, 30, 35 °С) и толщине масла 0,25 дм³/м² (0,22 кг/м²))

Это можно объяснить тем, что, в отличие от многих поверхностно-активных веществ, большинство которых растворяются в воде, моторные масла типа марки АС-8 обладают весьма высокой текучестью на поверхности воды с образованием пленки любой заданной толщины. Они практически нерастворимы в воде (вследствие наличия углеводородов нефти, обладающих гидрофобными свойствами), а также обладают значительной химической инертностью как по отношению к воде, так и другим веществам [13]. На опытно-экспериментальном полигоне, для того чтобы провести испытания при заданной постоянной температуре воды, на расстоянии 0,3 м от бортов экспериментального накопителя с жидкой минерализованной средой было уложено разработанное поплавко-покрытие с двумя пленками — верхней из оргстекла и нижней темной, чтобы водное зеркало было защищено от проникновения холодного воздуха извне (рис. 2).

Содержимое экспериментального накопителя, заполнили загрязненными сточными водами, содержащими загрязненные нефтью грунты. Дневная и ночная температуры воздуха и воды отличались резкими перепадами. На полигоне была смонтирована емкость, предварительно заполненная отходами моторного масла марки АС-8. Рядом с емкостью расположили лабораторный шкаф с мерными пробирками с образцами масла, взятыми в количестве 14,0 дм из расчета 0,5 дм/м водной поверхности.



Рис. 2. Двухслойные покрытия для блокирования испарения влаги на поверхности экспериментального водоема

Температура воды фиксировалась показаниями вмонтированных термометров и была на уровне (20—21) °С. Опыты осуществляли в непрерывном режиме в течение 7 сут (168 ч). Первоначальный уровень высоты сточных вод от дна водоема составлял 2500 мм (2,5 м). Именно по его изменению можно было установить степень испарения воды с поверхности водоема. После стабилизации теплового режима имели место следующие наблюдения. Во-первых, на внутренних стенках водоема по периметру и на поверхности сточных вод отложения солей (в виде корки) не наблюдалось вообще. Во-вторых, поверхность масляного слоя на поверхности сточных вод была равномерной и, несмотря на его колебания в процессе проведения испытаний, этот слой разрыву не подвергался. По окончании испытаний (7 сут) уровень высоты сточных вод в земляной емкости соответствовал первоначальному показателю (2500 мм), что свидетельствует о полном предотвращении испарения воды с поверхности искусственного водоема [13].

Вывод

Проведенные исследования по количественному испарению воды, в присутствии моторного масла на полигоне показали, что использование двухслойных покрытий и добавок отработанного моторного масла типа "АС-8" при оптимальных количествах 0,5 дм³/м² водной поверхности позволяет практически на 100 % предотвратить испарение воды с поверхности хвостохранилища "Кошкар-Ата". Тем не менее отходы моторных масел в условиях Мангистауской области при нынешнем состоянии экономики в настоящее время не могут быть подвергнуты утилизации, поскольку такая технология требует немалых финансовых средств, необходимых для создания нового производства.

Использование отходов моторных масел для хвостохранилища ущерба окружающей среде не принесет, поскольку указанный водоем является сам по себе источником промышленных отходов и, вследствие применения новой технологии, будет иметь

место их временная локализация от объектов окружающей среды. Новый способ по уменьшению процесса испарения с поверхности хвостохранилища "Кошкар-Ата" позволит значительно затормозить процесс опустынивания прибрежных территорий и осуществить более плотное отложение минерализованных ингредиентов от водной фазы. Использование масла АС-8, наряду с пластиковыми поплавками-покрытиями, позволяет реализовать более гибкий экономически целесообразный способ предотвращения испарения, при котором будет обеспечена равномерность слоя масла между покрытиями, и вместе с этим отпадает периодическое использование специального транспорта для повторного нанесения слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакин Н. Н., Ковалевский В. К., Плотников А. П. Результаты климатических испытаний испарения бинарных жидкостей в природных условиях г. Томска // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 12. С. 1337—1340.
2. Кунаев М. С. Исследование механизма поверхностного натяжения жидкостей. — Алматы: Гылым, 2004. — 78 с.
3. Ким И. С. Изменения уровня Каспийского моря и циркуляция атмосферы // Метеорология и гидрология. 1994. № 7. С. 76—81.
4. Постоянный мониторинг за испарением с поверхности накопителей нефти. — Актау: Мангистау мониторинг, 2008. — 113 с.
5. Шамен А. Гидрометеорология и мониторинг природной среды Казахстана. — Алматы: Гылым, 1996. — 295 с.
6. ТКП 17.10-13-2009 (02120). Правила проведения актинометрических и теплосбалансовых наблюдений и работ. Охрана окружающей среды и природопользование.
7. Федосов С. Т. Степень растворимости поверхностно-активных веществ. — СПб: СПГУ, 2005. — 109 с.
8. Байкова И. М., Ефимова Н. А., Строкина Л. А. Современное изменение облачного покрова над территорией России // Метеорология и гидрология. 2002. № 9. С. 52—61.
9. Чичасов Г. Н. Технология долгосрочных прогнозов погоды. — СПб.: Гидрометеиздат, 1991. — 304 с.
10. Кузнецов В. И., Голубев В. С., Федорова Т. Г. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. — Л. Гидрометеиздат, 1969. — 83 с.
11. Ривин Ю. Р. Циклы Земли и Солнца. — М.: Наука, 1989. — 180 с.
12. Катмаков П. С., Гавриленко В. П., Бушов А. В. Биометрия: учеб. пособие для вузов / Под общей ред. Катмакова П. С. Изд. 3, перераб. и доп. — М.: Изд-во Юрайт, 2023. — 186 с.
13. Дегтярев А. С., Драбенко В. А., Драбенко В. А. Статистические методы обработки метеорологической информации: учебник. — СПб: ООО "Андреевский издательский дом", 2015. — 225 с.

Studies on the quantitative evaporation of tailings water in the presence of used motor oils and two-layer coatings

F. K. NURBAYEVA, A. K. SERIKBAYEVA

Caspian University of Technology and Engineering named after Sh. Yessenov,
Aktau, Mangistau region, Kazakhstan

Zh. T. UISIMBAEVA

Taraz Regional University named after M. Kh. Dulati, Taraz, Kazakhstan

The results of studies on preventing the evaporation of water from the surface of artificial reservoirs are presented, and it has been established that the method is workable when using coatings in the presence of waste motor oil additives.

Keywords: tailings pond, motor oils, reservoir surface, water evaporation, coatings, ventilation, temperature.

Bibliography — 13 references.

Received February 1, 2023

УДК 628.164
DOI: 10.52190/2073-2589_2023_4_16
EDN: HFWQTU

Методы восстановления отработанных регенерационных растворов натрий-катионитовых фильтров

А. М. ПАВЕЛКОВА

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, Россия

Изучен метод восстановления отработанного раствора хлорида натрия для повторной регенерации ионообменных фильтров. Представлены способы уменьшения образования сточных вод и снижения потребления реагентов. Рассмотрены технологии очистки отработанного раствора от солей жесткости, которые позволяют не только сократить объем сбрасываемых сточных вод, но и вернуть в производство хлорид натрия. Проанализированы методы восстановления регенерационного раствора с точки зрения снижения расхода реагентов, применяемых в процессе очистки раствора.

Ключевые слова: умягчение воды, минерализованные стоки, электрофлотация, остаточная жесткость, электролиз, хлориды, нанофильтрация.

Применение натрий-катионирования является наиболее распространенным методом умягчения подпиточной воды для теплосетей и паровых котлов низкого давления, реже метод применяют для очистки сточных вод от тяжелых металлов [1]. В процессе ионного обмена корректируется солевой состав воды с замещением ионов жесткости на натрий, содержание при этом незначительно повышается. Для получения обессоленной воды натрий катионирование комбинируют с водород катионированием или хлор-ионированием, а также с баромембранными методами, что позволяет получить сверхчистую воду и уменьшить количество потребляемых реагентов [2—4]. Постоянное развитие промышленных предприятий, в том числе теплоэнергетических способствует росту объема потребления ионообменной смолы на 4—5 % в год.

Ионный обмен обратим, для натрий-катионирования в качестве регенерационного раствора используется 6—10 %-ный раствор хлорида натрия [5], значительно реже встречается регенерация природными хлоридно-натриевыми рассолами из подземных горизонтов [6].

Использование сульфата натрия для регенерации натрий-катионитовых фильтров не нашло широкого применения из-за сложности эксплуатации, связанной с возможным гипсованием загрузки при регенерации, и в данной работе не рассматривается. Минимальные удельные расходы хлорида натрия составляют от 100—150 г-экв/л для одноступенчатого катионирования с остаточной жесткостью воды 0,1 мг-экв/л до 350—400 г-экв/л для двухступенчатого катионирования

с показателем остаточной жесткости не более 0,02 мг-экв/л [7]. В результате регенерации к раствору хлорида натрия добавляют восстановленные соли в виде хлоридов магния и кальция, хорошо растворимые в воде. В основном, концентрация солей в отработанном регенерационном растворе находится в пределах 10—20 г/л, но иногда может достигать 50 г/л [8]. Расход воды на приготовление регенерационного раствора 15—20 % от собственных расходов фильтра ионного обмена. Данный объем характеризуется залповым характером сброса отработанных вод.

Увеличение концентрации хлоридов в сточных водах повышает осмотическое давление среды, что негативно влияет на микроорганизмы, замедляя скорость биологической очистки и снижая концентрацию биологически активного ила. Хлориды при биологической очистке не удаляются из сточных вод, и пройдя через очистные сооружения негативно воздействуют не только на флору и фауну, но и на работу промышленных предприятий, расположенных ниже по течению, вынужденных очищать более минерализованную воду. При смешивании с бытовыми сточными водами, содержащими ПАВ и другие неполярные органические соединения применение реагентных методов очистки сточных вод от хлоридов является нецелесообразным в связи с явлением коллоидной защиты, препятствующей образованию осадков, кроме того применяемые реагенты также негативно воздействуют на окружающую среду как в виде образующихся осадков, так и при своем производстве [9, 10]. Концентрация хлоридов, превышающая 11,9 г/л, пагубно отражается на пресноводных гидробионтах. Снижение естественным путем в воде хлоридов, обладающих высокой растворимостью и миграционной способностью, в сочетании со слабой сорбцией к взвесям и низким потреблением водными организмами, происходит очень медленно.

Павелкова Анна Михайловна, аспирант.
E-mail: pavelkovaanna@mail.ru

Статья поступила в редакцию 1 сентября 2023 г.

© Павелкова А. М., 2023

Существующие требования к предельно допустимой концентрации (ПДК) хлоридов в сточных водах различны в зависимости от места приема стока. Для сброса в городскую канализацию ПДК хлоридов выше, чем для водоемов, хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК = 350 мг/л) [11] не должен превышать 1000 мг/л [12]. Наиболее низкий ПДК, равный 300 мг/л для сброса хлоридов в рыбохозяйственные водоемы [13].

Учитывая возрастание требований к качеству очистки сбрасываемых сточных вод, увеличение количества оборотных систем водоснабжения предприятий, обзор методов снижения образования и дальнейшего восстановления отработанных регенерационных растворов натрий-катионитовых фильтров в целях повторного использования является актуальным как с экологической, так и с экономической точки зрения.

Методы очистки сточных вод от хлоридов

Для очистки отработанных регенерационных растворов применяют гидромеханические и физико-химические методы.

Отработанные регенерационные растворы, загрязнённые ионами кальция и магния, представляют собой гомогенную систему, что усложняет очистку. В настоящее время отработанные растворы в основном в дальнейших технологических процессах не применяют, кроме нейтрализации кислых сточных вод, образующихся в том числе на установках водород катионирования. Сточные воды ионообменных установок с высокой степенью минерализации наиболее часто сбрасывают в систему городской канализации, разбавляя другими сточными водами предприятия для соответствия нормам ПДК. Однако таким образом проблема постепенного засоления водоемов не решается, а только откладывается. При превышении норм ПДК с абонента взимается повышенная оплата, отработанные регенерационные растворы редко подвергаются очистке с затратами электроэнергии и реагентов.

К физическим методам сокращения объема сброса высокоминерализованных сточных вод относится технология "нулевого сброса" с применением выпарных технологий, что полностью решает проблему стоков, но образовавшиеся твердые отходы в большинстве случаев поступают в отвалы для дальнейшего захоронения, что ведет к потере ценных компонентов. Одним из приоритетных направлений сокращения объемов сброса высокоминерализованных стоков является восстановление отработанных регенерационных растворов хлорида натрия для повторного применения. Стоит отметить, что регенерация восстановленным раствором хлорида натрия также приведет к снижению расходов воды и реагента для приготовления свежего раствора. Общая схема рециклинга восстановленным раствором хлорида натрия показана на рис. 1.

Для снижения затрат на восстановление регенерационного раствора оптимальной стратегией будет снижение потребления воды на собственные нужды установок ионного обмена при помощи автоматизации процесса регенерации, применения противоточных технологий и выбором наиболее эффективной смолы, что приведет к сокращению частоты регенераций с повышением качества обработанной воды [14, 15]. Учитывая залповый сброс целесообразно усреднение стока по объему для уменьшения габаритов оборудования.

Отработанный раствор установок натрий-катионирования загрязнен солями жесткости: кальцием и магнием, которые необходимо удалить для повторного использования раствора. Наиболее распространенными и эффективными являются физико-химические методы, такие, как осаждение, сорбция, флотация, электродиализ, нанофильтрация и их комбинации. Классическое умягчение реагентными методами для восстановления отработанного раствора, в том числе известково-содовым, щелочным, фосфатным и др., не получило широкого распространения из-за многостадийности комбинированного процесса очистки, необходимого для осаждения солей жесткости в рассоле.

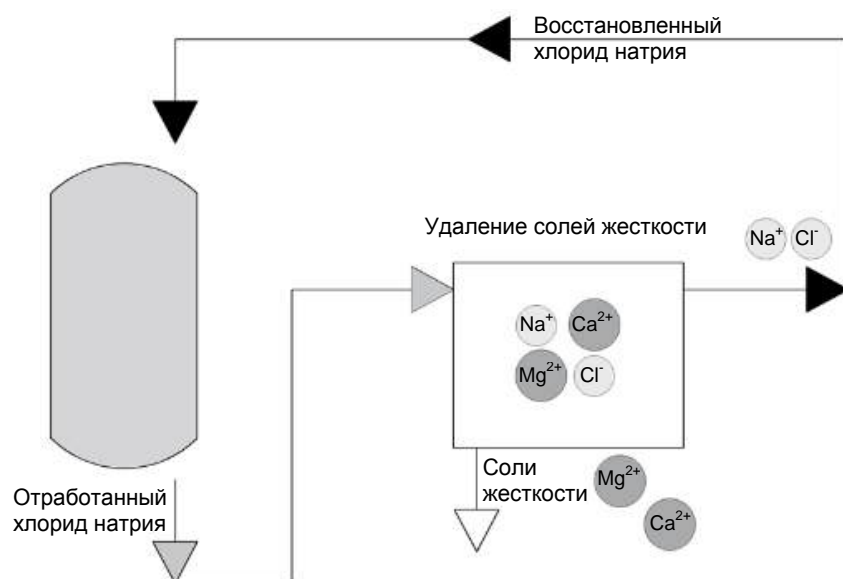


Рис. 1. Схема рециклинга восстановленным раствором хлорида натрия

Осаждение

Классическим методом снижения некарбонатной жесткости для очистки воды от солей жесткости является применение термохимического метода. Процесс образования осадка в виде карбонатов солей жесткости происходит при нагреве, для повышения эффективности умягчения. Отработанный раствор смешивается с содой из соотношения 115 % от стехиометрии на сумму ионов кальция и магния с помощью реактора-смесителя, затем подвергается нагреву паром до температуры 120—140 °С в течение 90 минут. Реакция сопровождается образованием крупных и тяжелых хлопьев карбонатов солей жесткости, которые быстро оседают на дно за счет сил тяжести вследствие снижения вязкости воды при нагревании. Восстановленный раствор после отделения осадка пресс-фильтром и корректировки концентрации хлорида натрия может быть использован для регенерации фильтров [16]. Отделенный осадок может быть использован в производстве бумаги и стройматериалов, а также для сорбции красителей при очистке сточных вод [17]. Главный недостаток применения соды — достаточно высокая стоимость за счет сложной и энергоёмкой обработки сырья. В связи с тем, что получение соды дороже получения соли, стоимость восстановленного раствора выше изготовления свежего что делает метод нецелесообразным.

Флотация

К методам физико-химической очистки вод от диспергированных примесей относится флотация. Процесс отличается высокой скоростью очистки и эффективностью до 98 %. Для образования примесей необходимо применить реагенты с образованием осадка. Для очистки стоков от нерастворимых солей жесткости можно применить как напорные, так и электрофлотационные установки, имеющие различный механизм образования флотокомплекса. При напор-

ной флотации пузырьки воздуха выделяются из пересыщенных растворов воздуха в воде, при электрофлотации пузырьки образуются в сточных водах под действием электролиза.

Для удаления солей жесткости при восстановлении раствора целесообразно применение солей натрия, для предотвращения загрязнения нежелательными ионами и образованием дополнительного хлорида натрия. В первую очередь при помощи гидроксида натрия удаляются соли катионов магния, образуя мелкодисперсный осадок, который сложно удалить осаждением. Для сорбции полученного осадка и образования флотокомплекса в качестве флокулянта и сорбента используются диспергированные микрофибриллированные целлюлозные волокна в количестве 100—150 мг/л. Процесс обработки протекает в непрерывном режиме в проточных реакторах с разделением шламов солей кальция и магния (рис. 2.)

На первой стадии происходит образование малорастворимого гидроксида магния при реакции отработанного раствора с гидроксидом натрия. Прошедший через сатуратор раствор направляется во флотатор, где происходит выделение флотошлама в виде композиционного материала из волокон целлюлозы и гидроксида магния. На второй стадии раствор обрабатывают карбонатом натрия с образованием карбоната кальция и аналогичным способом отделяют композиционный материал с карбонатом кальция. На выходе из установки после пропускания через песчаный фильтр получают чистый раствор хлорида натрия, который вновь используют для регенерации фильтров [18]. Количество подаваемых реагентов определяется стехиометрически равным содержанию удаляемых ионов жесткости. Преимущество метода заключается в раздельном выведении солей магния и кальция на каждой стадии, сам процесс осуществляется в непрерывном режиме. К недостаткам можно отнести применение карбоната натрия и сложность многостадийной установки.

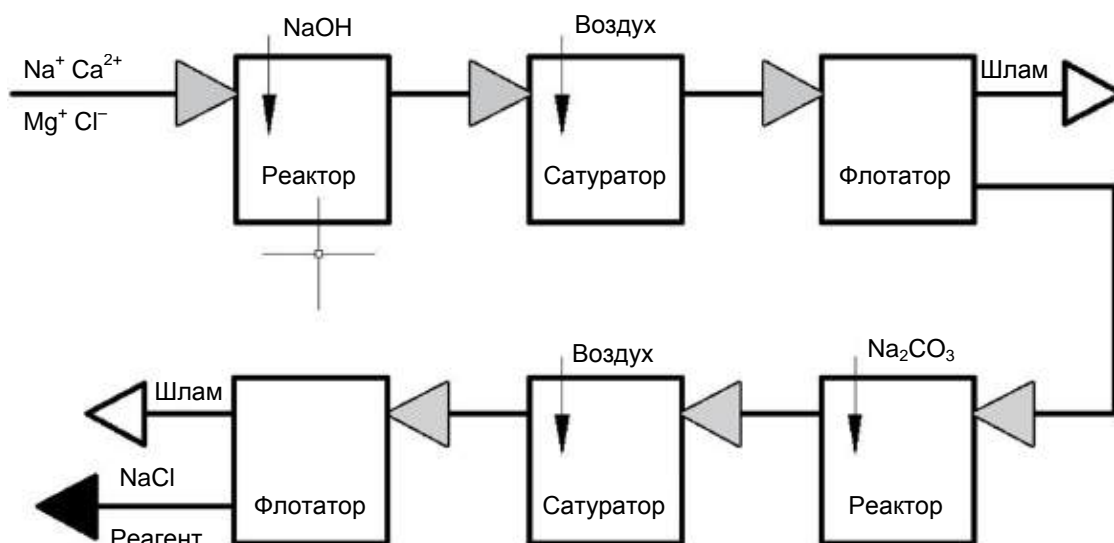


Рис. 2. Блок-схема установки восстановления отработанного раствора соли

Вариантом флотации является технология выделения ионов жесткости из раствора соли с концентрацией до 10 г/л в виде нерастворимых фосфатов при помощи электрофлотации. Соли кальция и магния также при помощи реагента переходят в нерастворимую суспензию, образующую флотокомплексы с высокодисперсными пузырьками газов от электролиза воды. Эффективность удаления ионов магния и кальция при любых соотношениях фосфат-ионов к ионам кальция при оптимальном значении pH = 9 достигает 80—90 %. Преимуществами метода являются быстрая скорость полной реакции (менее 10 мин.), минимальное количество реагентов в виде флокулянта "Суперфлок А-100" для образования флотокомплексов, расход которого составляет всего 4 мг на литр обрабатываемых стоков [19]. Очистка с помощью флотации характеризуется минимальным образованием побочных продуктов очистки сточных вод в виде флотошлама.

Мембранные методы

Главной особенностью мембранных методов очистки сточных вод является возможность разделения веществ без дополнительного применения реагентов за счет селективности мембраны, в результате происходит разделение и концентрирование растворов. Селективность мембраны зависит от размеров пор, величины давления и материала самой мембраны для баромембранных технологий. При электродиализе селективность обеспечивается за счет действия силы электрического тока. К преимуществам использования мембран можно отнести высокое качество очистки, минимальный расход реагентов на собственные нужды установки, компактность, низкие энергетические затраты, надежность. Свойства мембран зависят от материала, что позволяет подобрать оптимальное решение для технологической ситуации.

Сравнение показателей селективности по ионам, содержащимся в отработанном растворе, мембран обратного осмоса и нанофильтрации приведено в таблице.

Сравнение селективности по ионам

Ион	Обратный осмос, %	Нанофильтрация, %
Кальций Ca^{2+}	99	70—88
Магний Mg^{2+}	99	90—96
Натрий Na^+	99	60—65
Хлорид Cl^-	99	60—70

Селективность мембран нанофильтрации по двухвалентным ионам значительно выше, чем по одновалентным, что позволяет проводить разделение раствора. В ряде исследований авторы [20, 21] изучали особенности разделения моно- и двухвалентных ионов при высокой концентрации хлорида натрия при помощи мембранных технологий, определяли селективность и эффективность.

Применение обратного осмоса для очистки сточных вод ионообменных установок не нашло широкого применения. Селективность мембран по всем компонентам раствора одинакова и составляет 99 %. В ре-

зультате происходит обессоливание воды с получением еще более концентрированного раствора солей, непригодного для регенерации натрий-катионитовых фильтров. Количество ступеней высоконапорного обратного осмоса для возврата в производство воды и доведения ее до требуемого солесодержания может достигать пяти и более [22]. Такая установка обладает значительными габаритами и потреблением электроэнергии. В результате очистки обратным осмосом происходит восстановление обессоленной воды для возврата в производство с образованием высококонцентрированного концентрата, подлежащего утилизации. Для восстановления отработанных регенерационных растворов применение обратного осмоса нецелесообразно.

Нанофильтрацию традиционно используют для очистки воды от солей жесткости и тяжелых металлов, высокомолекулярных органических соединений, для концентрирования растворов в промышленности. Мембраны наиболее эффективно отделяют двухвалентные ионы, селективность по магнию и кальцию достигает 90 %. Удаление солей жесткости при помощи нанофильтрации из отработанного раствора хлорида натрия делают возможным его повторное применение.

В работах [23, 24] авторы использовали модельный раствор стока ионообменной установки солесодержанием 6 г/л с соотношением концентраций ионов кальция к натрию 1:3, в установке использовали полиамидные нанофильтрационные мембраны низкого давления. По результатам исследования авторами [23, 24] была описана технология разделения растворов в несколько этапов с разбавлением полученного концентрата деионизованной водой и возвращением в голову установки для более полного разделения за счет максимального использования селективности мембраны.

Керамические мембраны, обладающие более высокой химической стойкостью, при разделении ионообменных стоков с загрязнением гуминовыми кислотами отделили более 97 % загрязнений с пропуском хлорида натрия 95 %. При этом по сравнению с полимерными мембранами образование осадка на мембранах было незначительно [25].

Также использование электродиализа для избирательного переноса ионов натрия, магния и кальция в смесях растворов их хлоридов при различных плотностях тока дает возможность разделения растворов. Селективность мембран при электродиализе обеспечивается за счет электрического тока. Традиционно метод использовали для опреснения воды с 60-х гг. XX века. Важным результатом модификации мембран в целях создания избирательно проницаемых ионов была разработана технология, названная одновалентным селективным электродиализом, в результате которой в концентрируемый раствор переносятся только одновалентные ионы, такие, как ионы натрия и хлора, а перенос двухвалентных ионов, например, ионов кальция и магния, исключается. Разделение потока происходит при помощи разности потенциалов, вызывающей перенос ионов. Общая схема установки (рис. 3.)

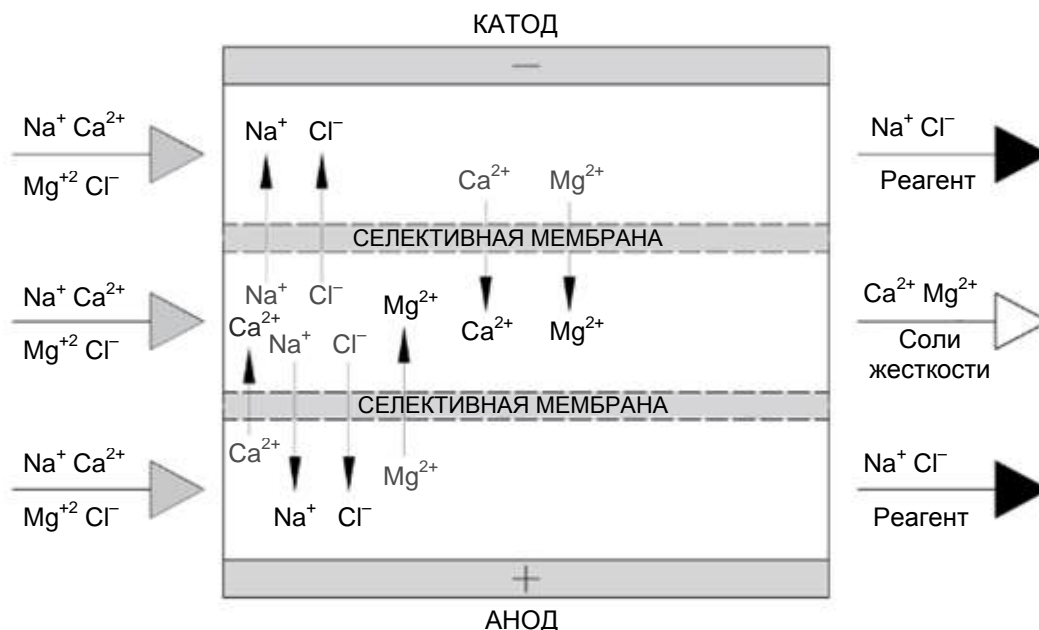


Рис. 3 Схема установки одновалентного селективного электродиализа

В результате образуется поток концентрата в виде раствора хлорида натрия, используемого для повторной регенерации, и поток дилуата с удаляемыми солями жесткости. Ионообменные мембраны отличаются повышенной стойкостью к растворам высокой солёности, что делает их перспективным методом переработки высокоминерализованных стоков. [26]. Имеются преимущества у электродиализа и с точки зрения воздействия на окружающую среду: метод является безреагентным и отличается низким потреблением электроэнергии [27].

Технологии нанофильтрации и электродиализа показывают схожие параметры разделения растворов из двухвалентных и одновалентных ионов [28]. Объединение технологий электродиализа для разделения отработанного раствора хлорида натрия с его последующим мембранным концентрированием позволяет с минимальным потреблением реагентов на собственные нужды объединенной установки получить солевой раствор, пригодный для регенерации, и чистую воду [29].

Важным параметром для восстановленного регенерационного раствора является остаточная жесткость. Повторное использование отработанного раствора хлорида натрия без восстановления для регенерации первой ступени катионирования при двухступенчатой установке показало отсутствие резкого снижения качества умягченной воды в присутствии остаточной жесткости регенерационного раствора [30, 31].

