

ЭКОЛОГИЯ

промышленного
производства

Индекс 80090



ЭКОЛОГИЯ

промышленного
производства



МЕЖОТРАСЛЕВОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

Выпуск 1
Москва 2021



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 1 (113)

Издается с 1993 г.

Москва 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ, УТИЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕРАБОТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Абдрахимов В. З. Использование отходов углеобогащения в производстве легковесного кирпича, способствующих оптимизации землеустройства и кадастров 2

Борисова О. Н. Сравнительный анализ технологий по сортировке отходов компании "Benli Recycling Group" и регионального оператора "ТБО "Экосервис" 8

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДООЧИСТКА

Красавцева Е. А., Светлов А. В., Макаров Д. В. Донные отложения прудков-отстойников системы очистки сточных вод как перспективное комплексное сырье 12

Ивановский В. С., Маркин И. В., Щелканова Е. С., Володяшкин Р. А. Бионанотехнологические аспекты очистки стоков системы водоотведения микроводорослями 17

Марцев А. А., Селиванов О. Г. Влияние природных минералов на физико-химические показатели питьевой воды 22

ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

Ахмадуллин И. Б., Волохин В. А., Гракович И. В., Кузнецов Н. П., Севрюков И. Т. Паспортизация пружинных клапанов в нефтяной отрасли как механизм снижения экологических рисков 26

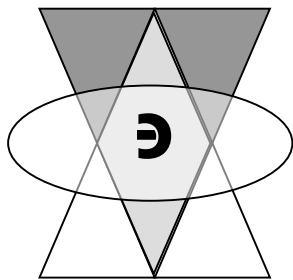
Черткин А. Г., Булычев С. Н., Васькова Е. А. Анализ влияния природных и антропогенных факторов на формирование катастрофических наводнений в низовье реки Амур 34

Косыгин В. Ю., Долгов Р. В., Катин В. Д., Ахтямов М. Х. Разработка нейросетевого алгоритма управления канцерогенными рисками в зонах влияния источников вредных выбросов из энергетических установок промышленных предприятий 41

ОЧИСТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ

Овчинников Е. В., Измайлов А. Ю., Уютов С. Ю., Федоткин Р. С. Система адаптации дизельного двигателя для работы в помещениях с ограниченным воздухообменом 46

Главный редактор А. Г. Ишков,д-р хим. наук, проф., акад. РАЕН,
заместитель начальника Департамента —
начальник Управления ПАО «Газпром»**Заместители главного редактора:****В. Ф. Гракович,** д-р техн. наук, проф., акад. РАЕН,
председатель правления Национального Фонда содействия устойчивому развитию регионов; **Н. П. Кузнецов,**
д-р техн. наук, проф., Ижевский государственный
технический университет им. М. Т. Калашникова**Ответственный секретарь К. В. Трыкина,**
начальник отдела научных и информационных
изданий ФГУП «НТЦ оборонного комплекса
«Компас»**Редакционный совет:****А. М. Амирханов,** канд. биол. наук, зам. руководителя
Федеральной службы по надзору в сфере природо-
пользования; **Э. В. Гирсов,** д-р филос. наук, проф.,
акад. Российской экологической академии, Московская
государственная академия делового администрирования;
Н. П. Тарасова, чл.-кор. РАН, д-р хим. наук, проф.,
директор Института проблем устойчивого развития**Редакционная коллегия:****С. С. Бабкина,** д-р хим. наук, проф., Институт тонких
химических технологий Московского технологического
университета; **Я. И. Вайсман,** д-р мед. наук, проф.,
Пермский национальный исследовательский политех-
нический университет; **М. Н. Дадашев,** д-р техн. наук,
проф., РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина; **В. Г. Иса-
ков,** д-р техн. наук, проф., акад. Академии военных наук
РФ, Ижевский государственный технический универси-
тет им. М. Т. Калашникова; **М. А. Корепанов,** д-р техн.
наук, Институт прикладной механики Уральского отде-
ления РАН; **Б. С. Ксенофонтов,** д-р техн. наук, проф.,
МГТУ им. Н. Э. Баумана; **В. Ю. Мелешко,** д-р техн. наук,
проф., Институт химической физики им. Н. Н. Семенова
РАН; **В. В. Минасян,** канд. техн. наук, генеральный дирек-
тор ООО «Фрэкком»; **Е. А. Найман,** канд. техн. наук,
Краковский технический университет им. Тадеуша
Костюшко (Польша); **А. Ю. Недре,** канд. техн. наук, зам.
директора ФГАУ "НИИ "Центр экологической промы-
шленной политики"; **Е. И. Пупырев,** д-р техн. наук, проф.,
генеральный директор ОАО «МосводоканалНИИпро-
ект»; **И. Ш. Сайфуллин,** д-р хим. наук, проф., зам.
директора Научно-исследовательского института
инновационного развития промышленности Российского
экономического университета им. Г. В. Плеханова;
В. А. Тенев, д-р физ.-мат. наук, проф., Ижевский госу-
дарственный технический университет им. М. Т. Ка-
лашникова; **Ю. В. Трофименко,** д-р техн. наук, проф.,
директор Научно-исследовательского института энер-
гоэкологических проблем автотранспортного комплекса
при МАДИ© Федеральное государственное унитарное пред-
приятие «Научно-технический центр оборонного ком-
плекса «Компас» (ФГУП «НТЦ оборонного комплекса
«Компас»), 2021