Заключение

Повышение требований к качеству сбрасываемых сточных вод, сложность в удалении хлоридов и их негативное влияние на биологическую очистку привело к необходимости радикального сокращения сброса отработанного раствора хлорида натрия. Высокая энергоёмкость и необходимость утилизации

полученных отходов без возврата в производство ценных компонентов, сопутствующих выпарной технологии "нулевого сброса", привели к необходимости разработки замкнутого цикла очистки отработанного раствора с возвратом в производство очищенного регенерационного раствора и воды. Применение селективных методов разделения двухвалентных ионов жесткости от одновалентных ионов натрия и хлора является наиболее перспективным за счет минимального потребления реагентов и отсутствия образования осадков с необходимостью их последующей утилизации. Кроме того, использование оборотного регенерационного раствора решает проблему сброса высокоминерализованных стоков, а также снижает затраты на изготовление свежего регенерационного раствора. Окончательный выбор метода восстановления хлорида натрия осуществляется с помощью технико-экономического сравнения, возможно также комбинирование методов в целях максимального повторного использования восстановленного регенерационного раствора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селицкий Г. А., Галкин Ю. А. Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов методом натрий-катионирования // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2008. № 5(5). С. 27—31.
2. Акимов А. М., Котельникова С. А. Специфика интегрированных мембранных технологий в сочетании с ионным обменом для целей водоподготовки // Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4. № 3. С. 86—91.
3. Первов А. Г., Бондаренко В. И., Жабин Г. Г. Применение комбинированных систем обратного осмоса и ионного обмена для подготовки питательной воды паровых котлов // Энергосбережение и водоподготовка. 2004. № 5(32). С. 25—27.
4. Ларин Б. М., Юрчевский Е. Б. Проблемы реализации ионообменных и мембранных технологий обработки воды в энергетике // Теплоэнергетика. 2019. № 10. С. 66—73.
5. Беликов С. Е. Водоподготовка: Справочник для профессионалов. — М.: Аква-Терм, 2007. — 240 с.
6. Зройчиков Н. А., Лукин С. В., Артюшин А. В. и др. Натрий-катионирование с регенерацией ионной подземным рассолом // Теплоэнергетика. 1998. № 7. С. 52—54.

7. Лифшиц О. В. Справочник по водоподготовке котельных установок. Изд. 2, перераб. и доп. — М.: "Энергия", 1976. — 288 с.
8. Тихонов И. А. Сточные воды установки Na-катионирования воды. Состав. Способ утилизации // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2021. № 8. С. 12—15.
9. Алексеев Е. В. Загрязняющие вещества в качестве реагентов для очистки сточных вод // Вода: химия и экология. 2012. № 4(46). С. 82—87.
10. Lorenzo-Toja Y., Vazquez-Rowe I., Amores M. et al. Benchmarking wastewater treatment plants under an eco-efficiency perspective // Science of The Total Environment. 2016. V. 566. P. 468—479. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.110.
11. СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания". Введ. 2021-01-29. — М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2021.
12. Постановление Правительства РФ от 22 мая 2020 г. № 728 "Об утверждении Правил осуществления контроля состава и свойств сточных вод" и о внесении изменений и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации.
13. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. № 552 "Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения" (с изменениями и дополнениями).
14. Liu Z., Haddad M., Sauve S., Barbeau B. Alleviating the burden of ion exchange brine in water treatment: From operational strategies to brine management // Water Research. 2021. V. 205(5). P. 117728. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117728.
15. Селиванов О. Г., Пикалов Е. С., Романова Л. Н. Оценка эффективности противоточных схем работы натрий-катионитовых фильтров в процессах умягчения воды // Инженерный вестник Дона. 2022. № 7(91). С. 318—330.
16. Александрова Л. Ю., Банайтис Р. П. Исследование термо-реагентного метода восстановления регенерационных растворов Na-катионитовых фильтров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2022. Т. 24. № 2(106). С. 105—112.
17. Алексеев Е. В. Соли жесткости в сточных водах — загрязняющие вещества или реагенты для их очистки // Безопасность жизнедеятельности. 2012. № 7(139). С. 26—31.
18. Мазитов Л. А. Способ обработки отработанных регенерационных растворов соли натрий-катионитовых фильтров. Патент России 2471556 С1 МПК B01J49/00; C02F1/42. Заявка № 2011133538/05 от 11.08.2011; опубл. 10.01.2013.
19. Марченко О. В., Колесников В. А., Кисиленко П. Н. Регенерация растворов NaCl, используемых в ионообменной технологии умягчения природных и технических вод // Химическая промышленность сегодня. 2009. № 6. С. 17—20.
20. Гребень В. П., Родзик И. Г. Избирательность переноса через сульфокатионитовую мембрану ионов натрия, магния и кальция в смесях растворов их хлоридов // Электрохимия. 2005. Т. 41. № 8. С. 997—1000.
21. Аржанова Е. Б., Рябчиков Б. Е., Пантелеев А. А. и др. Определение эффективности разделения моно и двухвалентных ионов нанофильтрацией в хлоридных растворах высоких концентраций // Перспективные материалы. 2011. № 10. С. 227—232.
22. Абоносимов О. А. Исследование кинетических характеристик мембран обратноосмотического разделения растворов химво-доочистки // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2016. Т. 21. № 1. С. 306—309.
23. Первов А. Г., Спицов Д. В. Разделение высокоминерализованных стоков установок ионного обмена с применением нано-фильтрационных мембран // Системные технологии. 2021. № 2(39). С. 35—55.
24. Первов А. Г., Спицов Д. В., Говорова Ж. М. Разделение высокоминерализованных стоков с применением нанофильтрационных мембран для упрощения их последующей утилизации // Мембраны и мембранные технологии. 2021. Т. 11. № 5. С. 345—359.
25. Caltran I., Rietveld L., Shorney-Darby H., Heijman S. Separating NOM from salts in ion exchange brine with ceramic nanofiltration. // Water Research. 2020. May. V. 179(4). P. 115894. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115894.
26. Rehman D., Ahdab Y., Lienhard J. Monovalent selective electrodialysis: Modelling multi-ionic transport across selective membrane // Water Research. 2021. V. 199. P. 117—171. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117171.
27. Li F., Guo Y., Wang S. Pilot-Scale Selective Electrodialysis for the Separation of Chloride and Sulphate from High-Salinity Wastewater // Membranes. 2022. V. 12. Is. 6. P. 610—626. DOI: 10.3390/membranes12060610.
28. Van der Bruggen B., Koninckx A., Vandecasteele C. Separation of monovalent and divalent ions from aqueous solution by electrodialysis and nanofiltration // Water Research. 2004. V. 38(5). P. 134753. DOI: 10.1016/j.watres.2003.11.008.
29. Haddad M., Bazinet L., Barbeau B. Towards Water, Sodium Chloride and Natural Organic Matter Recovery from Ion Exchange Spent Brine // Membranes. 2021. V. 11. Is. 4. P. 262—275. DOI: 10.3390/membranes11040262.
30. Flodman H., Dvorak B. Brine reuse in ion-exchange softening: salt discharge, hardness leakage, and capacity tradeoffs // Water Environment Research. 2012. V. 84. Is. 6. P. 535—543. DOI: 10.2175/106143012x13373550427354.
31. Синежук И. Б., Зайченко Л. Г. Расчет балансовых схем регенерации натрий-катионитовых фильтров с повторным использованием отработанных регенерационных растворов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2011. № 5(91). С. 15—22.

Methods of recovery of spent regeneration solutions of sodium-cationic filters

A. M. PAVELKOVA

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

This article reviews methods for regenerating spent sodium chloride solution used to regenerate ion exchange filters. Methods to reduce effluent generated and reagents used are presented. Technologies for purification of spent solution from hardness salts allow not only to reduce the volume of discharged wastewater, but also to return sodium chloride to production. Methods to reduce the consumption of reagents used in the solution purification process are analysed.

Keywords: water hardness removal, mineralized effluent, electroflotation, residual hardness, electrodialysis, chlorides, nanofiltration.

Bibliography — 31 references.

Received September 1, 2023

УДК 628.16.0
DOI: 10.52190/2073-2589_2023_4_22
EDN: IHCXOR

Использование осадков сточных вод в качестве субстрата для выращивания энергетических (технических) культур

О. И. РОДЬКИН, д-р биол. наук

Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова
Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь

Т. А. ТАВГЕНЬ

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Б. С. КСЕНОФОНТОВ, д-р техн. наук

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

Рассмотрена возможность утилизации илового осадка в качестве удобрения. Основным видом отходов на очистных сооружениях является избыточный активный ил, который образуется на сооружениях биологической очистки. Прямое использование осадков на основе активного ила в качестве удобрения или субстрата для выращивания сельскохозяйственных культур ограничивается их агрофизическими и агрохимическими характеристиками. Определены показатели: гранулометрический состав, структура, плотность, водно-воздушный режим, химический состав почв (осадков) на содержание элементов минерального питания растений. Установлены зависимости между агрофизическими параметрами техногенных почв, образовавшихся в результате складирования осадков. По содержанию необходимых растениям питательных элементов твердые осадки сточных вод можно отнести к категории высокообеспеченных. Вследствие этого перспективным направлением является производство и использование компостов на основе осадков из первичных отстойников (песок) и вторичных отстойников (активный ил) для выращивания энергетических (технических) культур.

Ключевые слова: осадки сточных вод, иловые площадки, энергетические культуры, анализ почв, торфо-иловые компосты.

Большие объемы образования осадков при физико-химической и биологической очистке сточных вод и многообразие их химического состава требуют их обязательной утилизации на специализированных предприятиях [1—18]. Хозяйственно-бытовые сточные воды и осадки сточных вод обуславливают выделение вредных веществ в атмосферный воздух, а также интенсивное загрязнение почвенных и водных систем. С другой стороны, они содержат значительное количество органических соединений, которые могут быть использованы растениями. Высокое со-

держание загрязнителей в осадках не позволяет применять их в качестве удобрений традиционных сельскохозяйственных культур по санитарно-гигиеническим нормативам.

Цель исследований — анализ химического состава осадков сточных вод, образовавшихся в результате их размещения на иловых площадках.

Задачи исследований:

- анализ и структуризация источников образования осадков сточных вод;
- анализ химического состава осадков сточных вод и оценка условий их хранения на иловых площадках;
- оценка аккумуляции основных биогенных элементов (азота и фосфора) в биомассе растений при различных уровнях минерального питания.

Условия и методы проведения эксперимента

В настоящее время в Республике Беларусь эксплуатируется более 200 сооружений биологической

Родькин Олег Иванович, доцент, директор.

E-mail: info@iseu.by

Тавгень Татьяна Анатольевна, старший преподаватель кафедры "Экология".

E-mail: ttavgen@bntu.by

Ксенофонов Борис Семёнович, профессор кафедры "Экология и промышленная безопасность".

E-mail: kbsflot@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2023 г.

© Родькин О. И., Тавгень Т. А., Ксенофонов Б. С., 2023

очистки городских сточных вод различной производительности, а их суммарная мощность в ближайшей перспективе будет только возрастать.

Отбор проб проводили по ГОСТ 28168-89 [5]. Пробы для проведения исследований отбирали непосредственно на иловых площадках очистных сооружения КУПП "Водоканал" г. Барановичи. Пробы отбирали из равноудаленных друг от друга источников, расположенных на одной площадке хранения. Для отбора проб использовали бур с объемом цилиндра 50 см³. Пробы почвы отбирали в 4-кратной повторности, помещали в алюминиевые бьюксы (диаметр 50 мм и высота 40 мм) и транспортировались в лабораторию для дальнейших исследований.

Для проведения исследований были отобраны почвенные образцы с четырех площадок хранения, которые различаются в зависимости от условий происхождения. Для проведения исследований были отобраны 4 образца осадков иловых стоков, которые отправляются на захоронение (складирование) на иловые площадки предприятия.

Процесс образования осадка сточных вод включает ряд технологических этапов.

Образец № 1. Хозяйственно-бытовые и производственные сточные воды по напорным водоводам перекачивают в приемную камеру очистных сооружений, в которую также частично попадают возвратные воды после песковых площадок и фугат от установок механического обезвоживания осадка. Из приемной камеры сточные воды поступают на сооружения механической очистки, решетки, песколовки, первичные отстойники.

Образец № 2. Твердые осадки (кек) пятого года складирования на иловых прудах после предварительной подготовки и обезвоживания.

Одним из простейших сооружений для обезвоживания осадка сточных вод являются иловые площадки. Иловые площадки представляют собой открытые земляные сооружения, состоящие из карт, разделенных ограждающими валиками. По конструкции иловые площадки различаются устройством дренажных устройств. Иловые площадки могут быть выполнены на естественном основании без дренажных устройств, а также с горизонтальными либо вертикальными дренажными устройствами. Для предотвращения фильтрации иловой воды из осадка в грунт, а также в случае высокого уровня грунтовых вод, иловые площадки могут быть устроены на искусственном асфальтобетонном основании. На иловых площадках КУПП "Водоканал" г. Барановичи осуществляется многолетнее хранение обезвоженного осадка (кека), в процессе которого происходит его естественное обезвоживание.

Образец № 3. Твердые осадки, образовавшиеся в трубопроводах городской канализации.

В трубопроводах канализации средних и больших диаметров (от 300 мм и выше), расположенных на проезжих частях улиц города с твердым покрытием, в процессе эксплуатации происходит накопление осадков, препятствующих нормальной работе системы канализации и требующих периодической чистки.

Осадки в трубопроводах состоят из нескольких компонентов:

- продукты жизнедеятельности человека (фекалии, пищевые остатки, часть бытового мусора, вклю-

чая тряпье, салфетки, очистки и другие продукты жизнедеятельности);

- различные включения производственных сточных вод (например, части неорганических масел, опилки, кислоты, щелочи и т. д.);

- осадки поверхностных сточных вод, проникающие через стыки и неплотности в канализационных люках и трубопроводах. Осадки включают в себя: песок, грунт, растительные остатки, масла.

Образец № 4. Твердые осадки, образовавшиеся на песколовках в результате осаждения и после дополнительной сепарации.

Песколовки, предназначены для выделения из сточных вод минеральных примесей, главным образом песка крупностью более 0,25 мм. Удаление песка из сточных вод осуществляется в песколовках с гидравлическим смывом задержанного песка.

Удаление песка, задержанного в секциях песколовок, осуществляется его гидравлическим смывом в приямки. Удаление песка из приямков происходит с помощью гидроэлеваторов, к которым техническая вода подается насосами. На КУПП "Водоканал" г. Барановичи для обработки песка в цеху механической обработки осадка установлены дополнительные сепараторы. В результате сепарации снижается влажность песка на выходе. Кроме того, вследствие самопроизвольной аэрации происходит частичное уменьшение органических соединений в песке. Высокая эффективность сепарации достигается благодаря равномерно возникающему полю течения в резервуаре.

После сепарирования песок загружают в прицепы и вывозят на полигоны хранения.

Для последующего анализа из объединенной пробы выделяли усредненный образец для проведения дальнейших исследований:

- *гранулометрический состав* по ГОСТ 12536-79 [6];

- *структура почвы* согласно РД 52.33.219-2002 [7];

- *плотность почвы* определяли согласно РД 52.33.219-2002;

- *влажность почвы* — использовали весовой метод (ГОСТ 28268-89) [8].

- *определение общего фосфора и калия* проводили фотометрическим методом согласно ГОСТ [9, 10];

- *массовую долю общего азота* определяли по методу Кьельдаля (ГОСТ 26715-85) на фотоэлектрокалориметре [11].

Результаты исследований

Оценка агрофизических показателей осадков сточных вод

Структура

Структура почвы это различные по величине и форме агрегаты, в которых склеены почвенные частицы. Свойство почвы распадаться на агрегаты соответственно называется структурностью. Структурные почвы, как правило, характеризуются хорошими водно-физическими свойствами и плодородием.

Структура почвы — это важный показатель физического состояния плодородной почвы. Она определяет благоприятное для растений строение пахотного слоя почвы, ее водные, физико-механические и технологические свойства и характеристики.

По классификации С. А. Захарова [12], по форме различают следующие типы структуры почвы: глыбистую, комковатую, ореховатую, зернистую, столбчатую, призматическую, плитчатую, пластинчатую, листоватую, чешуйчатую.

В земледелии принята следующая классификация структурных агрегатов по величине: глыбистая структура — комки более 10 мм, макроструктура — от 0,25 до 10 мм, микроструктура — менее 0,25 мм.

Структура почвы непосредственно связана с ее плодородием, то есть возможностью обеспечить растения всем необходимым для нормальной жизнедеятельности (влаги, воздушный режим, элементы питания растений и т. д.). Соответственно плодородные почвы как правило имеют хорошую структурность. Например, черноземные почвы характеризуются отчетливо выраженной зернистой структурой, серые лесные почвы — ореховатой. Хорошо окультуренные дерново-подзолистые почвы приобретают комковатую структуру, а неокультуренные подзолы отличаются плитчатой и листоватой.

С точки зрения плодородия почв оптимальной является мелкокомковатая и зернистая структура с размером частиц примерно 0,25—10 мм. Одновременно эта структура должна быть пористой и водопрочной. Почвы такой структуры обладают благоприятным комплексом водно-воздушных свойств.

Осадки сточных вод, которые складываются на иловых площадках не являются природными почвами и относятся к техногенному типу. Техногенные почвы являются составной частью класса антропогенных почв и к ним относятся почвы, находящиеся в зонах воздействия предприятий топливно-энергетического комплекса, а также почвы, образовавшиеся в результате размещения промышленных отходов и осадков сточных вод. Осадки сточных вод не являются собственно почвами, и к ним больше подходит термин "почво-подобные образования" [12].

Тем не менее, если использовать их для создания фитоценозов, то необходимо оценивать потенциал плодородия таких образований по тем же критериям, как и для обычных природных почв. Все техногенные почвы (осадки сточных вод) являются плохо структурированными. По форме они относятся скорее к плитчатому или пластинчатому типу структуры.

По степени выраженности структуры техногенные почвы, которые складываются на иловых площадках предприятия, можно классифицировать следующим образом.

- Твердые осадки (кек), которые складывают после предварительной подготовки и обезвоживания, можно отнести к почвам с неопределенной структурой. Комки и глыбы с большим трудом разламываются на мелкие бесформенные части, не имеют ясно выраженных граней их поверхность неровная и шероховатая. Срок складирования (один год или пять

лет) не степени выраженности структуры таких техногенных почв не сказывался.

Твердые осадки, образовавшиеся на песколовках в результате осаждения и после дополнительной сепарации, можно отнести к бесструктурным почвам. Они легко распадаются на мелкие частицы и в основном представлены песком.

Твердые осадки, образовавшиеся в трубопроводах городской канализации, состоят из следующих основных компонентов: продукты жизнедеятельности, осадки производственных сточных вод, осадки поверхностных сточных вод.

Выделить какую-то одну структуру для данной категории осадков с учетом их гетерогенности не представляется возможным. В связи с этим, осадки, образовавшиеся в трубопроводах городской канализации, следует отнести к почвам с неопределенной структурой.

Гранулометрический состав почв

Отдельные частицы (гранулы) называются механическими элементами. Близкие по размерам механические элементы объединяют в группы фракций [13]. Соотношение частиц различной крупности, выраженное в процентах, называется гранулометрическим (механическим) составом почвы. При гранулометрическом анализе вначале отделяют на сите частицы крупнее 1 см, относящиеся к каменистой части (скелету почвы). Преобладание в составе почвы той или иной фракции определяет ее свойства. Песчаные фракции имеют высокую водопроницаемость и не обладают способностью удерживать влагу. По мере уменьшения размеров песчаных гранул заметно возрастает водоудерживающая способность и увеличивается высота подъема воды по капиллярам. При увлажнении песок не набухает, при сминании рассыпается (не обладает пластичностью и липкостью). Пылеватые фракции медленно впитывают влагу, хорошо ее удерживают, при увлажнении значительно набухают. Пластичность и липкость у них слабо выражены. Молекулярная влагоемкость, набухание, пластичность резко возрастают у частиц размером менее 0,1 мм.

Результаты анализа почв с иловых площадок на гранулометрический состав представлены в табл. 1.

Наиболее агрономически ценной является мелкокомковатая структура с комочками диаметром от 1 до 10 мм. Как следует из полученных результатов, для осадков (кека) первого года хранения содержание таких гранул составляет более 50 %, а для осадков (кека) пятого года хранения — около 40 %. Соответственно, для осадков (кека) первого года хранения более 40 % гранул имеют размер менее 1 мм. Для осадков (кека) пятого года хранения — более 50 %. Таким образом, можно констатировать, что твердые осадки (кек) как первого, так и пятого года складирования на иловых площадках после предварительной подготовки и обезвоживания являются достаточно структурными по гранулометрическому составу. При этом со временем хранения структурность осадков снижается.

Таблица 1

Результаты анализа гранулометрического состава твердых осадков, складываемых на иловых площадках хранения очистных сооружений

Участок отбора пробы	Процент просеивания пробы через ячейки размера, мм					
	более 10	10—5	5—2	2—1	1—0,5	Менее 0,5
Осадки (кек) первого года хранения	3,71	15,34	22,89	13,44	7,78	35,93
	3,53	17,62	25,04	13,45	6,56	32,9
	3,62	16,48	23,96	13,44	7,17	34,41
	3,61	16,47	23,95	13,43	7,16	34,39
Осадки (кек) пятого года хранения		5,38	19,34	17,75	17,51	39,45
		3,31	18,34	17,09	18,15	43,09
	0	4,34	18,84	17,42	17,83	41,27
	0	4,33	18,80	17,38	17,79	41,18
Осадки городской канализации	3,31	19,75	53,76	14,83	3,66	3,78
	7,93	26,15	50,02	11,56	2,46	0,98
	5,62	22,95	51,89	13,19	3,06	2,38
	5,61	22,93	51,85	13,18	3,05	2,37
Осадки песколовки после сепарации		0,50	9,28	13,01	15,25	62,20
		3,31	9,15	12,26	14,18	60,99
	0	1,90	9,21	12,63	14,71	61,59
	0	1,90	9,19	12,61	14,68	61,47

Для твердых осадков, образовавшихся в результате осадения в системе городской канализации без дополнительной подготовки и осадения, характерно наличие значительной доли фракции размером свыше 10 мм (4—8 %). Для обычных почв такая фракция, как правило, представлена камнями. Для осадков это показывает наличие значительной доли мусора (бытовых отходов). Доля гранул размером менее 0,5 мм также не превышает 10 %. Основная доля гранул приходится на фракцию размером от 1 до 10 мм.

Твердые осадки, образовавшиеся на песколовках в результате осадения и после дополнительной сепарации, закономерно характеризуются высокой долей мелкой фракции менее 0,5 мм (свыше 60 %). Соответственно такие осадки и потенциально образующиеся на их основе почвы являются плохо структурированными.

Характеристика плотности твердых осадков представлена в табл. 2.

Таблица 2

Результаты анализа плотности твердых осадков складываемых на иловых площадках хранения очистных сооружений

№ пробы	Фактическое значение для площадки, г/см ³			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
1	0,425	0,424	1,216	0,248
2	0,847	0,443	1,050	0,189
3	0,368	0,485	1,173	0,260
4	0,457	0,428	1,253	0,150
Среднее	0,5247	0,4453	1,1732	0,2122

Как следует из представленных в таблице данных, наиболее высокая плотность (более 1 мг/см³) характерна для твердых осадков на третьей площадке хранения, то есть образовавшихся в результате осадения в системе городской канализации. Для твердых осадков складирования на иловых площадках после предварительной подготовки и обезвоживания (кека) характерна средняя плотность. При этом

следует отметить, что с течением времени хранения плотность несколько снижается. Низкая плотность характерна для твердых осадков, образовавшихся на песколовках в результате осадения и после дополнительной сепарации. Это вполне объяснимый факт, так как основная фракция для осадков данного типа приходится на гранулы с размером менее 0,5 мм. Такой размер больше соответствует пыли.

Влажность

Результаты анализа влажности твердых осадков с иловых площадок хранения представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты анализа влажности твердых осадков, складываемых на иловых площадках хранения очистных сооружений

№ пробы	Фактическое значение для площадки, %			
	№1	№ 2	№ 3	№ 4
1	53,5058	46,8175	157,8778	10,3782
2	34,6235	51,2623	237,9894	25,2761
3	91,4859	54,1409	120,8589	11,2284
4	60,2709	57,4497	173,6351	5,10774
Среднее	59,9715	52,4176	172,59032	12,99767

Как видно из представленных в таблице данных, наиболее высокая влажность характерна для твердых осадков на третьей площадке хранения, то есть образовавшихся в результате осадения в системе городской канализации. Эти осадки являются свежескладываемыми, они не подвергались дополнительной обработке или осадению и поэтому были сильно насыщены влагой на момент отбора проб. Для твердых осадков складирования на иловых площадках после предварительной подготовки и обезвоживания (кека) характерна средняя влажность, которая с течением времени хранения закономерно снижается. Самая низкая влажность характерна для твердых осадков, образовавшихся на песколовках в результате осадения и после дополнительной сепарации.

Анализ химического состава осадков сточных вод на содержание элементов минерального питания

Для нормального роста и развития растениям необходим ряд химических элементов, которые они аккумулируют из почвы. Содержание химических элементов, необходимых для питания растений, является одним из важнейших показателей плодородия почвы.

По степени важности питательных элементов для растения их принято разделять на две группы. В группу макроэлементов входят: кислород, азот, фосфор, калий, кальций, магний. Из них основными или необходимыми элементами питания растений являются азот, фосфор и калий [14]. Азот и фосфор также относятся к категории биогенных элементов, которые являются главными в составе тканей живых организмов.

Усредненные результаты содержания основных элементов питания в почвах иловых площадок представлены в табл. 4.

Образец № 1 — это твердые осадки (кек) первого, второго года складирования на иловых прудах после предварительной подготовки и обезвоживания. Массовая доля общего азота в этих почвенных образцах составляет 1,35 % в расчете на сухое вещество почв. В верхних гумусовых горизонтах почв общее содержание азота может колебаться от 0,03 % в бедных песчаных почвах до 2,5—3,0 % в торфе [15].

Таким образом, можно констатировать, что содержание общего азота в твердых осадках соответствует высокому уровню. Например, в богатых гумусом черноземах величины общего азота составляют 0,4—0,6 %.

Как следует из представленных в таблице данных содержание общего азота в твердых осадках, которые складываются и хранятся на иловых прудах остается достаточно стабильным с течением времени. Более того, в образцах № 2, которые отбирались из твердых осадков (кека) пятого года складирования на иловых прудах после предварительной подготовки и обезвоживания содержание общего азота, также как и общего фосфора несколько увеличилось. Это можно объяснить снижением общей влажности почв в течение пятилетнего периода хранения.

Высокий уровень содержания общего азота также характерен для образца № 3, который отбирался из твердых осадков, образовавшиеся в трубопроводах городской канализации. Это объясняется источника-

ми образования осадков данного вида. Сюда входят такие продукты жизнедеятельности человека как фекалии, пищевые остатки, часть бытового мусора насыщенные макроэлементами.

Самое низкое содержание азота предсказуемо в образце № 4. Этот образец представляет собой твердые осадки, образовавшиеся на песколовках в результате осаждения и после дополнительной сепарации. Содержание общего азота (0,043 %) соответствует содержанию данного элемента на бедных неплодородных песчаных почвах.

Содержание общего фосфора в образце № 1 несколько ниже, чем в образце № 2, то есть в твердых осадках, которые хранились на иловых прудах не менее 5 лет, соответственно 1,34 и 1,86 %. Самое высокое содержание общего фосфора (около 3 %) было в образцах № 3 и минимальное в образцах № 4, то есть в осадках, которые собираются на песколовках.

Содержание общего (валового) фосфора в различных почвах (% от сухой массы) варьируется в довольно широком диапазоне: в дерново-подзолистых почвах — 0,05...0,15; серых лесных 0,10...0,20; черноземах — 0,15...0,30; каштановых почвах — 0,10...0,20. Это означает, что содержание общего фосфора в твердых осадках значительно выше по сравнению с обычными почвами.

Следует учитывать, что валовое содержание фосфора в почве не может служить строгим показателем возможности его использования растениями. Растениям хорошо доступны лишь водорастворимые дигидрофосфаты и в меньшей степени — гидрофосфаты, концентрация которых в почвенном растворе незначительна, так как они постепенно переходят в слаборастворимые фосфаты. Фосфаты, находящиеся в аморфном состоянии, растворимы в слабых кислотах и могут служить источником фосфорного питания растений.

Содержание калия (K_2O) в различных почвах колеблется от 0,5 до 3 % и зависит от механического состава. Больше калия содержится в глинистой фракции почвы. Поэтому тяжелые глинистые и суглинистые почвы богаче калием (2—3 %), чем песчаные и супесчаные (1,52 %). Очень бедные калием, как правило, торфяные почвы (до 0,05 %). На основании результатов исследований можно заключить, что для твердых осадков сточных вод характерно сравнительно невысокое содержание калия. Немного выше этот показатель для твердых осадков, представленных кеком и минимальное содержание имело место для осадков из песколовков.

Таблица 4

Результаты анализа содержания азота, фосфора, калия и влажности твердых осадков, складываемых на иловых площадках хранения очистных сооружений

№ п/п	Наименование определяемого вещества, показателя	Единица измерения	Фактическое значение определяемого вещества, показателя в образцах			
			№1	№ 2	№ 3	№ 4
1	Массовая доля влаги	%	28,7	19,7	64,9	7,2
2	Массовая доля общего азота	% на сухое вещество	1,35	1,47	1,85	0,11
3	Массовая доля общего фосфора	% на сухое вещество	1,34	1,86	3,03	0,32
4	Массовая доля общего калия	% на сухое вещество	0,17	0,16	0,07	0,04

Большой интерес представляют технологии, создающие условия бурного развития микроорганизмов, которые выделяют биогенные вещества — фитонины, подавляющие развитие других микроорганизмов.

Процесс ферментации торфоиловых смесей в удобрение заключается в бурном развитии при благоприятных условиях сначала мезофильных микроорганизмов ($t_{\min} = 10\text{—}15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\max} = 35\text{—}47\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{opt}} = 30\text{—}45\text{ }^{\circ}\text{C}$), а затем термофильных микроорганизмов ($t_{\min} = 40\text{—}45\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\max} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{opt}} = 55\text{—}75\text{ }^{\circ}\text{C}$). При проведении компостирования в условиях принудительной аэрации можно создать условия для преимущественного развития актиномицетов, выделяющих антибиотик *Actinomyces Streptomycine*, которые подавляют многие бактерии, в том числе гнилостные и микробактерии.

Возрастание температуры внутри бурта лишает находящиеся в смеси семена сорняков всхожести и в значительной степени убивает болезнетворную микрофлору, личинки, яйца гельминтов, куколки мух. Время компостирования в буртах может составлять до полугода.

Однако процесс твердофазной ферментации можно ускорить, если хранить бурты под навесом или в помещении, а также перемешиванием компостируемой массы по мере затухания процесса ила устройством усиленной аэрации. Для интенсификации процесса можно использовать селективные культуры микроорганизмов. При этом во внутрь бурта укладывают перфорированные трубы, через которые прогоняют воздух с помощью компрессора.

Для нормального протекания биотермических процессов необходимо соблюдать условия:

- количество сухих веществ — 30...40 %;
- влажность — примерно 70 %;
- соотношение C:N = 20:1...30:1;
- pH среды 6,0—8,0.

При соблюдении этих требований температура внутри бурта поднимается до 55—60 °C и выше вплоть до 70 °C. Через две недели бурт необходимо перемешать для достижения биотермического процесса во всех слоях компостируемой смеси.

Состав компоста на торфяной основе (торфоиловая смесь): доля влаги 70 %; доля фосфора на АСВ не менее 0,5 %.

Чтобы компостируемая масса не замерзала зимой, каждый штабель зимой закладывают в течение возможно короткого времени (1—2 дня) и укрывают слоем торфа толщиной 30 см. Для повышения температуры в бурте в целях более интенсивного проведения биохимических процессов целесообразно использовать солому.

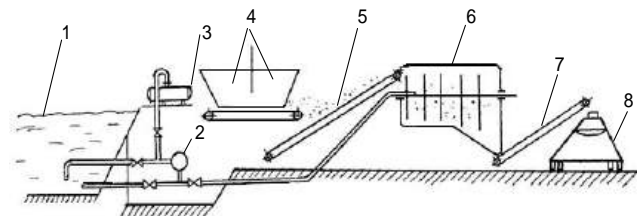
Приготовление торфоилового компоста в полевых условиях можно проводить по следующей технологии (рисунок). Обезвоженный осадок шнековым или винтовым насосом 2 из карты 1 по трубопроводу вместе с аммиачной водой, забираемой из емкости 3, подается в смеситель 6. Отдозированная торфокрошка со слоем минеральных добавок, поступающая из дозаторов 4, ленточным транспортером 5 подается в смеситель 6.

Из смесителя торфоиловая смесь скребковым транспортером 7 подается в бункер-накопитель 8. По мере накопления массы в бункере ее выгружают в

мобильные транспортные средства и укладывают в бурты.

Смесь в буртах на протяжении 30—45 дней несколько раз (через 6—8 дней) перемешивают. Температура в бурте не должна превышать 60—65 °C.

После созревания компост можно использовать в качестве удобрения.



Технологическая схема приготовления удобрений с использованием ила из карт:

- 1 — карта с активным илом; 2 — насос; 3 — емкость для аммиачной воды; 4 — дозаторы минеральных удобрений; 5 — транспортер загрузки; 6 — смеситель; 7 — транспортер выгрузки смеси; 8 — бункер-накопитель

Таким образом, при выполнении ряда условий можно успешно использовать осадки сточных вод в качестве удобрения для выращивания сельскохозяйственных культур [6—18].

Заключение

В процессе исследований была проведена оценка техногенных почв (субстратов), которые расположены на иловых площадках очистных сооружений КУПП "Водоканал" г. Барановичи и отобраны почвенные образцы с четырех площадок хранения, различающихся в зависимости от условий происхождения.

Наиболее ценной для плодородия почв по гранулометрическому составу является мелкокомковатая структура с комочками диаметром от 1 до 10 мм. Как следует из полученных результатов, для осадков (кека) первого года хранения содержание таких гранул составляет более 50 %, а для осадков (кека) пятого года хранения около 40 %. Соответственно, для осадков (кека) первого года хранения более 40 % гранул имеют размер менее 1 мм, для осадков (кека) пятого года хранения более 50 %. Таким образом, со временем хранения структурность твердых осадков по гранулометрическому составу снижается.

Для твердых осадков, образовавшихся в результате осаднения в системе городской канализации без дополнительной подготовки и осаднения, характерно наличие значительной доли фракции размером свыше 10 мм (4—8 %), при этом доля гранул размером менее 0,5 мм также не превышает 10 %. Основная доля гранул приходится на фракцию размером от 1 до 10 мм. Твердые осадки, образовавшиеся на песколовках в результате осаднения и после дополнительной сепарации, характеризуются высокой долей мелкой фракции менее 0,5 мм (свыше 60 %).

Наиболее высокая плотность (более 1 мг/см³) характерна для твердых осадков, образовавшихся в результате осаднения в системе городской канализации. Для твердых осадков складирования на иловых площадках после предварительной подготовки и обезвоживания (кека) характерна средняя плотность, при этом с течением времени хранения плотность

несколько снижается. И низкая плотность характерна для твердых осадков, образовавшихся на песколовах в результате осаждения и после дополнительной сепарации.

Наиболее высокая влажность также характерна для твердых осадков, образовавшихся в результате осаждения в системе городской канализации. Эти осадки были сильно насыщены влагой на момент отбора проб. Для твердых осадков складирования на иловых площадках после предварительной подготовки и обезвоживания характерна средняя влажность, которая с течением времени хранения закономерно снижается. Самая низкая влажность характерна для твердых осадков, образовавшихся на песколовах. По содержанию необходимых растениям питательных элементов твердые осадки сточных вод можно отнести к категории высокообеспеченных поскольку содержание общего азота, фосфора и калия в твердых осадках на всех иловых площадках соответствует высокому уровню.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конон О. А. Основные направления реализации государственной политики в области водоснабжения и канализации. Государственная программа "Комфортное жилье и благоприятная среда" на 2021—2025 годы. Подпрограмма "Чистая вода": матер. Межд. науч.-практ. конф. "Водоснабжение, химия и прикладная экология". — Гомель: БелГУТ, 2021. — 162 с.
2. Baum C. et al. Effects of short rotation coppice with willows and poplar on soil ecology // *Landbauforschung Volkenrode*. 2009. V. 59. P. 183—196.
3. Hammar T., Hansson P.-A., Sundberg C. Climate impact assessment of willow energy from a landscape perspective: a Swedish case study. *GCB Bioenergy*. 2017. V. 9. P. 973—985.
4. Бамбалов Н. Н. и др. Современное состояние и перспективы использования торфяного фонда Беларуси // *Природ. ресурсы*. 2000. № 3. С. 5—15.
5. Почвы. Отбор проб: ГОСТ 28168-89. Введ. РБ с 01.04.90. — Минск: Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1989. — 8 с.
6. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава: ГОСТ 12536-79. Введ. РБ с 17.12.92. — Минск: Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1992. — 28 с.
7. Руководство по определению агрогидрологических свойств почвы РД 52.33.219 — 2002. Режим доступа: https://standartgost.ru/g/%D0%A0%D0%94_52.33.219-2002. Дата доступа: 10.12.2022.
8. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений: ГОСТ 28268-89. Введ. РБ с 17.12.92. — Минск: Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1989. — 12 с.
9. Удобрения органические. Методы определения общего фосфора: ГОСТ 26717-85. Введ. РБ с 17.12.92. — Минск: Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1987. — 16 с.
10. Удобрения органические. Методы определения общего калия: ГОСТ 26718-85. Введ. РБ с 17.12.92. — Минск: Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1987. — 16 с.
11. Удобрения органические. Методы определения общего азота: ГОСТ 26715-85. Введ. РБ с 17.12.92. — Минск: Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1987. — 16 с.
12. Ковалева Г. В., Старожилов В. Т., Дербенцева А. М. и др. Почвы и техногенные поверхностные образования в городских ландшафтах: монография. — Владивосток: Изд-во Дальнаука, 2012. — 159 с.
13. Лапа В. В., Смян Н. И., Богдевич И. М. Справочник агрохимика / Под ред. Лапа В. В. — Минск: Беларус. наука, 2007. — 390 с.
14. Вильдфлуш И. Р. и др. Агрохимия: учебник. Изд. 2, доп. и перераб. — Минск: Ураджай, 2001. — 488 с.
15. Беляев А. Б. Элементы минерального питания в почвах: учеб.-метод. пособие для вузов. — Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2012. — 29 с.
16. Ксенофонтов Б. С. Очистка сточных вод: флотация и сгущение осадков. — М.: Химия, 1992. — 144 с.
17. Ксенофонтов Б. С. Охрана окружающей среды: биотехнологические основы: учеб. пособие. — ИД "Форум". Инфра-М, 2016. — 200 с.
18. Ксенофонтов Б. С. Обработка осадков сточных вод: учебное пособие. — М.: Инфра-М, 2019. — 256 с.

Use of sewage sludge as a substrate for growing energy (technical) crops

O. I. RODKIN

International Sakharov Environmental Institute Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

T. A. TAVGEN

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

B. S. KSENOFONTOV

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The problem of recycling sludge as a fertilizer is considered. The main type of waste at wastewater treatment plants is excess activated sludge, which is formed at biological treatment facilities. The direct use of sludge on an active basis or as a fertilizer or substrate for growing crops is limited by its agrophysical and agrochemical characteristics. In the process of research, such indicators as particle size distribution, structure, density, water-air regime, chemical composition of soils (sediments) for the content of elements of mineral nutrition of plants were determined. The relationships between agrophysical parameters of technogenic soils formed because of sediment storage have been established. Based on the content of nutrients necessary for plants, solid wastewater sludge can be classified as highly abundant. As a result, a promising direction is the production and use of composts based on sediments from primary settling tanks (sand) and secondary settling tanks (activated sludge) for growing energy (industrial) crops.

Keywords: sewage sludge, sludge beds, energy crops, soil analysis, peat-silt composts.

Bibliography — 18 references.

Received September 29, 2023

УДК 628.1

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_4_29

EDN: IRCTXH

Очистка производственных сточных вод предприятия по выпуску строительных изделий

О. В. СИДОРЕНКО, канд. техн. наук; Е. И. ВЯЛКОВА, канд. техн. наук
Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

Производственные сточные воды предприятия по производству строительных изделий содержат высокую концентрацию различных загрязнений. На основании лабораторных исследований была предложена технологическая схема очистки производственных стоков и внедрена опытно-промышленная установка производительностью 0,5 м³/ч. Качество очистки соответствует требованиям к питательной воде парогенераторов. Реализация данной технологии позволяет до 80 % сократить потребление питьевой воды на производственные нужды предприятия.

Ключевые слова: производство строительных изделий, производственные сточные воды, технология очистки воды.

По данным сайта Fabricators.ru, строительная отрасль является одной из ведущих в России, которая насчитывает более 650 крупных предприятий по выпуску строительных материалов и конструкций [1]. Повсеместно отмечается развитие предприятий, рост производства, совершенствование технологий и выпуск новых современных строительных изделий. Однако, наряду с техническим прогрессом в данной сфере, существуют общепризнанные экологические проблемы: загрязнение атмосферы, почвы и источников питьевой воды [2, 3].

Одной из главных причин деградации водных объектов считается сброс неочищенных или плохо очищенных производственных сточных вод (ПСВ). Как правило, на предприятиях по выпуску строительных изделий формируется несколько видов ПСВ: от условно чистых (например, в системах охлаждения оборудования) до высококонцентрированных (например, отработанные химические растворы). Особое качество имеют горячие конденсаты, образующиеся после пропарки строительных изделий (железобетона, кирпича, силикатных и газобетонных блоков и т. п.). Достаточно высокие концентрации стоков отмечают в воде после мойки оборудования и помещений. Неко-

торые данные по составу ПСВ предприятий стройиндустрии приведены в табл. 1 [4].

Ресурсо- и энергосбережение производства строительных материалов связано с альтернативными источниками сырья и материалов [5]. Наиболее рациональными общепризнаны системы бессточного, повторного и оборотного использования воды на промпредприятиях [6–8]. В производстве строительных материалов данные системы вполне приемлемы и экономически оправданы по следующим причинам: невысокие требования к качеству воды на отдельных процессах упрощают и удешевляют технологии водоподготовки; низкое содержание органических веществ в ПСВ позволяет избежать дорогостоящую биологическую очистку и применять физико-химические методы [9–12]; сокращение потребления объемов воды питьевого качества на производственные процессы; себестоимость воды систем повторного и оборотного водоснабжения гораздо ниже, чем питьевой воды; промышленные предприятия имеют возможность разместить станции очистки и водоподготовки на своей территории; вторичные отходы, образующиеся в процессах очистки и водоподготовки, могут являться сырьем для производства продукции на предприятии [13].

Таблица 1

Концентрация загрязнений ПСВ предприятий по производству стройматериалов

Наименование производства	Концентрации в сточных водах, мг/дм ³				
	Взвешенные вещества	Эфирорастворимые вещества	БПК ₅	Сухой остаток	pH
Завод ЖБИ	250—500	10—20	80—120	650—800	7—8,5
Цементный завод	800—1200	50—800	—	—	—
Кирпичный завод	60—1000	15	2—5	100—500	6,5—8
Стекольный завод	830—4465	5—10	20	400—500	7—8

Сидоренко Ольга Владимировна, заведующая кафедрой "Инженерные системы и сооружения".

E-mail: sidorenkoov@tyuiu.ru

Вялкова Елена Игоревна, доцент кафедры "Инженерные системы и сооружения".

E-mail: vyalkova-e@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 14 августа 2023 г.

© Сидоренко О. В., Вялкова Е. И., 2023

В данной статье рассматривается предприятие по выпуску газобетонных и силикатных стеновых блоков, на котором ежедневно образуется около 200 м³/сут горячих конденсатов с повышенным содержанием железа, кремния, нефтепродуктов и других веществ. Кроме этого, в водоем-накопитель поступают отработанные солевые растворы и все поверхностные сточные воды (дождевые, талые и поливочные) с территории предприятия. Общая потребность в чистой воде на производство пара составляет около 600 м³/сут, которая забирается из хозяйственно-питьевого водопровода близлежащего населенного пункта. Была предложена технологическая схема очистки ПСВ до требований повторного водоснабжения парогенераторов, основанная на физико-химических методах, которая подлежала проверке в промышленном масштабе. С этой целью создана опытно-промышленная установка (ОПУ), испытание которой производили на смеси сточных вод в течение месяца.

Материалы и методы

Исходная вода — это конденсаты от производств газобетонных изделий (КОН1) и силикатных изделий (КОН2); вода из накопителя всех видов сточных вод предприятия (ВН); вода из скважины (СКВ); все варианты смеси указанных стоков. Качество исходных сточных вод по протоколам анализов воды, сделанных в течение года, представлено в табл. 2. Все анализы выполнены по стандартным методикам количественного химического анализа (КХА); погрешность измерений не превышает 10 %.

Опытно-промышленная установка (ОПУ) производительностью 0,5 м³/ч предназначена для очистки производственных сточных вод до качества, соответствующего установленным нормативам к питательной воде для парогенераторов (РД 24.032.01-91). ОПУ изготовлена силами предприятия на основе технологи-

ческой схемы, разработанной на кафедре инженерных систем и сооружений Тюменского индустриального университета. Технология очистки производственных сточных вод (ПСВ) основана на физико-химических методах и была предварительно проверена в лабораторных условиях. Основные этапы очистки: преаэрация, окисление, коагуляция и флокуляция, отстаивание, механическое и сорбционное фильтрование, ионный обмен (2 ступени).

Состав установки ОПУ с маркировкой оборудования (рис. 1): приемная емкость-усреднитель (ПЕ) объемом 1000 л; насос подачи воды на очистку (НС1); насос-дозатор (Д1) для подачи в воду раствора окислителя (Ок); преаэратор (ПА) в комплекте с компрессором (КО); насосы-дозаторы (Д2 и Д3) для подачи в воду раствора коагулянта Al₂(SO₄)₃ из емкости раствора реагента (К) и флокулянта ПАА из емкости раствора реагента (Ф) выполнен в виде 2-х врезок в напорный трубопровод; камера хлопьеобразования и предварительного отстаивания (КХО) индивидуального изготовления из стали сварной с антикоррозионным покрытием; резервуар-отстойник (ОТ) — емкость полиэтиленовая объемом 840 л; насос подачи на фильтры (НС2); фильтр механический песчаный (ФП); фильтр сорбционный угольный (ФУ); фильтры ионообменные первой ступени (Н1 и А1); фильтры ионообменные второй ступени (Н2 и А2); сборная емкость очищенной воды (ЕО) — емкость полиэтиленовая объемом 250 л; емкость для промывных растворов (ЕП) — емкость полиэтиленовая объемом 380 л.

Все сливы после ОПУ осуществляются в производственную канализацию КЗ, которая проходит рядом в виде прямоугольного лотка в полу. Принципиальная схема ОПУ представлена на рис. 1, внешний вид — на рис. 2 (а, б).

Технические параметры основного технологического оборудования опытно-промышленной установки внесены в табл. 3.

Таблица 2

Качество исходных производственных сточных вод

Показатель качества	Ед. изм.	Конденсат КОН1	Конденсат КОН2	Накопитель ВН	Скважина СКВ
Температура, <i>T</i>	°С	60—70*	60—70*	4—23	5—7
рН	—	9,79—11,14	10,63—11,6	8,75—10,1	6,76—7,1
Нефтепродукты	мг/дм ³	1,4—1,56	4,0—8,08	0,93—4,5	0,002—0,043
Цветность	градус ПКШ	290—400	30—230	155—354	31—42
Железо	мг/дм ³	2,9	0,3	1,9	3,5—8,6
Мутность	мг/дм ³	37—89	4—43	23,4—97,4	14,5—43,4
Жесткость	°Ж	0,05—0,35	0,25—0,4	1,5—3,0	11,7—16,54
Сухой остаток	мг/дм ³	2338—2643	671—1738	2433—3172	1237—1477
Кремний	мг/дм ³	≥ 16	≥ 16	≥ 16 (20,3)	≥ 10 (12,8)

* Температура конденсатов принята после частичного охлаждения конденсатов в контуре системы теплоснабжения; начальная температура — 95 °С.

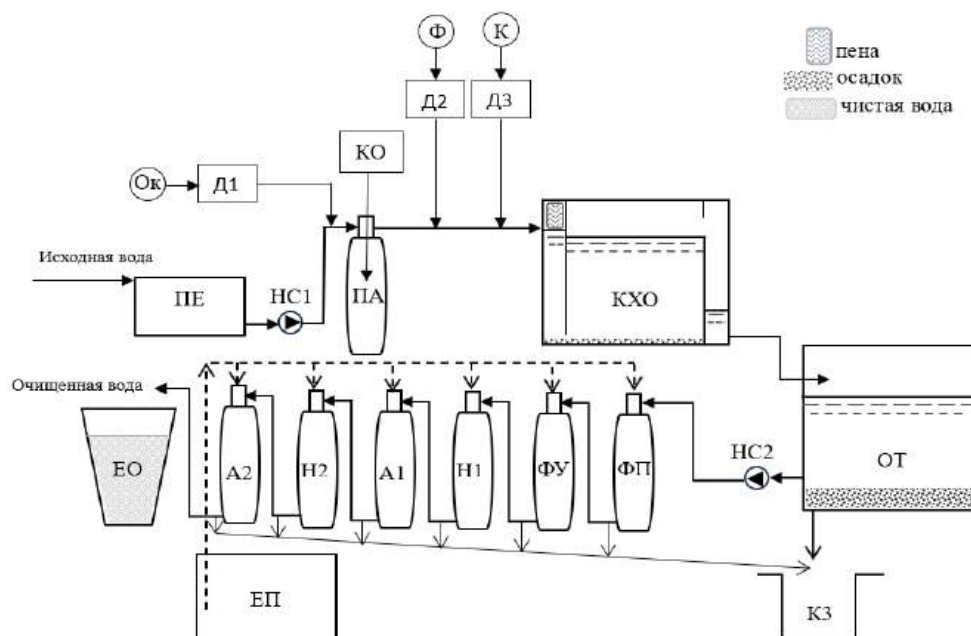


Рис. 1. Принципиальная схема опытно-промышленной установки очистки ПСВ



а



б

Рис. 2. Внешний вид опытно-промышленной установки:

а — оборудование преаэрации, коагуляции и отстаивания; б — оборудование доочистки на фильтрах

Таблица 3

Параметры основного технологического оборудования ОПУ

Наименование сооружения	Код	Назначение	Технологические параметры
Преаэратор	ПА	Предварительное насыщение ПСВ сжатым воздухом, интенсификация окисления после добавления окислителя	Время обработки 20 мин, интенсивность аэрации — 0,5—1 м ³ воздуха на 1 м ³ воды
Камера хлопьеобразования	КХО	Образование хлопьев после добавления коагулянта и флокулянта, удаление пены	Время обработки — 40 мин
Отстойник	ОТ	Отстаивание продуктов реакции после ввода реагентов	Время отстаивания — не менее 60 мин
Фильтр механический песчаный	ФП	Механическое фильтрование через слой кварцевого песка в целях удаления взвешенных веществ и твердых примесей	Загрузка фильтра — песок кварцевый, размер гранул 1,8—2,0 мм; скорость — 7—8 м/ч
Фильтр угольный	ФУ	Сорбционное фильтрование через слой активного угля в целях удаления остаточных загрязнений	Загрузка фильтра — уголь активированный БАУ-А, размер гранул 1,5—2,0 мм; скорость — 10—12 м/ч
Фильтры ионообменные 1-й ступени	Н1	Тонкая очистка воды с целью изменения ионного состава воды и удаления растворённых примесей (двухступенчатое химическое обесоливание)	Загрузка фильтра — Lewatit® MonoPlus S108 Н сильнокислотный гелевый катионит для удаления Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺
	А1		Амберлайт IRA96 — слабоосновной анионит для удаления SO ₄ ²⁻ и Cl ⁻
Фильтры ионообменные 2-й ступени	Н2		Lewatit® MonoPlus S108 Н — сильнокислотный гелевый катионит
	А2		Lewatit® MonoPlus М 500 — сильноосновной анионит для обескремнивания

Результаты и обсуждение

Смесь производственных сточных вод из водоема-накопителя ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) поступала в емкость-усреднитель ПЕ, откуда насосом Н1 направлялась в преаэратор ПА. Перед насыщением воды сжатым воздухом в напорный поток дозатором Д1 подавался реагент окислитель (Ок — раствор гипохлорида натрия) в целях снижения содержания органических веществ. Данный вид реагента рекомендовано подавать только при использовании воды из водоема-накопителя, который подпитывается природными водами и содержит высокую цветность. Далее, в напорный трубопровод подают растворы коагулянта и флокулянта, при этом дозы всех реагентов подбирают индивидуально. После прохождения этапов хлопьеобразования (КХО) и отстаивания (ОТ) вода подвергается механическому (ФП) и сорбционному (ФУ) фильтрованию. На последнем этапе доочистки установлены две ступени ионного обмена (Н1, А1, Н2, А2) в целях умягчения воды, снижения общей минерализации и удаления кремния [13, 14].

Для контроля показателей качества воды на отдельных этапах ОПУ произведён отбор проб: на входе (0), после камеры хлопьеобразования и первичного отстаивания (1), после механической и сорбционной очистки (2), после первой ступени ионообменной очистки (3), после второй ступени ионообменной

очистки (4). В табл. 4 представлены результаты измерения pH, цветности, мутности, жесткости и щелочности по движению ПСВ в установке.

На рис. 3 и рис. 4 представлено поэтапное изменение pH, жёсткости, цветности и мутности в процессе очистки ПСВ.

Результаты КХА показали, что pH воды (рис. 3) на этапе предварительной очистки понижается, что связано с использованием коагулянта сернокислого алюминия. Далее, в результате ОН-анионирования (1 и 2 ступени), происходит повышение pH воды до 7,8. В целом, pH очищаемой воды на выходе не превышает значений, установленных нормативами, а именно в РД 24.032.01-91 для питательной воды парогенераторов.

Как видно на графике (рис. 3), жесткость воды после этапов фильтрования несколько возрастает (на 1—1,5 °Ж). Это связано с некоторым вымыванием микрочастиц минеральной загрузки песчаного и угольного фильтров. Далее, на этапе первой ступени ионного обмена (после фильтра А1) эффективность очистки по ионам жесткости существенно растет (на 95—96 %), а на второй ступени (после фильтра А2) жесткость снижается практически до нуля. В технологии подготовки пара жесткость воды является одним из основных показателей, от которого зависит КПД и износ оборудования [15].

Таблица 4

Изменение показателей качества воды на этапах очистки

№ этапа: место взятия пробы	Показатели качества воды					
	pH	Цветность, градус	Мутность, мг/дм ³	Жесткость, °Ж	Сухой остаток*, мг/дм ³	Кремний*, мг/дм ³
На входе	9,23 ± 0,05	209,33 ± 2,19	58,29 ± 1,32	2,40 ± 0,07	1143 ± 35	24,7 ± 1,2
После ОТ	7,84 ± 0,15	110,71 ± 0,27	31,44 ± 0,2	2,7 ± 0,25	—	—
После ФУ	6,20 ± 0,30	39,42 ± 0,30	118,32 ± 0,32	3,83 ± 0,07	—	15,5 ± 1,1
После А1	7,37 ± 0,05	43,72 ± 0,4	0,41 ± 0,05	0,1 ± 0,01	—	5,93 ± 0,45
На после А2	7,77 ± 0,02	10,00 ± 0,12	0,29 ± 0,01	≈ 0	70 ± 5,3	1—2
Норма по РД	9,1 ± 1	нет	нет	0,003	нет	0,05
Вода питьевая	7,6	1,9	0,58	8	164	13,9

*По результатам лабораторного моделирования

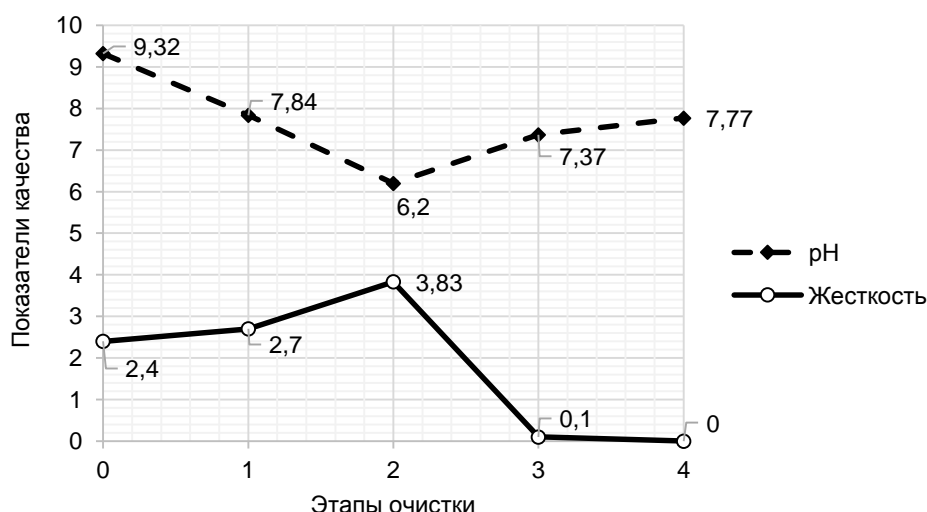


Рис. 3. Изменение pH и жесткости (°Ж) на этапах очистки ПСВ

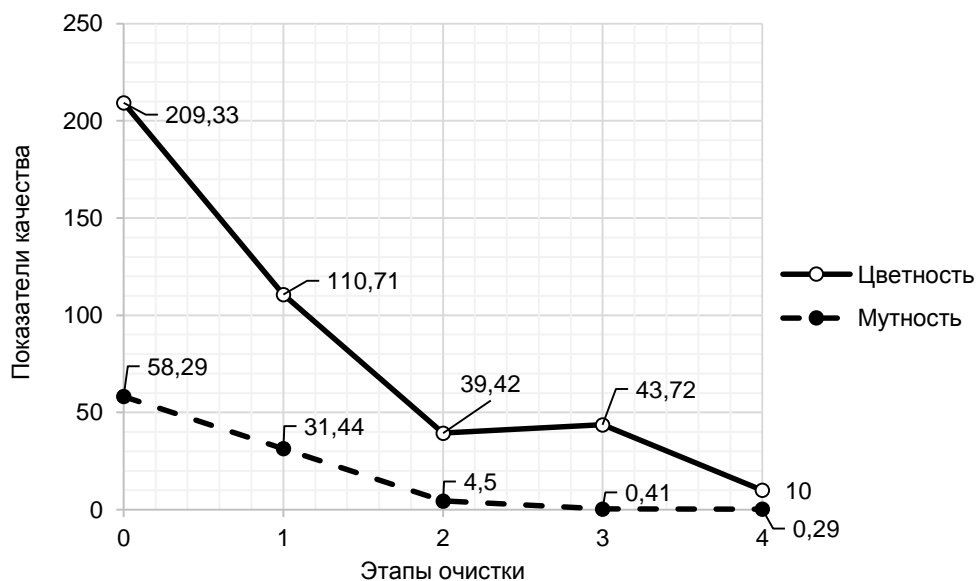


Рис. 4. Изменение цветности (градус) и мутности (мг/дм³) на этапах очистки ПСВ

Цветность исследуемой воде придают гуминовые вещества и соединения железа. Определено, что на ОПУ цветность снижается после окисления и коагуляции на 50 % (рис. 4), и далее, после механического и сорбционного фильтра — на 81,1 %. В процессе очистки ПСВ также устраняется мутность, обусловленная присутствием нерастворимых примесей. Общий эффект очистки ПСВ по цветности после фильтра А2 составил 95 %, по мутности — 99 %.

Минерализация и кремний успешно удаляются из воды в результате ионного обмена: сухой остаток снижается на 93 %, кремний — на 92 %. Хотя концентрация кремния не достигает нормы по РД 24.032.01-91 (0,05 мг/дм³), но остаточное содержание гораздо меньше, чем в питьевой воде, используемой в настоящий момент на предприятии.

Выводы

Испытания опытно-промышленной установки на смеси сточных вод предприятия по выпуску строительных изделий показали, что требуемое качество воды для парогенераторов возможно достичь с использованием физико-химических методов: преаэрации, коагуляции, отстаивания, этапов фильтрования и ионного обмена. Внедрение данной технологии на производстве строительных изделий позволит сократить потребление чистой питьевой воды на 80 % и более. Опытно-промышленная установка может послужить прототипом полномасштабной станции очистки, которая обеспечит повторное использование сточных вод и экономию водных ресурсов на предприятии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fabricators.ru: Заводы строительных материалов: [Электронный ресурс]. URL: <https://fabricators.ru/proizvodstvo/zavody-stroitelnyh-materialov>.

2. Авраменко А. А., Сагачев Е. М. Проблемы экологии и природопользования в строительной отрасли // Молодой ученый. 2018. № 25(211). С. 4—6.

3. Цгоев Т. Ф., Теблов Р. А., Дзлиев Г. У. Обеспечение экологической безопасности при строительстве промышленных и гражданских объектов // Современное строительство и архитектура. 2018. № 1(09). С. 20—24.

4. СЭВ ВНИИ ВОДГЕО. Укрупненные нормы водопотребления и водоотведения для различных отраслей промышленности. — М.: Стройиздат, 1982.

5. Борисова О. Н. Ресурсосбережение в строительстве — стимул экологического Прогресса // Экология промышленного производства. 2020. № 1. С. 39—42.

6. Усов Б. А., Осольникова Г. Э., Акимов С. Ю. Экология и производство строительных материалов // Системные технологии. 2015. № 17. С. 84—105.

7. Пугин К. Г., Юшков Б. С. Ресурсосберегающие технологии и снижение экологической нагрузки при производстве бетонных изделий с использованием доменных шлаков // Технологии бетонов. 2012. № 1/2. С. 52—55.

8. Reddy K. R., Kandou V., Havrelock R. et al. Reuse of treated wastewater: drivers, regulations, technologies, case studies, and greater chicao area experiences // Sustainability. 2023. V. 15. № 9. P. 7495. <https://doi.org/10.3390/su15097495>.

9. Choun C., Bun S., Ham P., Chan R. Removal of turbidity, color, and oil using aerated electrocoagulation-flotation reactor // AIP Conference Proceedings. 2023. V. 2785 № 1. P. 030044. DOI: 10.1063/5.0148136.

10. Лобачева Г. К., Платонов М. Ю., Смирнов А. А. и др. Обработка промышленных стоков, содержащих сож, флокулянтами — источник получения масел и способ решения экологических проблем // Альманах. 2011. С. 53—60.

11. Владимиров С. Н. Проблемы переработки отходов строительной индустрии // Системные технологии. 2016. № 2(19). С. 101—105.

12. Пригун И. В., Краснов М. С. Технологии очистки воды от кремния. проблемы и особенности // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2009. № 9. С. 22—28.

13. Обухова М. В., Сидоренко О. В., Вялкова Е. И. Экспериментальная оценка методов обработки отходов очистки производственных сточных вод предприятий силикатных и газобетонных изделий // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2022. № 3(22). С. 75—83.

14. Спицов Д. В., Павелкова А. М. Особенности применения и эксплуатации установок ионного обмена // Экология промышленного производства. 2023. № 2. С. 10—13.

15. Филимонова А. А., Чичилов А. А., Чичирова Н. Д. Химия водной среды в теплоэнергетике: учеб. пособие. — Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2020. — 121 с.

Industrial wastewater treatment of a building products enterprise

O. V. SIDORENKO, E. I. VIALKOVA
Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

Industrial wastewater from the building products enterprise contains a high concentration of the different pollutants. Based on the laboratory studies, a technological scheme for the treatment of the industrial wastewater was proposed, and a pilot plant with a capacity of 0.5 m³/h was introduced. The quality of the treatment corresponds the nutritious water requirements of the steam generators. The implementation of this technology makes it possible to reduce the drinking water consumption for the production needs of the enterprise by up to 80 %.

Keywords: production of the building products, industrial wastewater, water purification technology.

Bibliography — 15 references.

Received August 14, 2023

УДК 628.196:628.16.094.413.094.3
DOI: 10.52190/2073-2589_2023_4_35
EDN: IRPTQV

Технологические решения для предотвращения образования хлорорганических соединений в процессе водоподготовки

С. Н. ШЕЛЕСТ, канд. техн. наук; Ю. В. КОРЧЕВСКАЯ, канд. с.-х. наук;
И. А. ТРОЦЕНКО, канд. с.-х. наук

Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, г. Омск, Россия

С. В. ВОЛЫНКИНА
АО «ОмскВодоканал», г. Омск, Россия

Рассмотрены некоторые методы удаления хлорорганических соединений в питьевой воде, в связи с тем, что в настоящее время вводятся новые гигиенические нормативы, ужесточающие требования по предельно допустимым концентрациям веществ и соединений, в частности снизилось ПДК хлороформа в питьевой воде в 3,3 раза. Представлены результаты эксперимента с использованием реагентной очистки воды смешанными коагулянтами. При проведении испытаний обнаружено, что применение смешанного коагулянта "Базиса М" (на основе хлорида железа и сульфата алюминия) снижает содержание хлорорганических соединений в питьевой воде.

Ключевые слова: водоподготовка, хлорорганические соединения в питьевой воде, смешанные коагулянты, Базис М.

Общеизвестным фактом является то, что потребление некачественной питьевой воды является причиной до 80 % всех заболеваний человека, поэтому постоянное повышение качества питьевой воды является одной из самых актуальных задач государства.

Поверхностные источники водоснабжения подвергаются интенсивному загрязнению взвешенными, минеральными и органическими загрязнениями. Вода в районах промышленного и сельскохозяйственного производства находится в критическом санитарно-эпидемиологическом состоянии. В воде находятся примеси антропогенного и техногенного характера, что обусловлено поступлением неочищенных или недостаточно очищенных хозяйственно-бытовых и промышленных стоков, талых и ливневых вод с сельских территорий, животноводческих комплексов, мелиорированных сельхозугодий и т. д. [1, 2].

Шелест Сергей Николаевич, доцент кафедры "Природообустройство, водопользование и охрана водных ресурсов".

E-mail: sn.shelest@omgau.org

Корчевская Юлия Владимировна, заведующая кафедрой "Природообустройство, водопользование и охрана водных ресурсов".

E-mail: yuv.korchevskaya@omgau.org

Троценко Ирина Александровна, доцент кафедры "Природообустройство, водопользование и охрана водных ресурсов".

E-mail: ia.trotsenko@omgau.org

Волынкина Светлана Вячеславна, ведущий инженер-технолог.

E-mail: sv.bezukhova@omgau.org

Статья поступила в редакцию 19 июля 2023 г.

© Шелест С. Н., Корчевская Ю. В., Троценко И. А., Волынкина С. В., 2023

Для получения эпидемиологически безопасной воды зачастую используют обеззараживание воды хлорсодержащими реагентами, которые можно характеризовать высокой дезинфицирующей способностью и возможностью пролонгации обеззараживающего эффекта в питьевой воде за счет содержания остаточного хлора в распределительной сети водопровода, а также они являются относительно дешевыми по сравнению с другими дезинфектантами [3, 4].

Однако установлено, что хлорсодержащие реагенты при взаимодействии с органическими веществами, находящимися в природной воде, в воде питьевого качества образуют тригалогенметаны (ТГМ), в том числе хлороформ (трихлорметан), дихлорбромметан, дибромхлорметан и др., которые обладают канцерогенными и мутагенными свойствами, а также имеют высокую биопроницаемость. Из этого следует что, указанные хлорорганические соединения (ХОС), представляют опасность для здоровья человека. Кроме того, доказано, что процесс образования данных веществ продолжителен по времени и ХОС могут образовываться в питьевой воде уже за пределами водоочистных сооружений [5].

Рассмотрим технологические решения вопроса предотвращения образования хлорорганических соединений в процессе водоподготовки.

Объект исследований

Объектом исследований является питьевая вода АО "ОмскВодоканал" города Омска. На сооружениях по водоподготовке АО "ОмскВодоканал" производится очистка природной воды из поверхностного водо-

источника реки Иртыш. В качестве обеззараживающего реагента используется "хлорная вода", полученная с помощью электролиза поваренной соли. "Хлорная вода" — это водный раствор, содержащий в своем составе молекулы хлора (Cl_2), хлорноватистую (HClO) и хлороводородную (соляную) кислоты (HCl), диоксид хлора.

Процесс обеззараживания воды происходит за счет содержания в обеззараживающем реагенте хлорноватистой кислоты (HOCl), диоксида хлора (ClO_2) и гипохлорит-иона (ClO). Бактериальный эффект хлорсодержащих компонентов вызван их взаимодействием с протоплазмой клеток.

Методы исследований

Существует два основных направления уменьшения концентрации хлорорганических соединений в питьевой воде: методы, предотвращающие образование ХОС, применяют при отсутствии ХОС в природной воде; методы удаления ХОС на заключительных этапах обработки воды, применяют в случае наличия ХОС в природной воде.

Оценку качества воды водоисточника в отношении хлорорганических соединений (ХОС) проводят в различные периоды года (1—2 раза в квартал) и в периоды резкого изменения качества воды (например, во время паводка). В зависимости от результатов аналитического контроля качества исходной и питьевой воды устанавливают необходимость изменения технологии водоподготовки в целях уменьшения концентрации ХОС в питьевой воде. В процессе водоподготовки можно использовать такие методы удаления ХОС, как хлораммонизация, сорбция и реагентную очистку воды смесевыми коагулянтами [6, 7].

Хлораммонизация — это метод обеззараживания воды путем введения в обрабатываемую воду реагента, содержащего аммоний, и хлорсодержащего реагента. При этом обеззараживающим агентом являются образующиеся в воде хлорамины (неорганический связанный хлор).

Связанный хлор (монохлорамин, дихлорамин) имеет меньшую реакционную способность по сравнению с хлором и менее интенсивно взаимодействует с органическими веществами, находящимися в питьевой воде. Благодаря этому хлоропоглощаемость связанного хлора в воде в несколько раз меньше, чем свободного, что позволяет значительно снизить расход хлора. При этом хлорамины, в основном, расхо-

дуются не на окисление примесей, а на обеззараживание воды (табл. 1).

Поскольку хлорамины обладают меньшей окислительной способностью чем гипохлорит-ион, то взаимодействие хлорамина с органическими веществами воды с образованием ХОС происходит в гораздо меньшей степени.

Широкомасштабное внедрение метода предварительной аммонизации и хлорирования на действующих сооружениях станций водоподготовки позволит получить гарантированный и надежный технологический эффект по обеспечению ПДК на содержание хлороформа в питьевой воде 0,06 мг/л (60 мкг/л) с гарантией сохранения нормативных требований, предъявляемых к основным химическим и микробиологическим показателям. По результатам анализов данных, полученных в ходе эксперимента в разные сезоны года, можно сделать вывод, что для работы сооружений в режиме предварительной аммонизации и хлорирования в качестве рабочих можно дозировать диапазон хлора 1,2—2,9 мг/л и аммиака 0,1—0,4 мг/л. Однако необходим окончательный подбор доз с учетом особенностей и качества воды водоисточников [8].

При **адсорбционном методе** удаления ХОС в качестве адсорбентов можно использовать различные природные материалы, искусственные неорганические вещества, углеродные материалы, а также синтетические полимерные молекулярные сорбенты.

В процессах водоподготовки наибольшее применение в качестве сорбентов имеют активированные угли.

Углевание проводят совместно с процессом осветления, т. е. непрерывно добавляют в воду уголь вместе с коагулянтном и флокулянтном. Уголь при этом сорбирует органические примеси, объединяется с образующимися при коагуляции хлопьями и затем выделяется из воды вместе с ними в отстойниках.

Применение порошкообразного активированного угля в процессе водоподготовки уменьшает образование ХОС на 10—40 %. Но его целесообразно применять средними и малыми дозами (менее 20—30 г/м³) в зависимости от конкретных условий.

В настоящее время для очистки природных вод разрабатывают **смесевые реагенты**, которые выполняли бы функции коагулянта, флокулянта, осадителя и адсорбента. Композиционные реагенты готовят из неорганических коагулянтов железа и алюминия, органических флокулянтов различной природы и свойств, активных добавок минерального и органического происхождения.

Таблица 1

Эффективность обеззараживания водным хлором и монохлораминном

Группы патогенов	Хлор	Монохлорамин
Бактерии	0,08 мг/дм ³ при $T = 1^\circ\text{C}$ и $\text{pH} = 7,0$; 3,3 мг/дм ³ при $T = 1^\circ\text{C}$ и $\text{pH} = 8,5$	94 мг/дм ³ при $T = 1^\circ\text{C}$ и $\text{pH} = 7,0$; 278 мг/дм ³ при $T = 1^\circ\text{C}$ и $\text{pH} = 8,5$
Вирусы	12 мг/дм ³ при $0-5^\circ\text{C}$; 8 мг/дм ³ при 10°C ; оба при $\text{pH} = 7,0-7,5$	1240 мг/дм ³ при 1°C ; 430 мг/дм ³ при 15°C ; оба при $\text{pH} = 6,0-9,0$
Паразитарные простейшие—Лямблия кишечная	230 мг/дм ³ при $0,5^\circ\text{C}$; 100 мг/дм ³ при 10°C ; 41 мг-мин./дм ³ при 25°C ; все при $\text{pH} = 7,0-7,5$	2550 мг/дм ³ при 1°C ; 1000 мг/дм ³ при 15°C ; оба при $\text{pH} = 6,0-9,0$
Паразитарные простейшие—Оцисты Криптоспоридий	Не обезвреживает	Не обезвреживает

В рамках решения проблемы импортозамещения в цехе эксплуатации водопроводных сетей и сооружений АО "ОмскВодоканал" ведутся опытно-промышленные испытания отечественных реагентов, в частности с 2022 г. проводятся промышленных испытаний смесового коагулянта "Базис М" на основе хлорида железа и сульфата алюминия.

Назначение и химический состав данных реагентов представлены в табл. 2.

В табл. 3 представлены варианты подбора доз и состав вводимых реагентов. В первом столбце таблицы указан номер опыта, в строках указано сколько и какой реагент добавлен. На рисунке изображены результаты опытов.

Опыты показали, что оксихлорид алюминия более эффективен в сравнении с сульфатом алюминия, а

смесовой коагулянт Базис М совместно с коагулянт-ом усиливают процесс коагуляции загрязняющих веществ в природной воде. При проведении испытаний, было обнаружено что применение Базиса М снижает содержание хлорорганических соединений в питьевой воде.

При добавлении смесового коагулянта Базис М (на начальной стадии) органические вещества, присутствующие в природной воде окисляются, тем самым снижается возможность образования хлорорганических соединений после введения в воду хлора. Однако выявленное свойство коагулянта Базис М снижать хлороформ, требует подтверждения при проведении промышленных испытаний в течение года, особенно в паводковый период, когда уровень органических загрязнений в воде высокий.

Таблица 2

Смесовой коагулянт "Базис М"

Назначение	Состав	Идентификация опасности
Предназначен для очистки и обработки воды в хозяйственно-питьевом и промышленном водоснабжении	Железо(III)хлорид Полиоксихлорид алюминия Сульфат алюминия Вода	Вызывает коррозию металлов; Обладает токсичностью по воздействию на организм при проглатывании; Вызывает раздражение кожи; Вызывает поражение/повреждение глаз

Таблица 3

Подбор доз реагентов

№ опыта	Наименование реагента	Коагулянт, мг/л	Флокулянт, мг/л	"Базис М", мг/л
1	Оксихлорид алюминия	1,0	0,07	1,0
2	Оксихлорид алюминия	1,0	0,07	2,0
3	Сульфат алюминия	1,0	0,07	1,0
4	Сульфат алюминия	1,0	0,07	2,0
5	Сульфат алюминия	1,0	0,07	—
6	Оксихлорид алюминия	1,0	0,07	—



Рис. 1. Оксихлорид алюминия + флокулянт + смесовой коагулянт "Базис М"



Рис. 2. Сульфат алюминия + флокулянт + смесовой коагулянт "Базис М"



Рис. 3. Оксихлорид алюминия + флокулянт

Заключение

Безопасная вода важнейший фактор здоровья населения. В настоящее время вводятся новые гигиенические нормативы, ужесточающие требования по предельно допустимым концентрациям веществ и соединений, находящихся в питьевой воде, в частности в 3,3 раза снизилось ПДК хлороформа в питьевой воде. В цехе водоподготовки АО "ОмскВодоканал" активно идет работа по поиску путей решения данной проблемы. Результаты проделанной работы показывают, что методы, предпринятые для предотвращения образования хлороформа в процессе водоподготовки (варьирование дозы коагулянта, уменьшение дозы хлора, дробное хлорирование, изменение точки ввода хлора), не эффективны в борьбе с хлороформом.

Сорбционная очистка воды совместно с процессом коагулирования, является эффективным и безопасным методом удаления хлороформа из питьевой воды, но является дорогостоящей.

Хлораммонизация обладает рядом достоинств (меньше побочных продуктов дезинфекции, более устойчивый дезинфектант, но данной технологии присущи недостатки — хлорамин является менее эффективным дезинфицирующим веществом чем хлор, требуется тщательный контроль технологического процесса, так как всегда присутствует риск нитрификации воды в сетях (вкус и запах хлорки), так же хлорамин трудно удалить из воды.

Обработка воды коагулянтами самый эффективный способ очистки воды от нерастворимых загрязнений. Поэтому актуален поиск путей к усовершенствованию процесса коагуляции, а также методов, позволяющих его интенсифицировать. Установлено, что "Базис М" является отличным катализатором, способствующим более качественному и интенсивному протеканию процесса коагуляции.

По результатам промышленных испытаний, можно будет с уверенностью сказать, о возможном снижении хлороформа в питьевой воде благодаря использованию нового коагулянта "Базис М".

ЛИТЕРАТУРА

1. Марцев А. А., Селиванов О. Г. Влияние природных минералов на физико-химические показатели питьевой воды // Экология промышленного производства. 2021. № 1. С. 22—25.
2. Садчиков А. П., Остроумов С. А. Качество воды в экосистемах-источниках водоснабжения: изменения содержания фосфора в частицах взвешенного в воде вещества. Экология промышленного производства. 2018. № 2. С. 22—24.
3. Ушакова И. Г., Корчевская Ю. В., Троценко И. А., Горелкина Г. А. Возможности использования природных вод для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения омской области: мат. Междунар. науч.-практ. конф. "Перспективные технологии в аграрном производстве: человек, "цифра", окружающая среда" (AgroProd 2021). — Омск, 2021. С. 90—94.
4. Амбросьева Т. В., Богуш З. Ф., Поклонская Н. В. и др. Вирусологический контроль качества питьевой воды как важный этап обеспечения ее эпидемиологической безопасности // Вода Magazine. 2018. № 3(127). С. 42—46.
5. Красовский Г. Н., Егорова Н. А. Хлорирование воды как фактор повышенной опасности для здоровья населения // Гигиена и санитария. 2003. № 1. С. 17—21.
6. Драгинский В. Л., Алексеева Л. П. Пути решения проблемы уменьшения концентрации хлорорганических соединений, образующихся при хлорировании воды: мат. IV Междунар. науч.-практ. конф. Технологии очистки воды "Техновод-2008". — Новочеркасск: ООО НП "ТЕМП", 2008. С. 18—23.
7. Корчевская Ю. В., Троценко И. А. Необходимость применения экологически безопасных методов обеззараживания воды: мат. Всеросс. (национальной) науч.-практ. конф. с международным участием "Достижения и перспективы научно-инновационного развития АПК". — Курган: Изд-во: Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т. С. Мальцева (Лесникова), 2020. С. 67—72.
8. Корчевская Ю. В., Безухова С. В. Об обеззараживании на станциях водоподготовки: мат. I Национ. науч.-практ. конф. с международным участием "Инновации природообустройства и защиты окружающей среды". 2019. С. 139.

Technological solutions to prevent the formation of organochlorine compounds in the process of water treatment

S. N. SHELEST, Yu. V. KORCHEVSKAYA, I. A. TROTSSENKO
Omsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin, Omsk, Russia

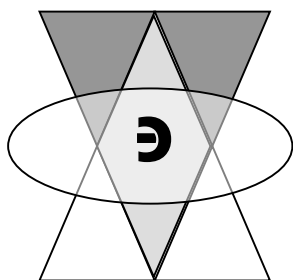
S. V. VOLYNKINA
JSC "OmskVodokanal", Omsk, Russia

The article discusses some methods for removing organochlorine compounds in drinking water, due to the fact that new hygiene standards are currently being introduced that tighten the requirements for maximum allowable concentrates of substances and compounds, in particular, the MPC of chloroform in drinking water has decreased by 3.3 times. The results of an experiment using reagent water purification with mixed coagulants are presented. During the tests, it was found that the use of a mixed coagulant Basis M (based on ferric chloride and aluminum sulfate) reduces the content of organochlorine compounds in drinking water.

Keywords: water treatment, organochlorine compounds in drinking water, mixed coagulants, Basis M.

Bibliography — 8 references.

Received July 19, 2023



Очистка промышленных газовых выбросов

УДК 665.7.033.22; 66.081.3; 661.183.3
DOI: 10.52190/2073-2589_2023_4_39
EDN: KKAOFS

Новое решение в конструкции абсорбера по технологии аммиачно-сульфатной сероочистки дымовых газов

А. М. ВОЛОДИН, канд. техн. наук; А. Н. ЕПИХИН, канд. техн. наук; О. А. КИСЕЛЕВА
ОАО «Всероссийский теплотехнический институт», Москва, Россия

Описаны основные конструктивные особенности и принцип работы контактного массообменного, абсорбционного аппарата для аммиачно-сульфатной сероочистки дымовых и промышленных газов. Изобретение позволяет повысить удельную производительность установок сероочистки дымовых газов за счет повышения интенсивности массообмена в комбинированном аппарате на стадиях абсорбции и окисления, обеспечить возможность удаления сернистого ангидрида из очищаемых дымовых газов с минимальным уровнем проскока поглотителя и аэрозолей в виде аммиака и твердых аммонийных солей. Установка дополнительного контактного устройства в виде пакетно-вихревой насадки улучшит тепло-массообменные характеристики абсорбционной зоны при неизменном рабочем объеме по сравнению с полым распылительным абсорбером.

Ключевые слова: сернистый ангидрид, сульфат аммония, аммиак, инжектор, мокрая сероочистка, интенсификация, массообмен.

Одним из основных загрязнителей атмосферы является сернистый ангидрид — SO_2 , поступающий в атмосферу с дымовыми газами тепловых электростанций при сжигании органического топлива.

Выбросы в атмосферу сернистого ангидрида зависят от мощности электростанций и содержания серы в сжигаемом топливе. Улавливание сернистого ангидрида необходимо не только для снижения выбросов в атмосферу и охраны окружающей среды, но и для производства ценных серосодержащих продуктов. Выбор технологии сероочистки за котлом определяется, прежде всего, объемом очищаемых газов, запыленностью, температурой, концентрацией сернистого

ангидрида в дымовых газах, сопутствующими компонентами, наличием в близлежащих районах требуемого химического абсорбента и возможностью утилизации конечного продукта.

Для очистки дымовых газов при сжигании органического топлива с высоким содержанием серы на крупных ТЭС с установленной мощностью более 300 МВт в основном, применяют известняковый или известковый методы, достаточно хорошо освоенные и отработанные в технологиях сероочистки на многих зарубежных энергоблоках. Но в последние десятилетия все шире используют метод аммиачно-сульфатной сероочистки с получением в качестве товарного продукта азотного удобрения сульфата аммония, содержащего 21 масс. % питательного элемента — азота. В связи с реконструкцией старых котельных агрегатов, созданием новых энергоблоков большой единичной мощности, рассчитанных на сверхкритические параметры пара, предъявляются и новые требования к газоочистному оборудованию в плане повышения его удельной производительности и снижения энергоемкости. Последнее достигается путем интенсификации оборудования химико-технологических процессов.

Володин Анатолий Михайлович, ведущий научный сотрудник.

E-mail: AMVolodin@vti.ru

Епихин Андрей Николаевич, заведующий лабораторией.

E-mail: ANEpikhin@vti.ru

Киселева Ольга Александровна, заведующая отделением.

E-mail: OAKiseleva@vti.ru

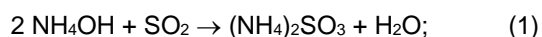
Статья поступила в редакцию 26 сентября 2023 г.

© Володин А. М., Епихин А. Н., Киселева О. А., 2023

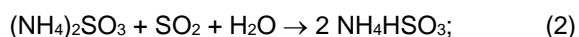
Аммиачно-сульфатная технология сероочистки, являющаяся в настоящее время наиболее перспективной и востребованной, разработана на основе метода получения сульфата аммония из сернистого ангидрида очищаемых дымовых газов и водного раствора аммиака [1]. Стадии поглощения и окисления, которые осуществляются в данном процессе, являются основными. Поэтому для выполнения решаемой задачи рассматривается конструкция комбинированного поглотительного и окислительного аппарата.

Механизм химических превращений в процессе аммиачно-сульфатной сероочистки включает следующие стадии:

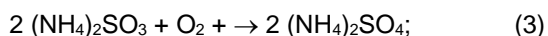
– аммиачная вода (NH_4OH), вступает в реакцию с сернистым ангидридом, который содержится в очищаемых дымовых газах, в результате которой по реакции (1) образуется водный раствор сульфита аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$



– далее после взаимодействия водного раствора сульфита аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ с диоксидом серы по реакции (2) образуется бисульфит аммония NH_4HSO_3 :



– частично сульфит и бисульфит аммония окисляется кислородом воздуха до сульфата и бисульфата аммония по реакциям (3—4):



При использовании легколетучих аммиачных соединений в процессе извлечения сернистого ангидрида из дымовых газов возможны нежелательные уровни проскока безводного аммиака и солевых аэрозолей, содержащих, в основном, сублимированные микрочастицы бисульфита аммония $(\text{NH}_4\text{HSO}_3)$, который образуется при взаимодействии паров аммиака, диоксида серы и воды по реакции (5):



Проскок аэрозолей приводит к вторичному загрязнению окружающей среды [2, 3], о чем при работе установок свидетельствует сине-белый шлейф на срезе дымовой трубы.

Количество свободного аммиака в газовой фазе определяется давлением его паров, которое увеличивается с повышением температуры контактирующих сред, высокими значениями pH и повышением концентрации образующегося сульфита аммония по реакции (2). Поэтому при организации очистки от сернистого ангидрида в дымовых газах в целях повышения эффективности процесса стремятся к более низкому уровню проскока свободного аммиака и солевых аэрозолей.

Известно достаточное количество конструкций поглотительных аппаратов сероочистки, в том числе и для использования в аммиачно-сульфатном процессе. В качестве примера аналога для рассмотрения

в настоящей статье взят один из комбинированных абсорберов [4]. Им является колонный аппарат, в состав которого входит вертикальная обечайка с внутренними контактными устройствами в виде оросительной системы, емкостью в нижней части колонны и сепаратора жидкости в верхней части. Исходный дымовой газ подводится в абсорбер в направлении сверху вниз под острым углом к вертикальной оси аппарата через боковой патрубок, расположенный в нижней части корпуса абсорбера над сборником. В указанном патрубке в качестве оросителей установлены жидкостно-газовые инжекторы, подключенные с помощью циркуляционного насоса к емкости для сбора жидкого абсорбента.

Недостатками аналога в случае применения его для аммиачно-сульфатной сероочистки дымовых газов от сернистого ангидрида являются [5] — невысокая удельная поверхность контакта фаз, высокий расход абсорбента, установка на выходе аппарата сложных многоступенчатых систем сепарации тумана, что приводит к увеличению гидравлического сопротивления аппарата.

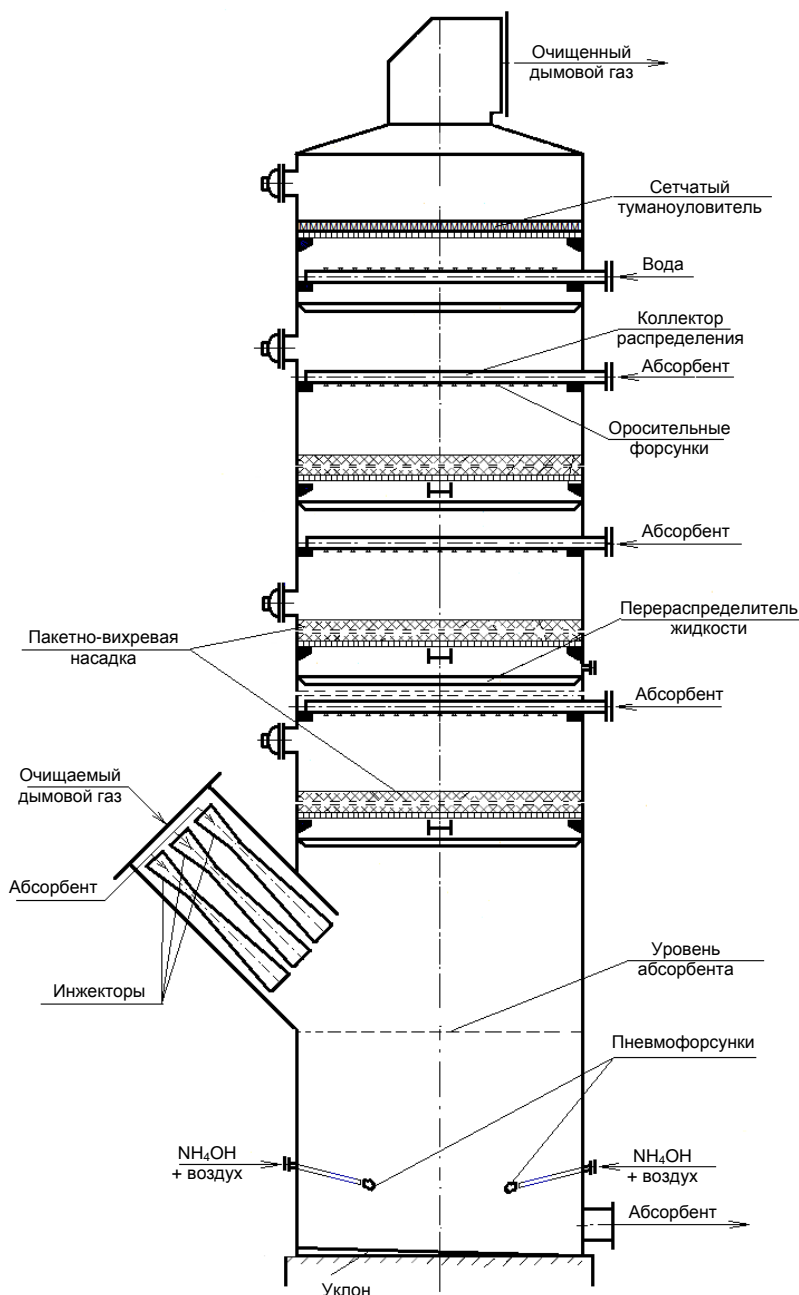
В связи с этим, авторами была поставлена задача повышения эффективности аммиачно-сульфатной сероочистки дымовых газов за счет интенсификации процессов массообмена при абсорбции и при окислении, что должно было в итоге привести к уменьшению удельного расхода жидкого абсорбента и обеспечению низкого уровня образования и проскока свободного аммиака и солевых аэрозолей.

Устройство предлагаемого аппарата изображено на рисунке.

В нижней части корпуса абсорбера установлены инжекторы, соединенные с циркуляционным насосом и нижним сборником абсорбента. В качестве контактного устройства используется пакетно-вихревая насадка, устанавливаемая в несколько ярусов, количество которых определяется заданными параметрами процесса сероочистки [5]. Внутри корпуса размещена пакетно-вихревая насадка [6], количество ярусов орошения насадки определяется также заданными параметрами процесса сероочистки. Максимальная скорость газа в свободном сечении абсорбера 5,5 м/сек при использовании насадки такой конструкции. Высокий скоростной режим обеспечивает повышенный интенсивный массообменный процесс и увеличивает производительность аппарата в целом. Рециркуляция абсорбента увеличивает движущую силу процесса и уменьшает удельный расход абсорбента.

В верхней части корпуса абсорбера расположено газо-жидкостное сепарационное устройство, в качестве которого используются сетчатый туманоуловитель.

Абсорбер аммиачно-сульфатной сероочистки устроен так, что внутри емкости для сбора абсорбента установлены жидкостно-газовые инжекторы, подключенные к источникам аммиачной воды и воздуха. Ось каждого из установленных жидкостно-газовых инжекторов внутри емкости для сбора жидкого абсорбента расположена тангенциально по отношению к вертикальной оси корпуса, и ее продолжение упирается в соединение боковой поверхности и днища емкости для сбора жидкого абсорбента, что обеспечивает:



Абсорбер аммиачно-сульфатной сероочистки

- повышение интенсивности процесса перемешивания аммиачной воды, подводимой по первой напорной стороне жидкостно-газовых инжекторов с раствором абсорбента;

- повышение интенсивности процесса окисления бисульфита аммония [6] воздухом из жидкостно-газовых инжекторов.

Необходимый угол наклона по отношению к вертикали корпуса составляет 30—65°.

Эти инжекторы обеспечивают сероочистку дымовых газов с образованием сульфита и бисульфита аммония с их последующим окислением кислородом воздуха и получением сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и бисульфата аммония NH_4HSO_4 по реакциям (4)—(5) и уменьшают унос микрочастиц бисульфита аммония очищенным дымовым газом.

Диспергирование аммиачной воды установленными жидкостно-газовыми инжекторами в раствор абсорбента осуществляют, чтобы уменьшить вероятность того, что в емкости сборника абсорбера, будут присутствовать застойные зоны с низким значением pH и высокими концентрациями бисульфита аммония, который не поглощает сернистый ангидрид. При этом необходимые значения pH и концентрации бисульфита аммония достигаются в основном объеме абсорбционной зоны аппарата, что способствует как можно более низкому уровню проскока свободного аммиака и солевых аэрозолей.

Пакетная вихревая насадка [7] и устройство для орошения дымовых газов жидким абсорбентом посредством разбрызгивающих сопел форсунок, соединенных в коллектор, орошает абсорбентом всю

площадь поверхности поперечного сечения аппарата и таким образом обеспечивают:

- повышение интенсивности массообмена между абсорбентом и абсорбируемыми веществами очищаемого газа за счет повышения скоростей по газовой фазе в свободном сечении аппарата;
- повышение производительности процесса мокрой сероочистки дымовых газов за счет создания развитой поверхности фазового контакта, более равномерного перемешивания жидкого абсорбента с потоком очищаемых дымовых газов, ликвидации застойных зон и эффективной сепарации капель и тумана внутри ячейки насадки.

В одном из вариантов конструкции абсорбера для сероочистки дымовых газов от сернистого ангидрида по аммиачно-сульфатному методу имеется вертикальный корпус и устройство для орошения дымовых газов основной частью абсорбента, в качестве которого обычно используют форсунки. Орошающая жидкость после взаимодействия с сернистым ангидридом дымовых газов изменяет свой состав и стекает в сборник, установленный в нижней части абсорбера. Здесь же в корпус абсорбера встроен боковой патрубок, расположенный под углом 30—65° к вертикали для подвода дымового газа и добавочного количества абсорбента. Внутри патрубка в его продольном направлении установлены два жидкостно-газовых инжектора, которые подключены по напорной стороне с помощью циркуляционного насоса к сборнику. Внутри абсорбера установлена многоярусная пакетная вихревая насадка, разработанная для тепло- и массообменных колонных аппаратов, описанная в патенте [7]. Устройство для орошения дымовых газов абсорбентом содержит разбрызгивающие сопла, обеспечивающие перекрытие орошением всей площади, обращенной к нему поверхности пакетной вихревой насадки. На приведенном рисунке показаны два патрубка для подвода аммиачной воды и воздуха к пневматической форсунке, являющейся составной частью инжектора, общее количество которых определяется производительностью абсорбера. Установленный в технологической схеме дымосос (на рисунке не показан) обеспечивает проход очищаемых дымовых газов через абсорбер сероочистки. В дополнение в технологической линии имеются туманоуловитель и устройство для его промывки водой, а также линия периодического или непрерывного отвода жидкой фазы из сборника. Работа абсорбера сероочистки дымовых газов осуществляется следующим образом.

Перед осуществлением основного процесса сероочистки емкость сборника заливают абсорбентом, в качестве которого используют водный раствор аммонийной соли определенного состава, зависящий от концентрации очищаемых газов. Очищаемые газы вводятся в аппарат через боковой патрубок, расположенный тангенциально к корпусу абсорбера. Ввод абсорбента в аппарат осуществляется тремя потоками: один поток через устройства для орошения восходящих дымовых газов, второй поток вместе с очищаемыми газами вводится с помощью циркуляционного насоса через жидкостно-газовые инжекторы, установленные внутри бокового патрубка и третий поток через

инжекторы смесителя под давлением с помощью воздушного компрессора. Соотношение потоков абсорбента определяют для каждого случая отдельно.

На первой стадии очистки дымовых газов с участием жидкостно-газовых инжекторов, встроенных в боковой патрубок, используется рециркуляция абсорбента из сборника абсорбера с помощью центробежного насоса, что позволяет развивать дополнительную поверхность фазового контакта в объеме смесителя и экономить тем самым расход абсорбента. На следующей стадии очистка дымовых газов осуществляется на высокоскоростном контактном устройстве пакетной вихревой насадки, орошаемой форсунками. Использование пакетной вихревой насадки позволяет развивать скорость газовой фазы в свободном сечении абсорбера 4,5 м/с и более, что вместе с саморазвивающейся поверхностью фазового контакта внутри насадки позволяет существенно снизить диаметр и высоту абсорбционной области аппарата сероочистки, а в целом и его материалоемкость.

Подпитку аппарата осуществляют свежим реагентом — аммиачной водой (NH_4OH), подаваемой через жидкостно-газовые инжекторы непосредственно в жидкую фазу. При этом происходит и одновременное окисление сульфит-бисульфитной аммонийной смеси абсорбента до сульфата и бисульфата аммония, что и позволяет значительно снизить унос аммиака.

Необходимые значения pH и концентрации сульфита аммония достигаются в основном объеме вертикального корпуса, чему способствует поглощение и реакция аммиака (NH_3) в сборнике. Часть накопленного в емкости отработавшего жидкого абсорбента в виде сульфата аммония, имеющего большую плотность в растворе, непрерывно или периодически сбрасывается по отдельной линии отвода, а очищенные дымовые газы после прохождения через сетчатый туманоуловитель выводятся через дымосос в дымовую трубу.

Предложенное в настоящей статье авторами новое техническое решение не содержит сравнительные режимные параметры процесса аммиачно-сульфатной сероочистки и отражает основополагающую ключевую идею. В дальнейшем планируется провести определение этих параметров при стендовых испытаниях на пилотной установке.

Заключение

Предложена усовершенствованная конструкция комбинированного абсорбционного и реакционного аппарата для проведения процессов сероочистки и окисления с получением полезного товарного продукта в виде сульфата аммония.

Установка в аппарат дополнительных контактных устройств в виде двух-компонентных форсуночных инжекторов и пакетно-вихревой насадки способствует увеличению интенсивности перемешивания, времени пребывания жидкости, необходимого для наиболее полного извлечения поглощаемого компонента, а также скорости реакции и полноты окисления для достижения технологических показателей.

Раскрыта сущность нового аппаратного решения, необходимая для понимания и промышленной реализации соответствующими специалистами на современном уровне техники в области мокрой сероочистки дымовых газов.

Предложенный аппарат защищен патентом на изобретение и может быть использован при разработке двухфазных абсорбционных систем сероочистки не только ТЭС, но и промышленных предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Володин А. М., Епихин А. Н., Фёдорова С. К. Опыт освоения установок очистки дымовых газов от оксидов серы при сжигании органического топлива на отечественных ТЭС // Электрические станции. 2015. № 1(1002). С. 83—88.

2. Володин А. М., Епихин А. Н., Киселева О. А. Особенности образования и сепарации аэрозолей в процессах сероочистки дымовых газов аммиачно-сульфатным методом при получении сульфата аммония // Энергетик. 2022. № 28. С. 21—26.

3. Володин А. М., Епихин А. Н., Киселева О. А. Некоторые особенности технологии сероочистки дымовых газов аммиачно-сульфатным методом при сжигании нефтяного кокса // Энергетик. 2022. № 2. С. 34—37.

4. Шмиголь И. Н., Володин А. М., Тимашков К. В. Интенсифицированный абсорбер для улавливания диоксида серы из дымовых газов // Энергетик. 2013. № 12. С. 48—49.

5. Володин А. М., Епихин А. Н., Киселева О. А. Аппарат для мокрой сероочистки дымовых газов. Патент РФ № 2755091. Бюл. "Изобретения". 2021. № 26.

6. Чертков Б. А. Исследования в области окисления сульфит-бисульфитных растворов. Исследование по химии и технологии удобрений, пестицидов, солей. — М: Наука, 1966. С. 99—112.

7. Кадыров Р. Ф., Блиничев В. Н., Чагин О. В., Кадыров Р. Р. Пакетная вихревая насадка для тепло- и массообменных колонных аппаратов. Патент РФ № 2416461. Бюл. "Изобретения". 2011. № 11.

A new solution in the design of the absorber based on the technology of ammonia-sulphate flue gas desulphurization

A. M. VOLODIN, A. N. EPIKHIN, O. A. KISELYOVA
JSC All-Russian Thermal Engineering Institute, Moscow, Russia

The main design features and the principle of operation of a contact mass transfer, absorption apparatus for ammonia-sulfate desulphurization of flue and industrial gases are described. EFFECT: invention makes it possible to increase the specific productivity of flue gas desulfurization plants by increasing the intensity of mass transfer in the combined apparatus at the stages of absorption and oxidation, to provide the possibility of removing sulfur dioxide from the flue gases being cleaned with a minimum level of absorber breakthrough and aerosols in the form of ammonia and solid ammonium salts. Installing an additional contact device in the form of a packet-vortex nozzle will improve the heat and mass transfer characteristics of the absorption zone of the apparatus at a constant working volume compared to a hollow spray absorber.

Keywords: sulfur dioxide, ammonium sulfate, ammonia, injector, wet desulfurization, intensification, mass transfer.

Bibliography — 7 references.

Received September 26, 2023

УДК 621.436
DOI: 10.52190/2073-2589_2023_4_44
EDN: MCJFDC

Повышение экологических показателей газодизельного двигателя

Е. В. ОВЧИННИКОВ; С. Ю. УЮТОВ; А. С. ОВЧАРЕНКО
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

Рассмотрена возможность использования термодинамических свойств сжиженного углеводородного газа для дополнительного охлаждения поступающего в двигатель воздуха, необходимого для питания дизельного двигателя внутреннего сгорания, работающего по газодизельному циклу.

Ключевые слова: дизельный двигатель, сжиженный углеводородный газ, экология.

Борьба с вредными выбросами от транспортно-технологических средств ведется в последнее время все более решительно. Это направлено, в том числе, на снижение вредных выбросов от коммунальной техники, автобусных парков, сельскохозяйственных машин, дорожно-строительной техники и т. д. Часть производителей техники переходит на электрический привод, часть пытается использовать горючее топливо с меньшими выбросами, такими, как газомоторное топливо, метил-эфирное топливо, водород, растительные масла и т. д. [1—3]. Также некоторые производители пытаются усовершенствовать системы работы двигателя — систему питания двигателя, выпускную систему и т. д.

Известно, что для повышения мощности двигателя необходимо сжечь большее количество топлива, в свою очередь, для того чтобы топливо сгорело, необходимо подать большее количество окислителя — воздуха в камеру сгорания. Оптимальное соотношение количества окислителя к топливу для полного сгорания называется стехиометрической смесью. Рассмотрим возможность использования сжиженного углеводородного газа (СУГ) в качестве охладителя воздуха для повышения мощности двигателя путем впрыска СУГ в жидкой фазе во впускной коллектор двигателя.

Существующие системы питания воздухом двигателя, в зависимости от комплектации, состоят из воздушного фильтра, впускного коллектора, турбины (дополнительно), интеркулера (дополнительно). Последний предназначен для охлаждения воздуха с целью повысить плотность воздуха для подачи большего количества в том же объеме.

Концепция охлаждения воздуха представляет собой емкость, через которую всасывается воздух и в которую через специальную форсунку впрыскивается жидкий углеводородный газ. Известно, что при попадании СУГ в воздушную среду с нормальным атмосферным давлением начинается его активное испарение (кипение). Согласно справочным данным, температура испарения пропана составляет $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, при испарении сжиженного газа из одного литра газа жидкой фазы, образуется около 250 л газообразного, так как объем газа при испарении увеличивается в 250 раз. Плотность газовой фазы в 1,5—2,0 раза больше плотности воздуха. Стехиометрическое соотношение воздух/топливо по массе для смеси пропан-бутан составляет 15,6, для дизельного топлива — 14,5.

Для примера возьмем газодизельный двигатель Минского моторного завода Д-243 с рабочим объемом 4750 см^3 .

При выполнении работ трактором МТЗ-82 среднее значение оборотов двигателя составляет 1800 при эксплуатационной мощности. Двигатель четырехцилиндровый с рабочим объемом 4750 см^3 , имеет эффективность наполнения цилиндра — E , принятое за 85 % (в современных двигателях E при оборотах, близких к максимальному крутящему моменту 85—95 %, на максимальных оборотах 75—85 %, поэтому для расчетов принимаем 85 %), для ДВС без турбонаддува.

Объем потребления воздуха четырехтактным двигателем трактора МТЗ 82 в минуту рассчитываем по формуле:

$$N_b = \frac{VnE}{2} = \frac{4,75 \cdot 1800 \cdot 0,85}{2} = 3633,75 \text{ л/мин} \quad (1)$$

где V — объем двигателя;
 n — число оборотов двигателя в минуту;
 E — эффективность наполнения цилиндра воздухом;
2 — делитель (коэффициент для четырехтактных двигателей, у которых полный цикл совершается за 2 оборота коленчатого вала) [4].

Овчинников Евгений Валентинович, научный сотрудник.
E-mail: evo-xpro-info@yandex.ru
Уютлов Сергей Юрьевич, младший научный сотрудник.
E-mail: s_ujutov@mail.ru
Овчаренко Александр Сергеевич, ведущий инженер.
E-mail: peterbilt@list.ru

Статья поступила в редакцию 21 сентября 2023 г.

© Овчинников Е. В., Уютлов С. Ю., Овчаренко А. С., 2023

Масса воздуха рассчитываем по формуле:

$$m = \frac{V}{\rho} \quad (2)$$

$$m = \frac{3633,75}{830} = 4,38 \text{ кг}$$

где ρ — плотность воздуха (объем 1 кг воздуха при температуре 20 °С составляет 830 л).

При работе в газодизельном режиме при соотношении 25 % ДТ и 75 % СУГ отношение воздух /топливо примем 15/1. Также стоит отметить, что коэффициент избытка воздуха у дизельного двигателя составляет 1,1—1,2. Для расчетов примем данный коэффициент за $\delta = 1,2$.

Соответственно, для сжигания топлива необходимое количество воздуха $m_{\text{вф}}$ вычисляем по формуле:

$$m_{\text{вф}} = \frac{m}{\delta} = \frac{4,38}{1,2} = 3,65 \text{ кг} \quad (3)$$

Необходимое количество газа $m_{\text{вг}}$ для данной смеси можно вычислить по формуле:

$$m_{\text{вг}} = \frac{m_{\text{вф}}}{15} \cdot 0,75 = \frac{3,65}{15} \cdot 0,75 = 0,182 \text{ кг} \quad (4)$$

Впрыск жидкой фазы газомоторного топлива производится во впускной тракт, что приводит к понижению температуры газозвушной смеси, поступающей в двигатель, принципиальная схема представлена на рис. 1.

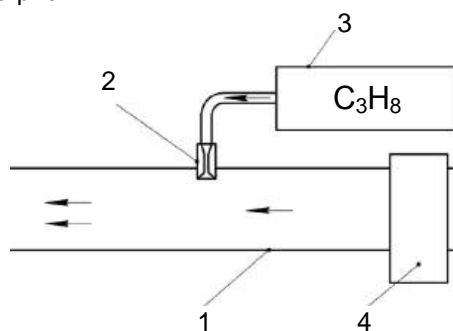


Рис. 1. Схема подачи газа:

1 — впускной тракт; 2 — емкость со сжиженным газом (пропаном); 3 — форсунка; 4 — датчик массового расхода воздуха

Точный расчет температуры в данном случае затруднен, поскольку охлаждение происходит в результате цепочки процессов и зависит от множества переменных. Далее приведены приблизительные расчеты, необходимые для пояснения работы системы.

Жидкая фаза пропана, проходящая через форсунку, подвергается дросселированию, при этом происходит частичное испарение жидкости. Дроссельный эффект, известный также как эффект Джоуля-Томсона, — изоэнтальпийный процесс, который приводит к изменению внутренней энергии при дросселировании в термически изолированной среде без

совершения внешней работы [5—7]. Изменение температуры жидкости после дросселирования определяем по формуле:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \int_{P_1}^{P_2} a_h dP, \quad (5)$$

где T — температура;

P — давление;

a_h — коэффициент адиабатного дросселирования; индекс "1" указывает на значение параметров системы до дросселирования; индексом "2" — после дросселирования.

Сжиженный пропан в нормальных условиях частично испаряется, изменения температуры газа после дросселирования определяем по формуле:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{1}{C_p} \left(RT_1 \frac{b}{V_1 - b} - \frac{2a}{V_1} \right), \quad (6)$$

где R — универсальная газовая постоянная;

C_p — теплоемкость при постоянном давлении;

a — параметр в уравнении Ван-дер-Ваальса, характеризующий межмолекулярное взаимодействие;

b — непосредственный объем молекул.

Для большей наглядности можно воспользоваться диаграммой состояния пропана, которая представлена на рис. 2.

Давление сжиженного пропана в баллоне составляет 0,8—1,2 МПа, принимаем среднее значение 1 МПа. Абсолютное давление во впускном коллекторе составляет 0,08 МПа. Температуру воздуха, поступающего во впускной тракт, принимаем равной 293 °К.

Дросселирование жидкости проходит по линии постоянной энтальпии от точки пересечения линии постоянного давления с пограничной кривой жидкости до точки пересечения постоянной энтальпии с заданной линией постоянного давления. Точка пересечения заданной линии постоянного давления с линией постоянной энтальпии и кривой постоянной сухости пара показывает, какое количество пара образовалось в результате дросселирования жидкости. Для заданных условий его количество равно 0,25 кг/кг. Температура в конце дросселирования определяется точкой пересечения заданной линии постоянного давления с пограничной кривой пара, для заданных условий эта температура приблизительно равна 244 °К.

Допуская, что влияние скорости движения воздуха во впускном тракте незначительно влияет на скорость испарения и пренебрегая прочими факторами считаем, что при смешивании 0,182 кг охлажденного пропана с 3,6 кг атмосферного воздуха получим, температуру смеси газов составит около 275 °К, или +2 °С. Таким образом, снижение температуры подаваемого воздуха составит около 20 °С, что позволит на 5—7 % повысить мощность двигателя без внесения существенных изменений в конструкцию системы питания.

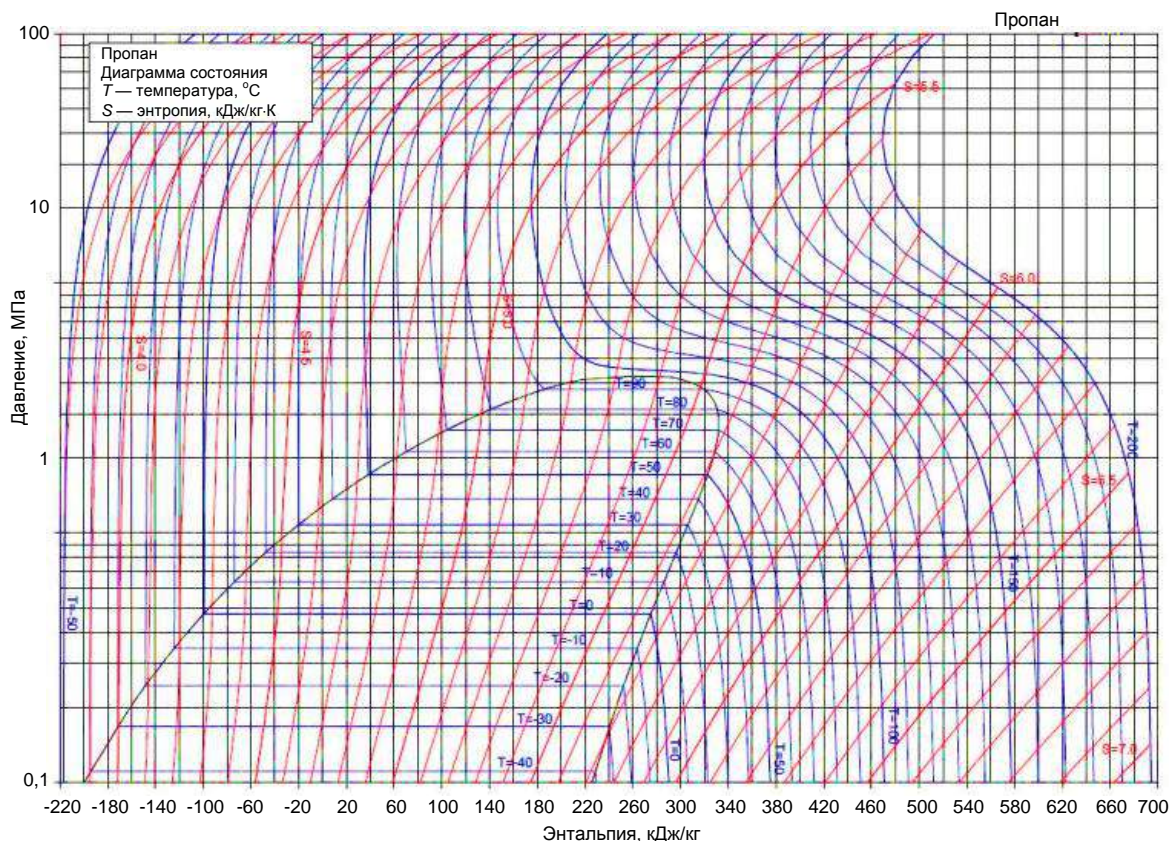


Рис. 2. Диаграмма состояния пропана

Заключение

Предварительные расчеты показали, что подача газомоторного топлива (СУГ) в жидкой фазе во впускной тракт понижает температуру воздуха, поступающего в двигатель, что позволяет снизить потери мощности, повысить эффективность работы двигателя, повысить полноту сгорания топлива — это в итоге способствует снижению потребления топлива и снижению количества вредных выбросов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aydin M., Irgin A., Çelik M. B. The Impact of Diesel/LPG Dual Fuel on Performance and Emissions in a Single Cylinder Diesel Generator. Appl. Sci. 2018. Vol. 8. P. 825. <https://doi.org/10.3390/app8050825>.
2. Уютов С. Ю., Овчинников Е. В., Чаплыгин М. Е. Оценка эффективности систем адаптации газодизельного двигателя для работы в закрытых помещениях // Экология промышленного производства. 2022. № 1. С. 42—49. DOI: 10.52190/2073-2589_2022_1_42.
3. Chakraborty A., Roy S., Banerjee R. Performance Emission Characterization of a LPG-Diesel Dual Fuel Operation: A Gene Expression Programming Approach: Harmony Search and Nature Inspired Optimization Algorithms. Advances in Intelligent Systems and Computing. — Singapore: Springer. 2019. V. 741. DOI: 10.1007/978-981-13-0761-4_39.
4. Овчинников Е. В., Уютов С. Ю., Чаплыгин М. Е. Экономическая оценка экологических показателей газодизельного трактора // Экология промышленного производства. 2022. № 2. С. 49—52. DOI: 10.52190/2073-2589_2022_2_49. EDN: GEHDFE.
5. Фролов Ю. Г., Белик В. В. Физическая химия / Под ред. проф. Фролова Ю. Г. — М.: Химия, 1993. — 464 с.
6. Осипова Н. Н., Бычкова И. М., Поберий А. А. Исследование процесса теплообмена паровой фазы смеси пропан-бутана с окружающим грунтовым массивом в подземном резервуаре с учетом его эксплуатации // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2017. Т. 1. С. 416—422. EDN: XNYGFV.
7. Середенко Е. С., Пахомов О. В., Баранов А. Ю. Математическая модель испарения сжиженного природного газа и анализ влияния исходного состава на скорость испарения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 4. С. 603—610. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-603-610.

Improving the environmental performance of a gas-diesel engine

E. V. OVCHINNIKOV, S. Yu. UYUTOV, A. S. OVCHARENKO
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

This article discusses the possibility of using the thermodynamic properties of liquefied hydrocarbon gas for additional cooling of the incoming air necessary to power a diesel internal combustion engine operating in the gas-diesel cycle.

Keywords: diesel engine, liquefied petroleum gas, ecology.

Bibliography — 7 references.

Received September 21, 2023

УДК 338.45, 551.588.7

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_4_47

EDN: MFERAI

Определение структуры и динамики выбросов парниковых газов сектора "Энергетика" в Новосибирской области

^{1, 2} И. В. ФИЛИМОНОВА, д-р эконом. наук; ² А. В. КОМАРОВА, канд. эконом. наук;
² А. Ю. НОВИКОВ

¹ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Россия

Выполнена оценка выбросов парниковых газов в секторе "Энергетика" Новосибирской области в 2017–2020 гг. Были оценены выбросы следующих парниковых газов: диоксид углерода, метан и оксид азота. Расчеты проводили по методике 1-го уровня Методических рекомендаций по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации. Совокупные выбросы от категории "Сжигание топлив" в 2020 г. составили 20,16 млн т CO₂ эквивалента, от "Фугитивных выбросов" — 1,39 млн т. Объединенная неопределенность оценок выбросов по сектору составляет 6,06 %. Итоговые выбросы от сжигания топлива проанализированы в разрезе категорий МГЭИК, видов парниковых газов и по направлениям потребления и видам топлив. Использование угля в энергетической отрасли создает 70,0 % выбросов от сжигания, что значительно отличает структуру источников выбросов области от структуры РФ. Фугитивные выбросы в Новосибирской области в основном возникают из-за открытой добычи и транспортировки угля и составляют 6,4 % выбросов сектора "Энергетика".

Ключевые слова: парниковые газы, углеродный след, энергетика, сжигание топлив, фугитивные выбросы, Новосибирская область.

Сектор "Энергетика" и в первую очередь категория "Сжигание топлив" вносит наибольший вклад в антропогенные выбросы парниковых газов — в мире 80 % парниковых газов создается за счет сжигания ископаемых топлив [1]. В целом по России за рассматриваемый период 2017–2020 гг. выбросы от сектора "Энергетика" колебались в пределах от 1597,7 до 1688,7 млн т CO₂ экв., при этом доля сектора составляла от 77,9 до 79,2 % от суммарных выбросов парниковых газов по России.

Методической основой для оценки выбросов парниковых газов является "Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК" (2006), на основе которых строят национальные методики расчетов. Методология, разработанная МГЭИК, подразумевает возможность проведения расчетов по трем уровням. Оценивание выбросов от

энергетического использования топлив на 1-м и 2-м уровнях базируется на данных об объемах сжигания и конверсионных коэффициентах выбросов от видов топлив. При этом на 1-м уровне принято использовать обобщенные конверсионные коэффициенты, разработанные МГЭИК, или национальные коэффициенты, а переход ко второму уровню предполагает использование более точных значений. На третьем уровне учитывают технологические особенности оборудования и процесса сжигания. Сектор "Энергетика" состоит из категорий "Сжигание топлив", "Летучие (фугитивные) выбросы от топлива", "Транспортировка и геологическое хранение CO₂". Категория "Сжигание топлив" также подразделяется на "Стационарное сжигание" и "Сжигание на транспорте".

Исследования по данной теме можно разделить на три основных направления: анализ и совершенствование методов оценивания, эмпирические исследования по определению коэффициентов выбросов от видов топлив в различных условиях, оценки выбросов для предприятий, регионов и стран.

Проблема учета технологических особенностей приводит к тому, что в основном расчеты проводятся по методике 1 и 2 уровня. Данный подход применяют как в исследованиях по оценке выбросов парниковых газов в более ранних исторических периодах (с середины XX в.), так и в современных исследованиях и национальных статистических расчетах [2–3].

Филимонова Ирина Викторовна, профессор, главный научный сотрудник, заведующая Центром экономики недропользования.
E-mail: FilimonovaIV@list.ru

Комарова Анна Владимировна, старший научный сотрудник.
E-mail: a.komarova@g.nsu.ru

Новиков Александр Юрьевич, младший научный сотрудник.
E-mail: a.novikov2@g.nsu.ru

Статья поступила в редакцию 14 сентября 2023 г.

© Филимонова И. В., Комарова А. В., Новиков А. Ю., 2023

Однако при таком оценивании возникает проблема неопределенности и несогласованности данных о потреблении топлив из-за проблем со сбором и агрегированием национальной и региональной статистики. Так авторы в [4] показали, что при проведении корректировки используемого набора данных в Китае в 2000—2012 гг. значения выбросов парниковых газов могут быть на 10 % выше, чем утвержденные национальные результаты оценки.

Для получения достоверных оценок выбросов от стационарного сжигания необходимо учитывать всю использованную и потерянную энергию в процессе электрогенерации и промышленном производстве. Это создает статистическую проблему двойного учета топлив в разных секторах экономики, т. к. энергетическое потребление топлив не всегда отделяется в статистике от расхода на смазочные материалы, парафины и сырье [5]. В [6] показано, что двойной учет промышленных выбросов в Торонто и Гамильтоне, крупных городах Канады, составляет до 1,26 % от секторальных оценок.

Исследования по расчету и уточнению конверсионных коэффициентов позволяют переходить к расчетам более низких уровней, что дает более достоверные оценки выбросов. Значительная часть исследований посвящена определению коэффициентов для автотранспорта [7] и печного сжигания [8]. Коэффициенты выбросов зависят от вида печей или двигателей, их износа, характеристик топлив, которые разнятся даже внутри отдельных регионов, условий хранения, сжигания и внешней среды [9]. Большой разброс параметров, влияющих на значения коэффициентов, затрудняет процесс создания общей базы данных, полностью охватывающей все виды выбросов. Некоторые авторы отмечают, что, т. к. коэффициенты меняются с учетом влияния внешней среды, результаты, полученные в лабораторных условиях, не соответствуют реальным значениям выбросов [10]. Это приводит к необходимости проводить полевые замеры, стоимость которых значительно превышает лабораторный эксперимент.

Российские авторы также занимаются исследованиями выбросов парниковых газов в секторе "Энергетика". В. А. Гинзбург и др. сравнили подходы, используемые в российской и международной практике, а также коэффициенты оценки выбросов в атмосферу черного углерода. В отличие от углерода в составе CO_2 черный углерод значительно быстрее осаждается из атмосферы и наносит не только климатический, но и экологический ущерб. Авторы пришли к выводу, что в отдельных подкатегориях выбросов имеются значительные расхождения. Так в подкатегории "Производство электричества и тепла общего пользования" в зависимости от типа турбины и степени износа выбросы могут превышать международные до 20 раз при том же объеме генерации электроэнергии [11—12]. Н. В. Корнилова и П. Я. Трубаев предложили методику расчета выбросов от совместного сжигания твердого и газообразного топлива. Исследование показало, что технология совместного сжигания топлив может являться эффективной мерой сокращения выбросов [13].

О. В. Максимова и др. исследовали подходы к оцениванию выбросов от автотранспорта и предложили

метод, основанный на статистике о наличии автотранспортных средств, средних пробегах и экологических классах, а не на совокупных объемах потребления топлива [14—16].

С учетом отраслевой структуры экономики России значительный вклад в итоговые выбросы также вносят утечки, возникающие при добыче, транспортировке, хранении и переработке нефти, природного газа и угля. По данному направлению также проводятся исследования. В частности, совершенствуются системы учета выбросов метана на угольных и нефтедобывающих предприятиях [17], разрабатываются способы их сокращения [18—20]. Актуальной проблемой для России остается значительный объем выбросов при попутном сжигании нефтяного газа — доля газа, сжигаемого в РФ, значительно превосходит среднемировую [21].

Таким образом, активно проводятся исследования по совершенствованию методики оценивания выбросов парниковых газов и расчету более точных конверсионных коэффициентов. Тем не менее, глобальные расчеты на уровне стран и регионов, в основном, проводятся на 1 и 2 уровнях из-за недостатка данных и отсутствия точных конверсионных коэффициентов.

Ежегодные оценки выбросов парниковых газов от всех категории в России приводятся в Национальных докладах о кадастре выбросов парниковых газов. Однако в основном составители кадастра работают с агрегированными данными. Также проводились исследования для отдельных зон, например, Арктики [22], регионов [23] и предприятий [24—25].

Таким образом, целью исследования являлось проведение оценки и анализ результатов расчетов для выбросов парниковых газов сектором "Энергетика" Новосибирской области в период 2017—2020 гг.

Методы и данные

Общие вопросы методологии

Методической основой расчета выбросов и поглощений парниковых газов Новосибирской области являются Методические рекомендации по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации, утверждённые распоряжением Минприроды России от 16.04.2015 г. № 15-р (МПР 15-р, 2015). Данные рекомендации построены на основе международной практики, изложенной в "Руководящих принципах национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК" (Межправительственная группа экспертов по изменению климата, 2006 г.). Расчеты осуществляли по методике уровня 1 для агрегированных данных.

К парниковым газам, подлежащим учету в рамках сектора "Энергетика", относятся: диоксид углерода (CO_2), метан (CH_4), оксид диазота (N_2O). Для пересчета массовых выбросов индивидуальных газов в CO_2 -эквивалент используют специальные пересчетные коэффициенты, отражающие сравнительную интенсивность парникового эффекта, создаваемого этими газами в атмосфере Земли, — потенциалы глобального потепления. Пересчетный коэффициент для метана (CH_4) составляет 25, для оксида диазота (N_2O) — 298.

На последнем этапе оценивали неопределенность полученных расчетов в соответствии с официальной методологией (МПР № 15-р, 2015; МГЭИК, 2006). В данном подходе итоговая неопределенность строится при 95 %-ном доверительном интервале и зависит от объединения неопределенности данных с неопределенностью конверсионных коэффициентов.

Выбросы от сжигания топлив

Основным источником данных для оценки выбросов от сжигания топлива являлась форма федерального статистического наблюдения № 4-ТЭР "Сведения об использовании топлива, теплоэнергии и электроэнергии на производство отдельных видов продукции, работ (услуг)". Субъекты малого предпринимательства освобождены от заполнения формы, поэтому при её использовании может существовать недоучет данных, а следовательно, и выбросов от малых производителей. Однако их доля в суммарном балансе выбросов в регионе должна быть не велика. Для оценки выбросов использовали значения израсходованного (в качестве котельно-печного или моторного) и отпущенного населению топлива по основным видам экономической деятельности в Новосибирской области.

Для получения оценок выбросов на 1-м этапе объемы топлива переводили в энергетические единицы. Единицей энергии в используемых методических рекомендациях является джоуль (Дж). Исходные данные о потреблении топливных ресурсов представляются в российской статистике в физических единицах (тыс. т, млн м³ и др.). Для преобразования этих данных в энергетические единицы используют значения низшей теплотворной способности топлива, взятые с учетом свойств отечественных топливных ресурсов.

Перевод физических единиц в энергетические осуществляется по формуле:

$$AD(\text{ТДж}) = AD(\text{ед.}) \cdot \text{Coef} \left(\frac{\text{ТДж}}{\text{ед.}} \right) \quad (1)$$

где $AD(\text{ТДж})$ — потребление топливно-энергетических ресурсов в ТДж;

$AD(\text{ед.})$ — потребление топливно-энергетических ресурсов в физических единицах;

$\text{Coef} \left(\frac{\text{ТДж}}{\text{ед.}} \right)$ — коэффициент пересчета физических единиц в энергетические.

На 2-м этапе осуществляется перевод энергетических единиц в выбросы CO₂ и других газов. Коэффициенты выбросов CO₂ при сжигании топлива относительно нечувствительны к технологии сжигания и, в первую очередь зависят, от содержания в топливе углерода.

В процессе сгорания топлива окисляется не весь углерод, однако, в расчетах используются рекомендованные конверсионные коэффициенты, учитывающие 100 % углерода в топливе в качестве окислившегося.

Таким образом, оценка выбросов от каждого вида топлива рассчитывается по формуле:

$$ПГ_{ij} = AD(\text{ТДж})_{ij} \cdot \text{Coef} \left(\frac{\text{CO}_2}{\text{ТДж}} \right)_{ij} \quad (2)$$

где $ПГ_{ij}$ — выбросы парникового газа от сжигания i -го вида топлива в j -м секторе, т;

$AD(\text{ед.})$ — потребление i -го вида топливно-энергетических ресурсов в j -м секторе, ТДж;

$\text{Coef} \left(\frac{\text{ТДж}}{\text{ед.}} \right)$ — коэффициент пересчета.

Выбросы CH₄ и N₂O оцениваются похожим образом. Единственное отличие заключается в том, что коэффициенты выбросов CH₄ и N₂O варьируются для разных видов топлива в зависимости вида деятельности, в то время как коэффициенты для CO₂ одинаковы для всех видов деятельности.

Выбросы от добычи твердых топлив

В Методических рекомендациях уровня 1 приводится оценка выбросов наиболее значимого парникового газа в угледобыче — CH₄, доля остальных газов считается незначительной и не оценивается. Стоит отметить, что добыча угля в Новосибирской области ведется только открытым способом.

Выбросы от открытой добычи угля и последующих операций оцениваются по формуле с использованием коэффициентов выбросов метана от открытой добычи угля. При этом используемый коэффициент оценивает выбросы в метрах кубических, поэтому в формулу дополнительно включается конверсионный коэффициент перевода объемов CH₄ в тонны.

$$\text{Выбросы} = ADb \cdot EFb \cdot C \quad (3)$$

где **Выбросы** — выбросы ПГ от добычи угля открытым способом / последующих операций по обращению с углём при добыче открытым способом (Гг);

ADb — данные о добытом угле открытым способом (млн т);

EFb — коэффициент выбросов от добычи открытым способом / последующих операций по обращению с углём при добыче открытым способом (м³/т);

C — фактор конверсии угля в газообразное топливо, преобразование объёма добытого угля в массу CH₄ Гг 10⁻⁶ м⁻³ принимается равным 0,67.

Выбросы от операций с нефтью и газом

Прямые выбросы парниковых газов от нефтегазовой отрасли происходят в результате:

- технологических продувок (вытеснение воздуха газом) и отведения газов в атмосферу без сжигания через дефлекторы, свечи рассеивания и прочие устройства;

- сжигания на факелах некондиционных газовых смесей;

- прочих утечек и испарений;

Каждая приведённая категория нефтегазового сектора подразделяется на операции, по которым производят расчёт прямых выбросов парниковых газов CO₂, CH₄ и N₂O. Прямые выбросы парниковых газов происходят при следующих операциях в нефтегазовом секторе:

- операции бурения, опробования и обслуживания, действующих нефтяных и газовых скважин;
- добыча нефти и газа;
- подготовка, или первичная переработка нефти и газа;
- транспортировка и хранение нефти и природного газа;
- добыча и транспорт газового конденсата;
- распределение природного и попутного нефтяного газов;
- транспорт СПГ.

Согласно уровню 1, выбросы каждого парникового газа (CO₂, CH₄ и N₂O) от категории источников определяют как произведение соответствующих категории региональных данных о деятельности на коэффициент выбросов. Коэффициент выбросов представляет собой среднюю величину выбросов рассматриваемого парникового газа для данного источника, соотношенную с единицей деятельности. В свою очередь, выбросы парниковых газов (CO₂, CH₄ и N₂O) в целом по нефтегазовой отрасли вычисляются как сумма выбросов газа по всем категориям источников, подлежащих оценке.

Результаты и обсуждение

В 2020 г. суммарные выбросы парниковых газов (ПГ) в секторе "Энергетика" Новосибирской области составили 21,55 млн т CO₂ экв. Доля НСО в совокупных выбросах от сектора "Энергетика" в России составила 1,4 % в 2020 г. Это соответствует общей доле экономики и населения: доля ВВП НСО — 1,29 %, доля населения — 1,91 % от общероссийского показателя.

Транспортировку и геологическое хранение CO₂ на территории области не осуществляют, поэтому данная категория не оценивается.

Сжигание топлива. Сжигание ископаемых топлив в 2020 г. составляло 93,6 % от выбросов сектора "Энергетика" в Новосибирской области. Доля фугитивных выбросов — 6,4 %, что меньше аналогичного показателя в среднем по России (13,6 % в 2020 г.), т. к. на территории области отсутствуют крупномасштабные предприятия нефтегазового сектора (табл. 1). В рамках данной категории основные выбросы приходятся на добычу угля.

Выбросы от сжигания топлив на территории Новосибирской области в 2020 г. оцениваются в 20,16 млн т CO₂ эквивалента. Вклад сжигания в Новосибирской области в общие выбросы данной категории по РФ составлял 1,46 % в 2020 г. Основным источником выбросов в данной категории является сжигание угля — 70,0 % от выбросов сектора в 2020 г. (табл. 2).

В категориях, рекомендуемых МПР №15-р, выбросы парниковых газов распределяются следующим образом (табл. 3).

Таблица 1

Выбросы парниковых газов по сектору "Энергетика" в Новосибирской области, млн т CO₂ экв.

Показатель	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
1. Энергетика	23,87	24,45	23,39	21,55
А. от сжигания ископаемых топлив	22,52	22,76	21,81	20,16
В. от потерь и технологических выбросов в атмосферу:	1,35	1,69	1,58	1,39
от добычи твердых топлив	0,99	1,33	1,24	1,07
от деятельности, связанной с нефтью и газом	0,36	0,36	0,34	0,32

Примечание. Расчеты авторов.

Таблица 2

Выбросы ПГ от сжигания топлива в Новосибирской области

Годы	Всего млн т CO ₂ эквивалента	CO ₂ , млн т	CH ₄ , т	N ₂ O, т	CO ₂ по источникам млн тонн			
					Уголь	Нефтепродукты	Природный газ	Древесина
2017	22,52	22,42	909	267	16,74	2,77	2,80	0,11
2018	22,76	22,65	965	301	16,53	2,95	3,05	0,12
2019	21,81	21,71	860	258	15,70	3,19	2,70	0,12
2020	20,16	20,07	666	244	14,14	3,26	2,60	0,07

Примечание. Расчеты авторов.

Таблица 3

Выбросы от сжигания топлива в Новосибирской области по категориям источников, млн т CO₂ экв.

Категория	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
1.А.1 Энергетические отрасли	14,54	16,63	12,27	10,40
1.А.2 Промышленность и строительство	0,87	0,89	0,65	0,63
1.А.3 Транспорт	2,35	2,56	2,74	2,71
1.А.4 Другие сектора	1,40	1,97	2,03	1,87
1.А.5 Прочие	3,35	0,71	4,12	4,55

Примечание. Расчеты авторов.

Также для возможностей дальнейшего содержательного анализа направлений сокращения выбросов целесообразно рассмотреть выбросы в разрезе используемых видов топлив и назначения потребления в структуре форм официальной статистики 4-ТЭР. В структуре потребления по назначению 78,2 % выбросов в 2020 г. создавались за счет использования котельно-печного топлива, 8 % — за счет использования моторного топлива, 13,8 % — от использования топлив, отпущенных населению (табл. 4).

В Новосибирской области в энергетических отраслях используют Канско-Ачинский, хакасский и кузнецкий уголь, выбросы от которых в сумме создают 70,0 % выбросов подкатегории. Потребление газа создает 12,9 % выбросов, дизельного и автомобильного топлива — 14,4 % (табл. 5). Суммарная эмиссия от сжи-

гания всех видов топлив в 2020 г. составляла 20,16 млн т CO₂ экв., из них 0,09 млн т приходилось на CH₄ и N₂O.

Фугитивные выбросы. Выбросы ПГ, связанные с добычей, транспортировкой и первичной обработкой ископаемых топлив в Новосибирской области, оцениваются в 1,39 млн CO₂ эквивалента, что составляет 6,4 % от всех выбросов сектора "Энергетика" (табл. 6). Доля Новосибирской области от общероссийских фугитивных выбросов составляла 0,64 % (1,67 % от категории "добыча твердых топлив" и 0,21 % от категории "деятельность, связанная с нефтью и газом").

Наибольшую часть выбросов составляют выбросы метана (98,11 %) от добычи угля и прокачки газа по магистральным трубопроводам.

Таблица 4

Выбросы от сжигания топлива в Новосибирской области по назначению, млн т CO₂ экв.

Назначение	2017	2018	2019	2020
Всего	22,52	22,76	21,81	20,16
в качестве котельно-печного топлива	19,00	18,45	17,26	15,77
в качестве моторного топлива	1,22	1,36	1,48	1,61
населением	2,28	2,92	3,06	2,76

Источник: расчеты авторов

Таблица 5

Выбросы CO₂ от сжигания топлива в Новосибирской области по видам топлива, млн т

Виды топлива	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Всего	22,52	22,76	21,81	20,16
Уголь канско-ачинский	2,71	6,25	8,79	7,94
Уголь хакасский (минусинский)	0,00	0,00	3,39	3,85
Газ горючий природный (естественный)	2,80	3,05	2,70	2,60
Уголь кузнецкий	14,01	10,26	3,48	2,32
Топливо дизельное	1,15	1,37	1,53	1,62
Бензин автомобильный	1,40	1,37	1,39	1,27
Пропан и бутан сжиженные	0,03	0,06	0,15	0,26
Мазут топочный	0,18	0,14	0,12	0,10
Древесина топливная	0,11	0,12	0,12	0,07
Уголь прочих месторождений	0,01	0,02	0,04	0,02
Прочие	0,02	0,01	0,00	0,02

Источник: расчеты авторов

Таблица 6

Фугитивные выбросы в Новосибирской области, млн т CO₂ экв.

Показатель	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Всего фугитивные выбросы	1,348	1,687	1,585	1,389
Добыча угля открытым способом	0,992	1,332	1,243	1,067
Бурение скважин	0,000	0,00004	0,000	0,000
Добыча нефти (включая газовый конденсат)	0,010	0,008	0,006	0,004
Транспортировка нефти по магистральным нефтепроводам	0,004	0,004	0,004	0,004
Первичная переработка нефти	0,000	0,001	0,001	0,001
Транспортировка газа по магистральным газопроводам	0,230	0,230	0,230	0,230
Распределение газа	0,054	0,060	0,055	0,053
Сжигание попутного нефтяного газа в факелах	0,058	0,053	0,046	0,030

Источник: рассчитано авторами

Неопределенность

Для оценки неопределенности выбросов от сжигания топлив использовали официальные данные из формы 4-ТЭР, поэтому, в соответствии с рекомендациями МГЭИК, оценки неопределенности данных составляют по 5 % для всех категорий. Неопределенность отдельных коэффициентов очень велика, однако их доля в общих выбросах мала, в связи с этим, общая неопределенность намного меньше максимальных значений отдельных коэффициентов.

Неопределенности коэффициентов выбросов CO₂ варьируются в зависимости от вида топлива. Для Канско-Ачинского угля неопределенность составляет 13,9 %, для кузнецкого и хакасского — 5,4 %, для природного газа — 7,2 %. Неопределенность выбросов от других видов топлив варьируется в пределах от 1 до 18 %. Наибольшей неопределенностью обладают конверсионные коэффициенты выбросов CH₄ и N₂O от сжигания топлив — 233 % для всех видов топлив, однако доля данной категории всего 0,38 % (в пересчете на CO₂ эквивалент) от общих выбросов.

Таким образом, объединенная оценка выбросов от сжигания топлив составляет 6,2 %, а 95 %-ный доверительный интервал находится в пределах от 18,91 до 21,41 млн т CO₂ экв.

В категории "Фугитивные выбросы" высокой неопределенностью обладают коэффициенты для добычи твердых топлив (21,6 % для выбросов CH₄) и деятельности, связанной с нефтью и газом. Наибольшей неопределенностью обладают коэффициенты выбросов N₂O от бурения скважин [12] и сжигания в факелах при нефтедобыче [11] — до 1000 %. Таким образом объединенная неопределенность оценок фугитивных выбросов составляет 49,41 %, а неопределенность сектора "Энергетика" — 6,06 %.

Границы 95 %-ного доверительного интервала для выбросов от сектора "Энергетика" в целом составляют от 20,24 до 22,85 млн т CO₂ эквивалента при рекомендуемой оценке 21,55 млн т CO₂ эквивалента.

Выводы

Выбросы парниковых газов от сектора "Энергетика" в Новосибирской области в 2020 г. составили 21,55 млн т CO₂ экв., что составляет 1,4 % от аналогичного показателя по РФ. Однако спад производства и общее замедление деловой активности, произошедшее в 2020 г. из-за пандемии COVID-19, также повлияло на энергопотребление, что привело к несопоставимому сокращению выбросов относительно 23,39 млн т CO₂ экв. в 2019 г.

Основной вклад в выбросы сектора "Энергетика" вносит категория "Сжигание топлив" — 93,6 %. С точки зрения направлений потребления сжигаемых топлив 15,77 млн т выбросов CO₂ в 2020 г. приходится на котельно-печное потребление. В структуре потребляемого топлива преобладают Канско-Ачинский, хакасский и кузнецкий уголь, на которых работает большинство ТЭЦ области. При этом виден тренд на замещение кузнецкого угля в пользу двух других видов.

Фугитивные выбросы создают 6,4 % выбросов сектора "Энергетика" (1,39 млн т CO₂ экв в 2020 г.). Доля фугитивных выбросов вдвое меньше, чем в среднем

по РФ, т. к. на территории области отсутствуют крупные угольные или нефтегазовые месторождения. Наибольшее количество выбросов создается при добыче угля открытым способом (76,7 %), транспортировке природного газа (16,5 %) и газораспределении (3,8 %).

Неопределенности оценок в 2020 г. составляют 6,2 % и 49,1 % для категорий "Сжигание топлив" и "Фугитивные выбросы" соответственно. Объединенная неопределенность составляет 6,06 %, т. е. с 95 %-ной вероятностью значение выбросов не отклоняется от расчетных более чем на 1,3 млн т CO₂ экв.

*Исследование выполнено при поддержке
Российского научного фонда в рамках проекта
№ 22-18-00424.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Quadrelli R., Peterson S. The energy-climate challenge: Recent trends in CO₂ emissions from fuel combustion // Energy policy. 2007. V. 35. № 11. P. 5938—5952. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.07.001.
2. Boden T. A., Marland G., Andres R. J. Global, regional, and national fossil-fuel CO₂ emissions. Carbon dioxide information analysis center, Oak ridge national laboratory, US department of energy, Oak Ridge, Tenn., USA 2009. DOI: 10.3334/CDIAC/00001_V2010.
3. Shan Y., Huang Q., Guan D., Hubacek K. China CO₂ emission accounts 2016–2017 // Scientific data. 2020. V. 7. № 1. P. 1—9. DOI: 10.1038/s41597-020-0393-y.
4. Liu Z., Guan D., Wei W., Davis S. J. et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China // Nature. 2015. V. 524. № 7565. P. 335—338. DOI: 10.1038/nature14677.
5. Dixit M. K., Culp C. H., Fernandez-Solis J. L. Calculating primary energy and carbon emission factors for the United States' energy sectors // RSC Advances. 2014. V. 4. № 97. P. 54200—54216. DOI: 10.1039/C4RA08989H.
6. Dodanwala T. C., Kankanamge D. H., Ruparathna R., Chhipi-Shrestha G. Accounting for the greenhouse gas (GHG) emission double-counting in Greater Toronto and Hamilton Area (GTHA). Responsible Engineering and Living. Springer Proceedings in Energy. — Springer, 2022. — 18 p.
7. Franco V., Kousoulidou M., Muntean M., et al. Road vehicle emission factors development: A review // Atmospheric Environment. 2013. V. 70. P. 84—97. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.01.006.
8. Shen G., Gaddam C. K., Ebersviller S. M., et al. A laboratory comparison of emission factors, number size distributions, and morphology of ultrafine particles from 11 different household cookstove-fuel systems // Environmental science & technology. 2017. V. 51. № 11. P. 6522—6532. DOI: 10.1021/acs.est.6b05928.
9. Shen H., Luo Z., Xiong R., et al. A critical review of pollutant emission factors from fuel combustion in home stoves // Environment International. 2021. V. 157. P. 106841. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106841.
10. Johnson M. A., Garland C. R., Jagoe K., et al. In-home emissions performance of cookstoves in Asia and Africa // Atmosphere. 2019. V. 10. № 5. P. 290. DOI: 10.3390/atmos10050290.
11. IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
12. Calvo Buendia E., Tanabe K., Kranjc A., Baasansuren J., Fukuda M., Ngarize S., Osako A., Pyrozhenko Y., Shermanau P., Federici S. (eds). Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2019. Published: IPCC, Switzerland.
13. Корнилова Н. В., Трубаев П. А. Расчет совместного сжигания биогаза и RDF-топлива // Энергетические системы. 2020. № 1. С. 173—182.
14. Гинзбург В. А., Кудрявцева Л. В., Зеленова М. С. Методические подходы к оценке выбросов в атмосферу черного углерода на территории Российской Федерации при стационарном сжигании топлива // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2020. Т. 31. № 3—4. С. 46—72.

15. Максимова О. В., Гинзбург В. А., Лытов В. М. Различные подходы сравнения экспертных оценок расчета выбросов от автотранспорта. 9-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса. 2021. С. 554—564.
16. Максимова О. В., Лытов В. М., Гинзбург В. А. Сравнительный анализ методик расчета углеродного следа автотранспорта в России // Контроль качества продукции. 2020. № 7. С. 44—48.
17. Клименко В. А., Круглова Н. Ю. Система учета, контроля и управления фугитивными эмиссиями метана на газораспределительных сетях // Вести газовой науки. 2013. № 2(13). С. 49—55.
18. Фейт Г. Н., Малинникова О. Н. Причины повышенного метановыделения при внезапных выбросах угля и газа в шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2008. № 13. С. 206—211.
19. Тайлаков О. В., Застрелов Д. Н., Смыслов А. И., Самусь В. Л. Количественное определение объемов выбросов парниковых газов на угольных предприятиях // ГОРНЫЙ. 1992. № 11. С. 507—514.
20. Никонова Р. А., Дрягина Д. Р. Сокращение выбросов парниковых газов при добыче углеводородов // Современные инновации. 2018. № 3(25). С. 10—11.
21. Хетагурова Э. О., Борзыкина Е. А. Исследование воздействия сжигания попутного нефтяного газа на факельных установках // Вестник науки. 2021. Т. 5. № 5—1(38). С. 135—140.
22. Кудрявцева Л. В., Гинзбург В. А., Зеленова М. С. Выбросы в атмосферу черного углерода на арктической территории Российской Федерации при стационарном сжигании ископаемого топлива. Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны. 2020. С. 178—181.
23. Черенцова А. А., Гладун И. В. Структура выбросов парниковых газов в Хабаровском крае. Философия современного природопользования в бассейне реки Амур. 2017. С. 117—121.
24. Бочкарев В. А., Бочкарева А. В. Оценка выбросов парниковых газов предприятиями энергетики // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 2(121). С. 85—96.
25. Голубева И. А., Дубровина Е. П., Акулов А. Е. Выбросы парниковых газов при реализации проекта строительства завода по сжижению природного газа в условиях Арктического климата // Газовая промышленность. 2017. № 9(757). С. 140—145.

Determining the structure and dynamics of greenhouse gas emissions in the energy sector in the novosibirsk region

^{1, 2} I. V. FILIMONOVA, ² A. V. KOMAROVA, ² A. Yu. NOVIKOV

¹ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

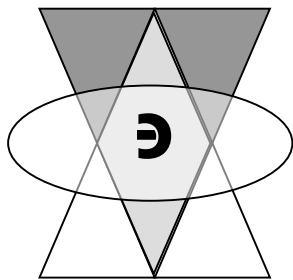
² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, Novosibirsk, Russia

The article evaluates greenhouse gas emissions in the energy sector of the Novosibirsk region in 2017—2020. Emissions of the following greenhouse gases have been estimated: carbon dioxide, methane and dinitrogen oxide. The calculations were carried out according to the Level 1 methodology of the Methodological Recommendations for Conducting a Voluntary Inventory of Greenhouse Gas Emissions in the Subjects of the Russian Federation. Cumulative emissions from the Fuel Combustion category in 2020 amounted to 20.16 million tons of CO₂ equivalent, from Fugitive Emissions — 1.39 million tons. The combined uncertainty of emissions estimates for the sector is 6.06 %. The resulting emissions from fuel combustion are analyzed by IPCC categories, types of greenhouse gases and by directions of consumption and types of fuels. The use of coal in the energy industry creates 70.0 % of emissions from combustion, which significantly differs the structure of emission sources in the region from the structure of the Russian Federation. Fugitive emissions mainly arise from open pit coal mining and transportation and account for 6.4 % of the sector's emissions.

Keywords: greenhouse gases, carbon footprint, energy, fuel combustion, fugitive emissions, Novosibirsk region.

Bibliography — 25 references.

Received September 14, 2023



Чрезвычайные ситуации, экологическая оценка их последствий

УДК 004.9

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_4_54

EDN: MVLQFZ

К оценке неопределённости и риска при обеспечении комплексной безопасности арктической зоны РФ

С. Ю. ЯКОВЛЕВ, канд. техн. наук; А. С. ШЕМЯКИН

Институт информатики и математического моделирования им. В. А. Путилова — обособленное подразделение ФГБУ науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр РАН», г. Апатиты, Мурманская область, Россия

Выполнен анализ опасных ошибок, по причинам которых произошло (или может произойти) какое-то важное, неучтённое нежелательное событие (авария, чрезвычайная ситуация), даны описания последствий подобных происшествий. Приведены основные положения, принятые при оценке неопределённости, дана характеристика основного объекта и предмета исследования. Проанализированы возможные методы учёта неопределённости. Определена методология оценки неопределённости и риска при обеспечении комплексной безопасности арктических регионов РФ. Рассмотрены вопросы информационно-аналитической поддержки промышленно-природной безопасности критических инфраструктур.

Ключевые слова: неопределённость, риск, техногенно-экологическая безопасность, планирующий документ.

Учёт неопределённости для оценки безопасности и риска техногенно-природных аварий и чрезвычайных ситуаций (ЧС) может дать уточнение достоверности информации для принятия решений, выявить наиболее вероятные и наиболее опасные ошибки и последствия недостаточного учёта неопределённости.

Возможные последствия недостаточного учёта неопределённости информации при обосновании решений по промышленно-природной безопасности

Приведём некоторые конкретные примеры событий различного масштаба.

Разлив топлива в Норильске. Одной из крупнейших техногенных катастроф последних лет в Арктической зоне Российской Федерации можно назвать, разлив дизельного топлива на одном из производственных объектов ПАО "ГМК Норникель". В результате в окружающую среду попало около 20 тыс. т нефтепродукта. Ликвидация последствий аварии стоила компании примерно 11,5 млрд руб. В свою очередь, Росприроднадзор оценил ущерб окружающей среде в 147 млрд руб., которые впоследствии были взысканы с "Норникеля" через суд [1].

Согласно заключению независимой экспертизы компании Environmental Resources Management [2], авария стала следствием двух причин: таяния вечной мерзлоты и нарушения строительных норм. Так, в отчёте упоминается, что сваи, поддерживающие резервуар, были короче проектной длины и вследствие этого опирались на слой вечной мерзлоты, а не были заглублены в скальную породу. Повышение температуры и таяние вечной мерзлоты привело к оседанию грунта и последующей подвижке опорных свай.

Источниками неопределённости, не позволившими спрогнозировать аварийную ситуацию, в данном случае можно назвать:

- климатические изменения — нельзя было с достаточной степенью точности определить, когда

Яковлев Сергей Юрьевич, старший научный сотрудник.

E-mail: yakovlev@iimm.ru

Шемякин Алексей Сергеевич, младший научный сотрудник.

E-mail: shemyakin@iimm.ru

Статья поступила в редакцию 27 июня 2023 г.

© Яковлев С. Ю., Шемякин А. С., 2023

именно произойдёт оседание грунта вследствие таяния вечной мерзлоты;

- человеческий фактор — резервуар эксплуатировался в расчёте, что будет выдерживать проектные нагрузки, и не предпринимались меры по обнаружению и устранению нарушений, допущенных при строительстве.

Поскольку до момента аварии не было известно, какие нарушения были допущены при строительстве, нельзя было с достаточной степенью точности предсказать, когда произойдёт разрушение резервуара.

Подтопление рудников "Октябрьский" и "Таймырский". В первой половине февраля 2021 г. при проведении работ на руднике "Октябрьский", принадлежащем компании "Норникель", произошло столкновение с водоносным слоем, и было зафиксировано подтопление рудника [3]. В кратчайшие сроки ликвидировать его не удалось из-за увеличения водопритока и в конце февраля работу рудника "Октябрьский" и связанного с ним рудника "Таймырского" пришлось остановить. Приток воды удалось прекратить лишь спустя месяц. За это время в рудниках накопилось около 1,8 млн м³ воды. Дальнейшую откачку скопившейся воды осуществляли при помощи 4 трубопроводов общей мощностью 2600 м³/ч. Откачка продолжалась приблизительно один месяц. Поскольку рудники "Октябрьский" и "Таймырский" являются ключевыми активами "Норникеля", компании пришлось существенно пересмотреть свои производственные планы в сторону снижения на 15—20 % [4].

В данном случае источником неопределённости можно назвать недостаток сведений о структуре горного массива, в котором проводились горнопроходческие работы — нельзя было с достаточной степенью точности определить местоположение водоносного слоя, равно как и его мощность. Хотя подтопления рудников являются частым явлением при горнопроходческих работах, в случае рудника "Октябрьский" не было достаточно точных оценок мощности обнаруженного водоносного слоя, что привело к недооценке потенциальных объёмов подтопления.

Затопление рудника "Мир". 4 августа 2017 г. во время горных работ в одной из шахт подземного рудника произошло подтопление водонасосной станции. По предварительным данным компании "Алроса", которой принадлежит рудник, причиной аварийной ситуации стало неконтролируемое поступление воды из чаши близлежащего карьера. В результате аварии погибли 8 человек, эксплуатация рудника прекращена. Впоследствии размер ущерба от аварии оценили приблизительно в 10 млрд руб.

Следствие, проведённое Ростехнадзором [5], установило, что причины аварии носили разнородный характер. Наряду с организационными недостатками не были учтены аномальные гидрогеологические факторы, а система мониторинга горных пород не позволяла надёжно прогнозировать критическую ситуацию.

Как и в случае с рудниками "Октябрьский" и "Таймырский", источником неопределённости являлся недостаток сведений о гидрогеологической структуре месторождения, что не позволило учесть в проектных решениях возможность возникновения подобной аварии.

Авария на Саяно-Шушенской ГЭС. 17 августа 2009 г. в 8:13 произошло внезапное разрушение одного из гидроагрегатов электростанции. Через разрушенную шахту вода быстро начала поступать в помещение станции, и произошло короткое замыкание на работавших в тот момент агрегатах. Это привело к обесточиванию, электростанция оказалась затопленной. В результате аварии погибло 75 человек и пострадало 13. Общий ущерб от аварии превысил 7 млрд руб. (в ценах 2009 г.) [6].

В ходе расследования непосредственной причины аварии были названы усталостные повреждения узлов гидроагрегата и частые переходы через нерекондованную зону эксплуатации турбины, являющиеся следствием конструктивных особенностей. Также отмечается, что данная авария стала следствием комплекса причин организационного, технического и правового характера. Так, в акте расследования отмечена низкая ответственность персонала и руководства станции. В нарушение инструкций не был налажен должный контроль за техническим состоянием оборудования.

На первый взгляд причиной аварии явился человеческий фактор, однако нельзя отбрасывать и "исторические" аспекты. В акте расследования отмечалось, что при строительстве плотины были допущены нарушения технологии закладки бетона — как по объективным, так и субъективным причинам. Это привело к трещинообразованию бетонных конструкций плотины. Подобные недостатки устраняли после ввода в эксплуатацию электростанции. Гидроагрегаты, устанавливаемые на электростанции, изначально имели конструктивные недочёты, мешающие нормальной эксплуатации и требующие внеплановых ремонтов — опять же силами персонала станции. Постоянная необходимость производить внеплановые ремонты могла сформировать культуру низкой ответственности — "зачем делать на совесть, если всё равно скоро придётся опять чинить (скорее всего, кому-нибудь другому)?"

Оценка качества воды при измерении. В [7] указано, что при определении качества воды нормы погрешности измерений и ошибки выборки достигают значений ± 70 % и более, а их недоучёт создаёт риск ошибочных заключений. Там же приведен пример оценки качества воды на содержание меди: при нормативе 10 % погрешность измерения составляла 50 %, что могло привести к рискам в 40 %.

В принципе, можно утверждать, что любая авария, ЧС есть следствие наличия неопределённости, следствие неучёта, игнорирования (или недостаточного учёта) некоторой информации, что приводит к незапланированным потерям (социальным, материальным, экологическим).

Основные понятия при оценке неопределённости

В этом разделе содержатся те основные положения предыдущих работ авторов [8—13], которые сохраняют своё значение и к настоящему времени.

Общее словесное определение остаётся прежним — под неопределённостью понимается неполнота либо неточность, неоднозначность информации или знаний о каком-либо объекте.

В диапазон возможных состояний (значений) неопределённости изначально включаем следующие опции (в основном подразумевается параметрическая неопределённость):

- полная или максимальная неопределённость, когда, например, наименование параметра неизвестно;
- наименование параметра (или множество возможных наименований) известно;
- задан набор или промежуток значений параметра, либо вероятностные (или иной формы) характеристики этих значений;
- полная или максимальная определённость, когда детерминировано точное значение данных либо знаний.

По-прежнему понимаем риск как численную меру опасности, а неопределённость считаем одним из факторов возможной опасности и риска.

Основные возможные виды неопределённостей:

- лингвистическая неопределённость или неопределённость терминологии;
- многозначность возможных целей и задач;
- ситуационная неопределённость (неточность знаний об управляющей системе, управляемом объекте, окружающей среде);
- наличие альтернативных способов решения (например, способов борьбы с ЧС);
- неточность прогноза ситуации и последствий принятия решений;
- неопределённости моделей (не учитываемые ограничения в используемых моделях, ошибки в принятых аналитических и логических соотношениях и предположениях);
- следствия противоборства интересов различных сторон;
- человеческий фактор.

Заметим, что данные виды неопределённостей могут быть детализированы при рассмотрении конкретных объектов и процессов.

Предложен алгоритм обоснования учёта значимых для безопасности неопределённостей, в основу которого положен принцип приемлемого риска. Возможность и целесообразность снижения неопределённости оценивается по показателям времени и стоимости достижения результата.

Рассмотрены основные подходы к учёту неопределённости: теория погрешностей, метрология, теория вероятностей и другие.

Разработана концептуальная схема градации параметрической неопределённости, пригодная для решения различных задач и введения количественных оценок. Предложенная концепция может служить

основой для создания моделей исчисления других неопределённостей.

"Объект" исследования неопределённости

Проблема оценки неопределённости при управлении сложными системами является междисциплинарной, что вызвано разнородностью факторов влияния и их показателей. Для сужения задачи следует уточнить "объект", неопределённость которого исследуют.

В работах [8—13] такой "объект" охарактеризован. Выделены классификационные критерии Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ): разделение на пространственные участки по различным показателям; разделение на ведомственные опции (организации, действующие в АЗРФ); разделение на проекты развития АЗРФ; разделение на основные проблемы развития, свойственные АЗРФ. Выделенные классы имеют свои структуры. Решение той или иной задачи в рамках АЗРФ подразумевает выбор элементов различных классов.

Вопросы промышленно-природной безопасности полярных регионов составляют объект исследований. В качестве предмета исследований выступают информационно-аналитические технологии обеспечения рискоустойчивого функционирования критических инфраструктур АЗРФ.

В сфере техногенно-экологической безопасности арктических регионов выделены следующие классы: источники и объекты воздействия опасностей, опасные процессы и объекты, взаимодействующие ведомства, масштабы (возможных уровней ЧС).

Информационная технология борьбы с ЧС в АЗРФ может быть разбита на следующие этапы:

- концептуальное моделирование решаемой задачи,
- нормативно-методическое обеспечение,
- доступ к архивным и иным данным,
- математическое моделирование задачи,
- компьютерное моделирование (расчёты),
- публикация выходного (планирующего) документа.

Эти функции, их структура и характеристики информации, описание типового планирующего документа также приведены в упомянутых публикациях.

Методология учёта неопределённости

Для конкретизации и примера в качестве типового рассмотрим, так называемый, планирующий документ (ПД).

Во-первых, на взгляд авторов, в любом законченном ПД необходимо указывать, проводился или нет учёт неопределённости, и если да, то в каком объёме. Например, можно предложить такую градацию:

- нет учёта неопределённости вообще, $H = 0$ (H — степень учёта неопределённости);
- выполнен качественный учёт неопределённости той или иной информации, $H = 0,2$;

- выполнен количественный учёт погрешностей ряда параметров, $H = 0,4$;
- проведён вероятностный и/или нечёткий, и/или сценарный анализ, $H = 0,6$;
- определена точность и надёжность (доверительные интервалы) статистических оценок, $H = 0,8$;
- максимально возможный анализ, "бюджет неопределённости", $H = 1$.

Далее определяют тему, цель, структуру и содержание ПД. Например, в указанных работах [8—13] отмечены такие возможные разделы документа: информационно-справочный (цели и задачи, описание объекта); анализ опасностей и рисков аварий (факторы и причины, вероятности и возможные ущербы); борьба с авариями (организация сил и средств, технологии локализации и ликвидации, мероприятия по снижению риска).

Намечают направления, виды возможной оценки неопределённости. В результате формируется таблица (см. рисунок).

Виды учёта неопределённости → Разделы ПД↓	<i>l</i>	...	<i>j</i>	...	<i>n</i>
<i>l</i>					
...					
<i>i</i>					
...					
<i>m</i>					

Таблица возможного учёта неопределённости ПД

Определяют клетки таблицы, для которых будет выполнена оценка неопределённости.

Для выделенных клеток выбирают формы и методы оценки. При их выборе учитывают основные положения упомянутого ранее алгоритма.

Производят учёт неопределённости выделенных клеток по выбранным методам.

Затем необходимо сравнить результаты учёта, именно, выявить наиболее вероятные и наиболее опасные ошибки и последствия.

Заключение

Любая авария, в принципе, есть следствие наличия той или иной неопределённости, т. е. следствие игнорирования или недостаточного учёта некоторой потенциально доступной информации, что может в итоге привести к незапланированным потерям.

Приведены общие положения, принятые при оценке неопределённости.

Проведено описание объекта и предмета исследований — вопросов информационно-аналитического обеспечения рискоустойчивого функционирования критических инфраструктур АЗРФ.

Намечена методология учёта неопределённости на примере типового планирующего документа: составление таблицы учёта и выделение наиболее вероятных и наиболее опасных ошибок и последствий.

В дальнейшем планируются исследования неопределённости при оценке безопасности конкретных объектов и процессов АЗРФ.

*Работа выполнена в рамках темы НИИР
122022800547-3 "Разработка теоретических
и организационно-технических основ
информационной поддержки управления
жизнеспособностью региональных критических
инфраструктур Арктической зоны
Российской Федерации".*

ЛИТЕРАТУРА

1. "Норникель" потратил на ликвидацию ЧП под Норильском 11,5 млрд руб. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/4509463> (дата обращения: 01.06.2023).
2. Обзор аварии, приведшей к разрушению резервуара №5 на ТЭЦ-3. Независимая экологическая консультативная поддержка для ЕТТ Норникель [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.nornickel.ru/files/ru/media-library/presentation/erm-1a-report-for-nornickel-ett-public-issued-25-11-20-rus.pdf> (дата обращения: 01.06.2023).
3. Обзор текущих событий компании "Норильский никель". 29 марта 2021 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.nornickel.ru/upload/iblock/aeb/Norilsk_Nickel_Investor_presentation_Mar_29_2021_Final_RUS.pdf (дата обращения: 05.06.2023).
4. Норникель обрёл уверенность в инвестиционной программе. Обзор [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.interfax.ru/business/758071> (дата обращения: 05.06.2023).
5. В Ростехнадзоре назвали причины аварии на шахте "Мир" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gosnadzor.ru/news/64/2018/> (дата обращения: 06.06.2023).
6. Акт технического расследования причин аварии, произошедшей 17 августа 2009 года в филиале Открытого Акционерного Общества "Русгидро" — "Саяно-Шушенская ГЭС имени П. С. Непорожнего" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.energystate.ru/news/files/Sayano-Shushenskaya-GES--akt-rassledovaniya.pdf> (дата обращения: 07.06.2023).
7. Субботин А., Розенталь О. Чисто по ГОСТу. Будет ли прок от новых стандартов качества воды? // Поиск. 2023. № 18–19. С. 6—7.
8. Яковлев С. Ю. Проблема учёта неопределённости при управлении региональной безопасностью // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. Т. 8. № 3–8. С. 54—61.
9. Яковлев С. Ю., Маслобоев А. В., Шемякин А. С. Неопределённость в задачах управления региональной промышленно-экологической безопасностью // Информационно-технологический вестник. 2020. № 3(25). С. 142—158.
10. Яковлев С. Ю., Шемякин А. С. Методы и программные средства информационного обеспечения техносферной безопасности полярных регионов // История науки и техники. 2019. № 4. С. 46—54.
11. Yakovlev S., Putilov V., Masloboev A. Information and analytical support for the industrial and ecological safety management of Arctic communications // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V. 302 4th International Scientific conference Arctic: History and Modernity 17—18 April 2019, Saint Petersburg, Russian Federation.
12. Шемякин А. С., Яковлев С. Ю., Маслобоев А. В. Информационное обеспечение систем управления промышленно-экологической безопасностью: концептуальные основы и практические приложения // Экономика. Информатика. 2020. Т. 47. № 4. С. 828—841.
13. Яковлев С. Ю., Шемякин А. С. Нормативно-правовые основы управления развитием Северного морского пути // Труды Кольского научного центра РАН. 2021. Т. 12. № 5(12). С. 148—156.

On assessment of uncertainty and risk in ensuring the integrated security of the Arctic zone of the Russian Federation

S. Yu. YAKOVLEV, A. S. SHEMYAKIN

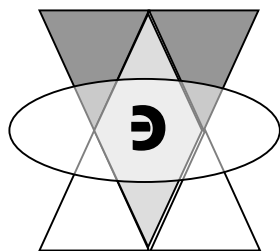
Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling — Subdivision
of the Federal Research Centre "Kola Science Centre of the RAS",
Apatity, Murmansk region, Russia

An analysis of the most dangerous errors and consequences was carried out, for the reasons for which some important, unrecorded event (accident, emergency) occurred (or may occur). The basic concepts in assessing uncertainty are presented. A brief description of the main object and subject of uncertainty research is given. Possible methods for taking into account uncertainty are considered. A methodology has been formulated for assessing uncertainty and risk in ensuring the comprehensive security of the Arctic regions of the Russian Federation. Issues of information and analytical support for industrial and natural safety of critical infrastructures are considered.

Keywords: uncertainty, risk, technogenic and environmental safety, planning document.

Bibliography — 13 references.

Received June 27, 2023



Внедрение экологически безопасных технологий

УДК 502.7

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_4_59

EDN: PDFLZA

О возможности повышения эффективности промышленных производств строительных материалов. Особенности взаимодействия портландцементов с наноматериалами различной природы в области их малых концентраций в водоцементных системах

Е. С. ШИТИКОВ, канд. техн. наук

ООО НПП «Полигран», г. Калининград, Россия

В. А. ШАЦКАЯ; Е. А. БЕЛЯЕВА, канд. техн. наук

АО НПО «Стеклопластик», рп. Андреевка, г. Солнечногорск, Московская обл., Россия

С. П. КАРЛОВ, канд. техн. наук

Московский политехнический университет, Москва, Россия

Е. В. ГОРДЕЕВА

ЦЛНМГАЗ АО ЦНИИТС, Москва, Россия

В. В. БАРДУШКИН, д-р физ.-мат. наук

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград, Москва, Россия

Изучено взаимодействие отечественных портландцементов с наноматериалами различной природы на конкретных примерах различных цементно-бетонных смесей. Установлено, что изменение прочностных характеристик бетонов, а также изменение удельной поверхности частиц цемента в водоцементных системах в зависимости от содержания наноматериалов имеет аналогичный и преимущественно волнообразный характер, вид которого для разных пар цемент—наноматериал различается. Установлены оптимальные диапазоны концентраций наноматериалов в области их малых значений, обеспечивающих повышение прочности конечных продуктов на 18—40 %. Показана возможность ускоренного предварительного определения этих оптимальных диапазонов наноматериалов с помощью анализаторов распределения частиц цемента по размерам в водных суспензиях и суспензиях в изопропиловом спирте.

Ключевые слова: портландцемент, наномодификаторы, удельная поверхность, анализаторы распределения частиц.

Шитиков Евгений Сергеевич, директор.

E-mail: esh_45@mail.ru

Шацкая Виктория Алексеевна, младший научный сотрудник.

E-mail: vshackaya786@gmail.com

Беляева Евгения Алексеевна, заведующая лабораторией.

E-mail: evgeniya284@mail.ru

Карлов Сергей Петрович, доцент кафедры электротехники.

E-mail: karlovsp@yandex.ru

Гордеева Елена Викторовна, заведующая сектором.

E-mail: Teremok-66@mail.ru

Бардушкин Владимир Валентинович, доцент, профессор

Института физики и прикладной математики.

E-mail: bardushkin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27 июля 2023 г.

© Шитиков Е. С., Шацкая В. А., Беляева Е. А., Карлов С. П., Гордеева Е. В., Бардушкин В. В., 2023

В ранее опубликованных сообщениях [1—3] была показана возможность значительного увеличения степени использования золы-уноса ТЭС, работающих на твердом топливе, и мусоросжигательных заводов в производствах строительных материалов за счёт ускорения процессов гидратации портландцементов и стимуляции пуццолановых реакций в золах-уноса применением активированной воды затворения бетонных смесей и наномодификаторов-микродобавок порошков или золей наноразмерных частиц. При этом введение золы-уноса в водоцементные системы при определённых соотношениях компонентов способствовало росту прочностных характеристик бетонов, снижению удельного расхода цемента в бетонных смесях и, как следствие, сниже-

нию себестоимости бетонов. В работе [4] показана возможность эффективного применения в производствах цементных растворов для мелкозернистых и тяжёлых бетонов в транспортном строительстве малых концентраций добавок нанокремнезёма, а также пластифицирующих реагентов в несколько раз меньших количествах по сравнению с обычно используемыми в производстве бетонов [5].

Цель работы — изучение особенностей взаимодействия портландцементов отечественных производителей с наноматериалами различной природы в качестве активирующих добавок в области их малых концентраций, а также определение величины удельной поверхности частиц цементов $S_{уд}$ в водных системах как в присутствии наночастиц, так и без них. Работа направлена на расширение представлений о процессах в водоцементных системах с наночастицами и применение результатов в производственной практике.

Объекты и методы исследования

В работе использовали следующие материалы.

1. Образцы портландцементов отечественных производителей:

- белгородский, марки ПЦ 500 ДОН с удельной поверхностью $210 \text{ м}^2/\text{кг}$;
- горнозаводский, марки ПЦ 500 Д0 с удельной поверхностью $170 \text{ м}^2/\text{кг}$;
- мальцовский, марки ПЦ 500 ДОН с удельной поверхностью $210 \text{ м}^2/\text{кг}$;
- новороссийский, марки ПЦ 500 ДОН с удельной поверхностью $270 \text{ м}^2/\text{кг}$;
- якутский, марки ПЦ 400 Д0 с удельной поверхностью $190 \text{ м}^2/\text{кг}$;
- сухоложские тампонажные, марки ПЦТ-1-50 и ПЦТ-1-Г.

2. Наномодификаторы:

- углеродные со структурой алмазов, т. н. ультрадисперсные алмазы (УДА) в виде золя или порошка;
- наноцеллюлоза в виде водного геля;
- нанопинель магниевая MgAl_2O_4 в виде порошка;
- камчатский геотермальный нанокремнезём в виде золя или порошка.

Максимальные значения размеров наночастиц не превышали 100 нм.

3. Пластифицирующие добавки:

- поликарбоксилатные гиперпластификаторы от фирмы Sika Visko Crete N 5 (ПК) и суперпластификаторы С-3.

4. Наполнители:

- речной песок с размером частиц 2,1–2,3 (П);
- гранитный щебень фракции 5–20 мм (Щ).

Экспериментальную работу проводили, используя несколько водоцементных систем: цемент—вода (базовый вариант), цемент—вода+наноматериалы, цемент—вода+наноматериалы+пластификаторы, а также последний состав с наполнителями при водоцементном отношении. Образцы формировали в соответствии с нижеуказанными нормативными документами в виде стандартных балочек $4 \times 4 \times 16 \text{ см}$,

которые после твердения в нормальных условиях испытывали на прочность при сжатии и изгибе на типовом сертифицированном оборудовании строительных лабораторий.

Эффект взаимодействия наномодификаторов с портландцементными оценивали по изменению прочности образцов бетона относительно прочности бетонов базовых вариантов.

При выполнении работы руководствовались положениями нормативных документов:

- ГОСТ 310.1-76, ГОСТ 310.3-76, ГОСТ 310.4-81, ГОСТ 310.6.85 Цементы. Методы испытаний;
- ГОСТ 10181-2012 Смеси бетонные. Методы испытаний.

Воду для приготовления водоцементных смесей брали из московской городской водопроводной сети (ГОСТ 23732-2011 Вода для бетонов и цементных растворов).

Кроме того, для оценки эффектов взаимодействия портландцементов с наноматериалами также определяли величины удельной поверхности частиц цементов $S_{уд}$ в водных системах (суспензиях) как в присутствии наночастиц, так и без них.

$S_{уд}$ измеряли с помощью японского прибора Horiba Sapa-700 Particle Analyzer.

Процесс определения $S_{уд}$:

Предварительно приготовленную суспензию наноматериала определенной концентрации относительно массы навески цемента, которая составляла 0,1 г, заливали в измерительную ячейку емкостью 20 мл и всыпали указанную навеску цемента.

Смесь перемешивали в течение нескольких секунд, затем ячейку помещали в измерительный прибор.

Распечатка результатов измерений содержала гистограмму распределения частиц цемента по размерам и расчёт на её основе удельной поверхности частиц цемента в суспензии, т. е. площадь поверхности частиц, отнесённая к массе цемента в навеске.

В качестве жидкой среды для приготовления цементных суспензий использовали воду, гидратирующую цемент, и изопропиловый спирт, не гидратирующий цемент. Результаты оказались практически идентичными.

Очевидно, что за несколько секунд перемешивания суспензий гидратация цементов в воде не успевала оказывать существенное влияние на результаты измерений $S_{уд}$, поэтому в дальнейшем измерения проводили в цементных суспензиях на основе как изопропилового спирта, так и воды.

Для примера, в табл. 1 приведены данные распределения частиц цемента марки ПЦТ-1-Г в суспензии как в присутствии наночастиц кремнезёма, так и без них.

Из табл. 1 видно, что распределение частиц по размерам цементной суспензии с нанокремнезёмом сместилось преимущественно в сторону больших размеров частиц. Это свидетельствует о том, что при данной концентрации нанокремнезёма происходит укрупнение, агрегация частиц цемента за счёт снижения содержания более мелких.

Расчёт значений удельной поверхности частиц цемента в водной суспензии показал существенное снижение этой величины в присутствии наночастиц с $208 \text{ м}^2/\text{г}$ до $152 \text{ м}^2/\text{г}$ (т. е. на 25 %).

Таблица 1

Распределение частиц тампонажного цемента марки ПЦТ-1-Г в суспензии по размерам

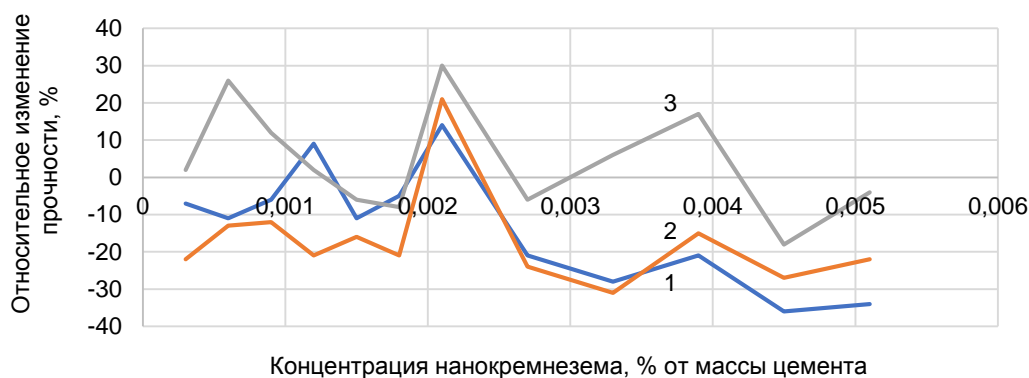
Диапазон размеров частиц цемента, микрон	Относительное содержание в исходном цементе, %	Относительное содержание в цементе с нанокремнеземом при его содержании 0,004 % от массы цемента, %
До 1,0	8,0	5,5
От 1 до 2	6,5	1,5
От 2 до 3	7,5	1,0
От 3 до 4	6,5	3,0
От 4 до 5	5,5	2,5
От 5 до 6	5,0	3,5
От 6 до 7	4,5	4,0
От 7 до 8	4,0	4,0
От 8 до 9	3,5	5,5
От 9 до 10	3,0	5,0
От 10 до 20	24,0	37,0
От 20 до 30	8,0	9,0
От 30 до 40	10,0	5,0
От 40 до 50	3,0	4,5
От 50 до 60	1,0	0,5
От 60 до 70		0,5
От 70 до 80		0,5
От 80 до 90		3,5
От 90 до 100		0,5

Результаты исследований и их обсуждение

Авторы провели анализ полученных данных по зависимости относительных изменений прочности бетонов и удельной поверхности частиц соответ-

ствующих цемента от концентрации наномодификаторов.

Результаты представлены на рис. 1—7 и в табл. 2—4.



- 1 — относительное изменение прочности при сжатии через 3 суток твердения
- 2 — относительное изменение прочности при изгибе через 3 суток твердения
- 3 — относительное изменение прочности при сжатии через 28 суток твердения

Рис. 1. Зависимость относительного изменения прочности образцов бетонов на основе спасского цемента ПЦ 400 Д0 и нанокремнезема от содержания наномодификатора в смеси

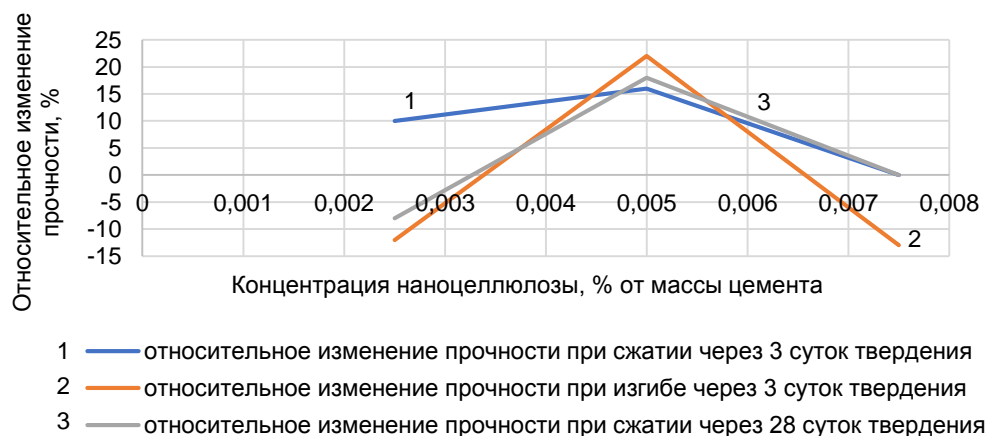


Рис. 2. Зависимость относительного изменения прочности образцов бетонов на основе белгородского цемента ПЦ 500 Д0 и наноцеллюлозы от содержания наномодификатора в смеси

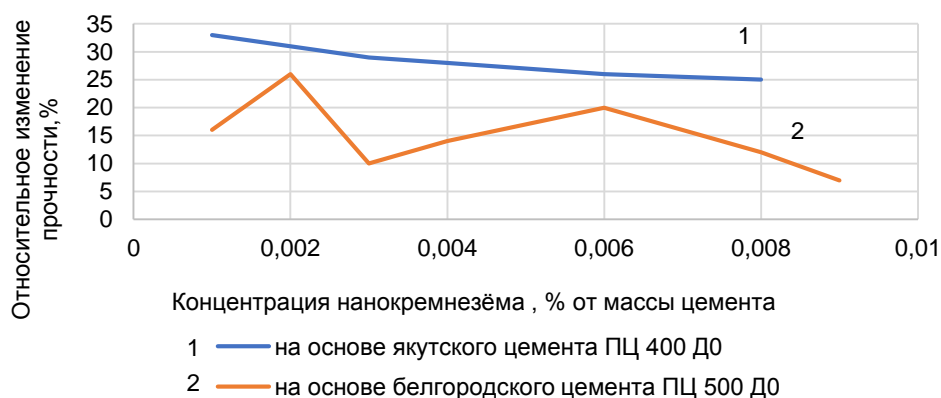


Рис. 3. Зависимость относительного изменения прочности образцов бетонов на основе указанных цементов и нанокремнезёма через 28 суток твердения от содержания наномодификатора в смеси

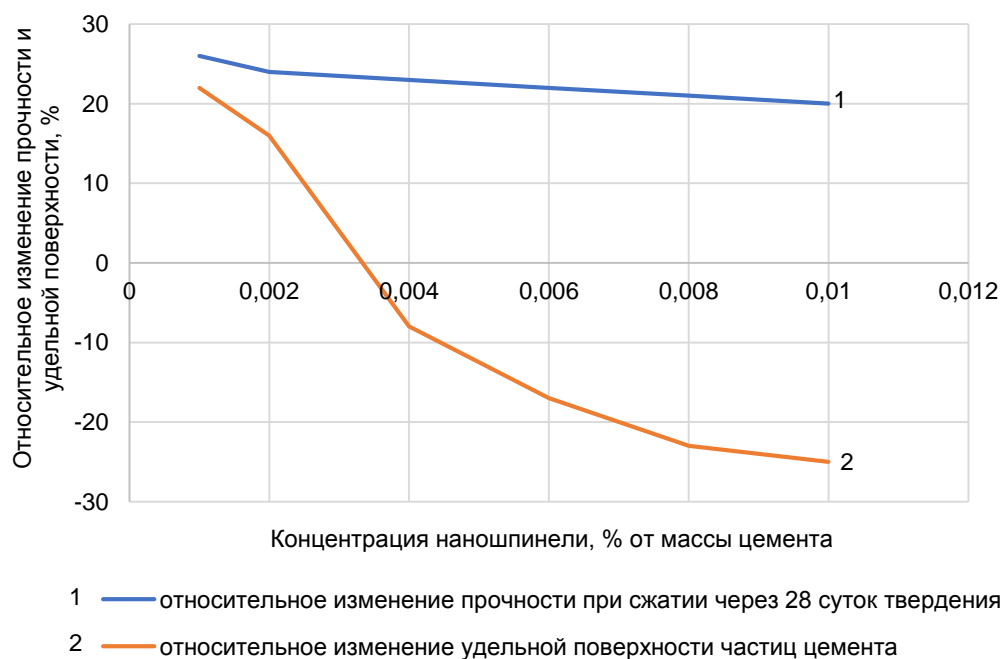


Рис. 4. Зависимость относительного изменения прочности образцов бетонов на основе якутского цемента ПЦ 400 Д0 и нанопинели через 28 суток твердения и относительного изменения величин удельной поверхности частиц цемента от содержания наномодификатора в смеси

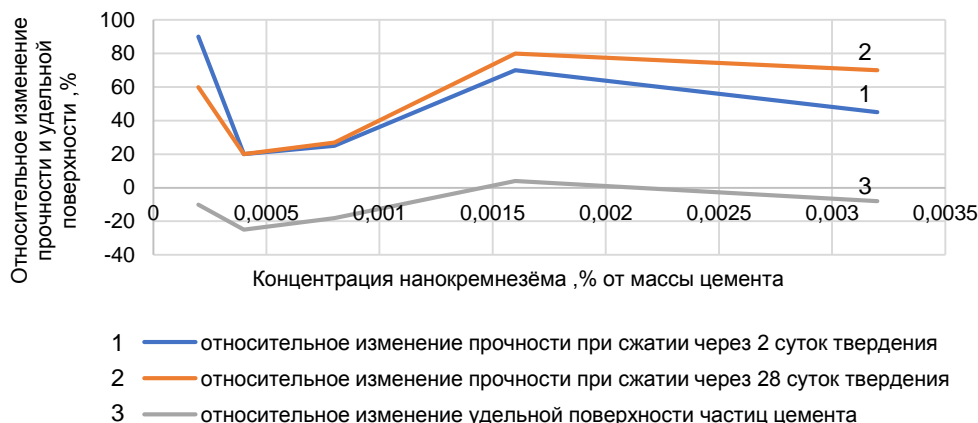


Рис. 5. Зависимость относительного изменения прочности при сжатии образцов бетонов на основе сухоложского тампонажного цемента ПЦТ-1-50 и нанокремнезёма и относительного изменения удельной поверхности частиц цемента от содержания наномодификатора в смеси

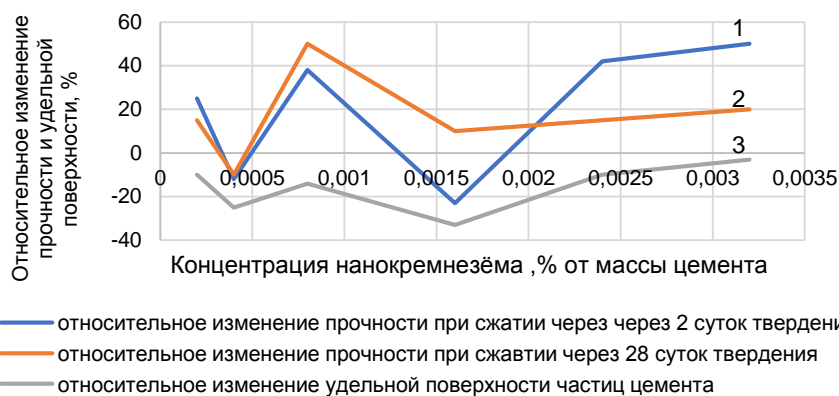


Рис. 6. Зависимость относительного изменения прочности при сжатии образцов бетонов на основе сухоложского тампонажного цемента ПЦТ-1-Г и нанокремнезёма и относительного изменения удельной поверхности частиц цемента от содержания наномодификатора в смеси

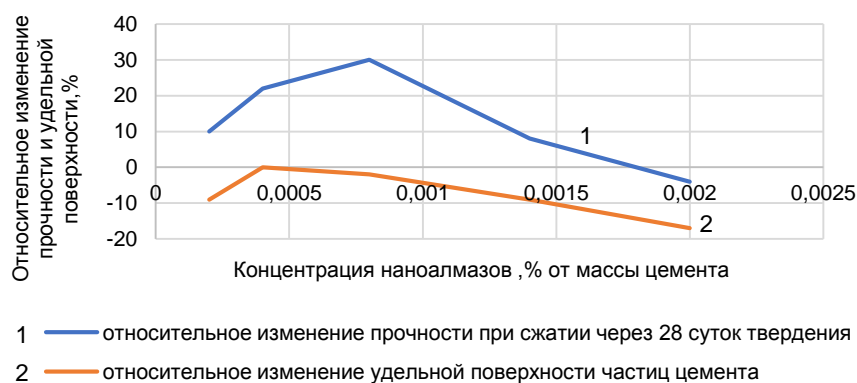


Рис. 7. Зависимость относительного изменения прочности при сжатии образцов бетона на основе белгородского цемента ПЦ 500 Д0 и нанокремнезёма и относительного изменения удельной поверхности частиц цемента от содержания наномодификатора в смеси

Обращает на себя внимание волнообразный характер зависимостей изменения прочности образцов бетонов от концентрации наномодификаторов. Наличие максимумов и минимумов (с уходом эффектов от применения наномодификаторов в отрицательную область — особенно при малых сроках твердения — рис. 1, 2, 5—7) в графиках оказалось характерным для всех исследованных типов портландцементов и наноматериалов, кроме образцов бетонов на основе якутского цемента ПЦ 400 Д0 с нанокремнезёмом и с

магниевого нанопинеля, для которых зависимости имеют линейный характер. Вид зависимости относительных изменений прочности бетонов аналогичен виду зависимости относительных изменений удельной поверхности частиц соответствующих цементов в смесях, а именно волнообразный как на рис. 5—7 и линейный как на рис. 4.

Такие совпадения дают основания для предположения, что предварительное определение оптимальных концентраций наномодификаторов или опти-

мальных их диапазонов с точки зрения повышения прочности бетона можно получать при использовании анализаторов распределения частиц по размерам в водных/изопропиловых суспензиях цемента и наномодификаторов как это было проведено в данной работе. Но возможность применения такого метода для более высоких концентраций, чем использовавшиеся в данной работе, надо проверять на каждом конкретном виде портландцемента. Тем более, что даже в изученном диапазоне концентраций наблюдались выпадения из общей картины. Так, из графика на рис. 4 видно, что при концентрации наномодификатора больше 0,002 % изменения величин удельной поверхности $S_{уд}$ для якутского цемента ПЦ 400 ДО с наношпинелью хотя и имеют падающий характер в зависимости от концентрации наношпинели, но в гораздо большей степени, чем снижение величин прочности и с выходом в отрицательную область изменений $S_{уд}$, чего для относительных изменений прочности не наблюдается.

Следует отметить, что несмотря на различный характер зависимостей изменения прочности при

сжатии от концентрации наномодификаторов для разных типов портландцементов, для большей их части имеются одинаковые или близкие характерные диапазоны концентраций наномодификаторов, отвечающих значительному росту величин прочности. Так, для нанокремнезёма — это концентрации 0,002 % и 0,006 % от массы цемента в бетонной смеси. В табл. 2—4 приводятся конкретные данные, подтверждающие повышенную эффективность взаимодействия нанокремнезёма при этих концентрациях как в цементных растворах (табл. 2) или мелкозернистых бетонах (табл. 3), так и в тяжёлых бетонах (табл. 4).

Уместно также отметить, что графики относительного изменения прочности при сжатии как в ранние, так и поздние сроки твердения практически имеют одинаковый характер во всём диапазоне концентраций наномодификаторов — рис. 1 и 2, а относительные изменения прочности при изгибе находятся в противофазе относительным изменениям прочностей при сжатии вплоть до концентрации наномодификаторов 0,002 %, после которой все зависимости становятся синфазными.

Таблица 2

Величины прочности при сжатии образцов бетона с нанокремнезёмом и без наномодификатора после 28 суток твердения при указанной концентрации поликарбоксилатного гиперпластификатора. Белгородский портландцемент ПЦ 500 ДО. Концентрация нанокремнезёма 0,006 % от массы цемента

№ п/п	Количество пластификатора ПК от массы цемента, %	Прочность при сжатии образцов без наномодификатора, МПа	Прочность при сжатии образцов с наномодификатором, МПа	Относительное изменение прочности, %
1.	0	52,3	60,5	+ 16
2.	0,04	55,1	66,0	+ 18
3.	0,06	64,2	72,1	+ 12,5
4.	0,09	72,4	80,5	+ 11
5.	0,17	75,0	87,5	+ 16,5

Таблица 3

Относительное изменение прочности при сжатии образцов мелкозернистых бетонов (Ц:П = 1:1,5 ... 1:3) после 28 суток твердения при использовании нанокремнезёма и пластификаторов бетонных смесей

№ п/п	Тип пластификатора и его содержание в бетонной смеси, % от массы цемента	Содержание наномодификатора, % от массы цемента	Относительное изменение прочности при сжатии образцов бетонов с наномодификатором, %	Тип портландцемента
1.	ПК, 0,05	0,006	+ 21	мальцовский
2.	ПК, 0,05	0,006	+ 24	якутский
3.	С-3, 0,50	0,002	+ 26	горнозаводский
4.	С-3, 0,50	0,002	+ 13	новороссийский

Таблица 4

Относительное изменение прочности при сжатии образцов тяжёлых бетонов с нанокремнезёмом и пластификаторами при сжатии после 28 суток твердения. Цемент белгородский ПЦ 500 ДО

№ п/п	Количество цемента в бетонной смеси, кг/м ³	Соотношение компонентов в смеси, Ц:П:Щ	Содержание пластифицирующих добавок, % от массы цемента	Содержание наномодификатора, % от массы цемента	Относительное изменение прочности образцов с наномодификатором, %
1.	310	1 : 2,8 : 3,3	ПК, 0,08	0,002	+ 47
2.	360	1 : 2,1 : 3,0	ПК, 0,08	0,002	+ 40
3.	380	1 : 2,2 : 2,9	ПК, 0,08	0,002	+ 22
4.	440	1 : 1,7 : 2,4	С-3, 0,50	0,006	+ 28

Выводы

На основании полученных в работе результатов:

- Установлено, что зависимости прочностных характеристик бетонов, а также зависимости удельной поверхности частиц соответствующих цементов в водцементных системах от содержания в них наномодификаторов имеют схожий и преимущественно волнообразный характер, вид которого для разных пар "цемент-наномодификатор" различается.
- Установлены оптимальные диапазоны концентраций наномодификаторов в области их малых значений (0,001—0,006), обеспечивающие повышение прочности конечных продуктов на 18—40 %.
- установлена возможность ускоренного предварительного определения оптимальных диапазонов концентрации наномодификаторов с помощью анализаторов распределения частиц цементов по размерам в водных суспензиях и суспензиях в изопропиловом спирте для каждой пары цемента и наномодификатора, что существенно снижает стоимость проводимых исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пузач В. Г., Шустров Н. Н., Шитиков Е. С. Инновационная технология утилизации золо-шлаковых отходов тепловых электростанций на твердом топливе для получения строительных материалов // Экология промышленного производства. 2012. № 2. С. 16—18.
2. Пузач В. Г., Шустров Н. Н., Червяков В. М., Шитиков Е. С. О возможности повышения эффективности промышленных производств строительных материалов // Экология промышленного производства. 2019. № 2. С. 49—53.
3. Пузач В. Г., Шустров Н. Н., Червяков В. М., Жолтовский А. И., Шитиков Е. С. О возможности повышения прочности бетонов, содержащих шлаки и золы тепловых электростанций на твердом топливе и мусоросжигательных заводов // Экология промышленного производства. 2019. № 3. С. 38—41.
4. Пузач В. Г., Шустров Н. Н., Шитиков Е. С., Шацкая В. А., Гордеева Е. В. О возможности повышения прочности бетонов, содержащих кремнезем, шлаки и золы тепловых электростанций на твердом топливе и мусоросжигательных заводов // Экология промышленного производства. 2021. № 3. С. 8—13.
5. Пузач В. Г., Шустров Н. Н., Шитиков Е. С., Вахрушев Л. П., Шацкая В. А. О возможности повышения эффективности производств строительных материалов. Особенности действия добавок, пластифицирующих бетонные смеси // Экология промышленного производства. 2020. № 4. С. 6—14.

About the possibility of improving efficiency industrial production of building materials. Features of the interaction of Portland cements with various types of nanomaterials in the area of their low concentrations in water-cement systems

E. S. SHITIKOV

LLC NPP "POLYGRAN", Kaliningrad, Russia

V. A. SHATSKAYA, E. A. BELYAEVA

NPO "Stekloplastic", Andreevka, Solnechnogorsk, Moscow region, Russia

S. P. KARLOV

Moscow Polytechnical University, Moscow, Russia

E. V. GORDEEVA

CLNMGAS JSC CNIITS, Moscow, Russia

V. V. BARDUSHKIN

National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, Moscow, Russia

In the work, on specific examples of various cement-concrete mixtures, the interaction of local portland cements with various types of nanomaterials was studied. It has been established that the change in the strength characteristics of concrete, as well as the change in the specific surface area of cement particles in water-cement systems, depending on the content of nanomaterials, has a similar and predominantly wavy nature, the form of which differs for different cement-nanomaterial pairs. The optimal concentration ranges of nanomaterials in the range of their low values have been established, which provide an increase in the strength of the final products by 18—40 %. The possibility of accelerated preliminary determination of these optimal ranges of nanomaterials using cement particle size distribution analyzers in aqueous suspensions and suspensions in isopropyl alcohol is shown.

Keywords: portland cement, nanomodifiers, point surface, particle distribution analyzers.

Bibliography — 5 references.

Received July 27, 2023

Экология промышленного производства: Межотр. науч.-практ. журнал / ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2023. Вып. 4. С. 1—68.

Компьютерная верстка: *Н. В. Ильина, К. В. Трыкина*

Подписано в печать 20.11.2023.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 7,9. Уч.-изд. л. 8,2.

Тираж 250 экз. Заказ 2026.

Свободная цена.

Адрес редакции: 125424, Москва,
Волоколамское ш., 77.

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».

<http://ntckompas.ru>

Отпечатано: 101000, Москва,

Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, помещ. IX, ком. 15, 16

ООО «Спиди-Принт.ру»

Индекс 80090.

Правила для авторов по оформлению рукописей статей, предлагаемых к публикации в журналах

Направляя рукопись статьи в редакцию журнала, авторы передают редколлегии и издателю журнала безвозмездное неисключительное право опубликовать ее на русском языке в качестве статьи в печатной и электронной версиях журнала в сети Интернет. При этом за авторами сохраняются их интеллектуальные права на рукопись статьи (в том числе "авторское право"). В связи с этим и с учетом Четвертой части (Раздел VII) Гражданского кодекса РФ авторами должно быть представлено в редакцию письмо в следующей форме:

Лицензионный договор о передаче права на публикацию (издательский лицензионный договор)

Мы, нижеподписавшиеся, авторы рукописи,
предоставляем редколлегии журнала и издателю ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»
.....
(название журнала)

безвозмездную простую (неисключительную) лицензию на публикацию рукописи статьи как в печатной, так и в электронной версиях журнала.

Мы подтверждаем, что данная публикация не нарушает интеллектуальных прав других лиц или организаций.

Подписи авторов: (ф.и.о., ученая степень, дата)

Статья должна быть подписана всеми авторами. В случае нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией. Рукопись статьи направляется на адрес редакции журнала: 125424, Москва, Волоколамское ш., д. 77, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», Редакция журнала. Дополнительная информация может быть получена в редакции при обращении по телефону: 8 (495) 491-43-17 или по E-mail: izdanie@ntckompas.ru.

Каждая статья рецензируется в соответствии с решением редколлегии журнала. Рецензенты выбирают из числа ученых и специалистов, компетентных в вопросах, рассматриваемых в статье, и имеющих собственные публикации в данном направлении. Решение о порядке публикации статьи принимается редколлгией с учетом мнения рецензентов. В случае разногласий среди членов редколлегии окончательное решение принимает главный редактор. При полном отклонении рукописи статьи от публикации редакция журнала направляет авторам мотивированный отказ. По этому факту редакция не вступает в полемику с авторами.

Комплектование статьи (обзора)

Статья должна быть представлена в редакцию в следующем комплекте:

- сопроводительное письмо, подписанное руководством организации;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати и распространения в Российской Федерации и других государствах. При отсутствии в организации экспертной комиссии вме-

сто экспертного заключения может быть представлено соответствующее заявление на имя главного редактора журнала от имени руководства организации, где работают авторы. В экспертном заключении или заявлении в обязательном порядке должна быть отражена возможность открытой публикации и передачи публикуемых материалов за границу.

- лицензионный договор по приведенному образцу;

- рукопись статьи — объем статьи (без рисунков) не должен превышать 10 страниц формата А4 при 1,5 межстрочных интервалах, а объем статьи обзорного характера — 20 страниц. Рекомендуемая гарнитура — New Times Roman. Размер шрифта — 12;

- Материал статьи представляется в редакцию в печатном виде (на бумажном носителе) и в электронном варианте с текстом в формате Word на электронную почту.

Оформление статьи:

- статья начинается с указания УДК;
- название статьи набирается строчными буквами (кроме начальной прописной) полужирным шрифтом, размер шрифта 14, для остального текста используется простой шрифт размером 12, причем рекомендуемая гарнитура шрифта — Times New Roman;
- после названия — список авторов, инициалы авторов предшествуют их фамилиям;

- далее представляется аннотация статьи (10—15 строк с раскрытием цели работы и её основных результатов);

- далее приводится список ключевых слов для данной статьи (не более десяти);

- страницы текста нумеруются без пропусков и добавлений литерных обозначений (типа 1а, 2б и т. п.), причем в сквозную нумерацию должны быть включены все элементы статьи;

- внизу первой страницы текста помещается отдельный абзац (с полужирным шрифтом), содержащий контактную информацию об авторе (или авторах) в следующем виде: фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, почтовый адрес предприятия, телефон, E-mail;

- основной текст статьи должен начинаться с четкой постановкой цели и задач работы, сопровождаемой аргументами в пользу ее выполнения на фоне существующего состояния затронутой в статье проблемы. Дальнейший текст статьи также должен иметь смысловые рубрикаторы (разделы и подразделы) без их нумерации. Заканчиваться статья должна отдельным разделом «Заключение» с перечислением основных результатов, следующих из них выводов и, по возможности, предложений по развитию исследований и использованию их результатов.

- после основного текста — список использованных источников "Литература" (не менее 5 источников); Список использованной литературы должен соответствовать всем ссылкам на внешние источники в тексте статьи. Ссылки оформляются в квадратных скобках, например, [1—6], [7, 8]. Внутренние ссылки, т. е. ссылки на формулы, рисунки и таблицы статьи оформляются с использованием круглых скобок, например, формула (1), уравнение (4), (рис. 3), (табл. 2). Любые ссылки в подписях к рисункам и в самих рисунках не рекомендуются;

- далее размещается подробная англоязычная информация о статье: название статьи, фамилия и инициалы авторов (английская транслитерация), предприятие, аннотация, ключевые слова (Keywords).

Оформление рисунков:

- рисунки и графики вставляются непосредственно в нужном месте в статье и в желаемом масштабе.

- рядом с осями графиков указываются отображаемые физические величины только в символьной (буквенной) форме, а через запятую — размерность величины по-русски (прямым шрифтом). Различные кривые на графиках рекомендуется нумеровать, даже если они характеризуются отдельным цветом или типом линии. Графики представляются только на

белом фоне. Вспомогательные сетки на площади графика не допускаются;

- подписи под соответствующими рисунками (полужирный курсивный) представляются в нужных местах текста. Каждая подпись должна быть по возможности лаконичной, но емкой по содержанию.

Оформление формул:

- простые формулы вводить в текст в формате используемого текстового редактора, более сложные формулы — с использованием редактора формул MathType;

- стандартные математические обозначения (например, \max , \log , \sin , \exp и т. д.) должны быть набраны прямо. То же относится к цифрам и числам;

- для символьного обозначения не векторных физических (технических) величин использовать только латинский и греческий алфавиты, при этом в тексте для греческих букв использовать прямой шрифт, для латинских букв — наклонный шрифт (курсив);

- векторы и матрицы обозначать полужирным прямым шрифтом;

- для нижних и верхних индексов применять арабские цифры, латинские или греческие буквы. Если индекс представляет собой сокращенную форму русского слова — характеристики, то допустимо использовать в его обозначении русские буквы (прямой шрифт), например $U_{\text{вх}}$, $I_{\text{вых}}$, $v_{\text{гр}}$ и т. п.

- размерность физических величин обозначается всегда только по-русски прямым шрифтом.

Оформление таблиц:

- содержание таблицы не должно дублировать данные, приводимые на графиках или в тексте;

- графы должны иметь название без сокращения отдельных слов.

Рисунки, формулы и таблицы должны иметь свою отдельную сквозную нумерацию. Если на конкретную формулу нет дополнительных (возвратных) ссылок в тексте или она в единственном числе, то нумерация ее не нужна. Единственные таблица и/или рисунок также не нумеруются.

При публикации в журнале каждая статья (в контактной информации) сопровождается сноской со знаком охраны авторского права ©, поставленным перед фамилией автора (фамилиями авторов) и годом издания.

Авторы (или автор) каждой статьи после выхода журнала в свет имеют право на получение от редакции электронной версии статьи в PDF-формате (редактор Adobe Acrobat).