Обезвреживание, утилизация и переработка промышленных отходов

УДК 658.567.1:691.421

Использование отходов углеобогащения в производстве легковесного кирпича, способствующих оптимизации землеустройства и кадастров

В. З. АБДРАХИМОВ, д-р техн. наук

Самарский государственный экономический университет, г. Самара, Россия

На основе отходов топливно-энергетического комплекса без применения природного традиционного сырья получены керамические легковесные кирпичи, плотность которых не превышает 1250 кг/м^3 . Исследуемые отходы имеют повышенную теплотворную способность, поэтому целесообразно использовать их не только в качестве отощителей, но и в качестве выгорающих добавок, что позволит исключить применение в составах керамических масс антрацита, коксовой мелочи и т. п. Выгорающие добавки не только повышают пористость керамических изделий, но также способствуют равномерному спеканию черепка. Исследования показали, что эффективное использование природных ресурсов, уменьшение загрязнения, низкие углеродные выбросы, предотвращение утраты экосистемных услуг и биоразнообразия снизят риски негативного влияния на окружающую среду.

Ключевые слова: отходы углеобогащения, легковесный кирпич, топливно-энергетический комплекс, землеустройство, кадастры, структура пористости.

Экологическая ситуация

Глобальная проблема нашей планеты — экологическая безопасность [1—3]. Современный экологический кризис в основном является кризисом редуцентов, которые уже не в состоянии разлагать все многообразие образовавшихся загрязнителей, произведенных человечеством, особенно тех, которые не имеют природных аналогов, а значит, и организмов для их утилизации и превращения в исходные химические элементы не существует [4—6]. Редуценты, или деструкторы (от лат. *reduco* — возвращаю, восстанавливаю), — организмы (в основном бактерии и грибы), которые разрушают отмершие останки живых существ, превращая их в неорганические и простейшие органические соединения.

Всем государствам необходимо: привести социальные и экономические потребности в соответствие

с ресурсовоспроизводящими возможностями природы. В противном случае человечество ждет исчезновение как вида. Принимая во внимание рост накопления загрязнений, следует ожидать, что в дальнейшем загрязнение будет становиться все более опасным, что неблагоприятно скажется на здоровье людей и состоянии окружающей природной среды [7—9]. Под действием антропогенных факторов природная ситуация катастрофически быстро меняется [10—13].

Постановка проблемы "экология и экономика" имеет явный подтекст невольного противостояния экономических устремлений человека и целей природы. Но в самих терминах содержится их смысловое единство, так как оба названия имеют один корень — "экос" (дом) и рассматривают две стороны глобального обитания человека в пределах Земли. Одной из причин такого противостояния является ограниченность природных ресурсов, включая естественные условия развития человечества. Ограниченность природных ресурсов существенно воздействует на производительные силы общества и через них — на социальные и производственные отношения.

Абдрахимов Владимир Закирович, профессор.
E-mail: 3375892@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2020 г.

© Абдрахимов В. З., 2021

Необходимо заменить преобладание экономических интересов взаимоотношений человеческого общества с окружающей природной средой на экологическое первенство, которое разумно определит экономическое развитие.

Землеустройство и кадастры по вопросу охраны окружающей среды

Главной задачей кадастров и землеустройства является организация рационального использования всех категорий земель, в том числе земель сельскохозяйственного назначения. В целом землеустройство — это многоплановый комплекс мероприятий и законов, которые осуществляются государством, земледельцами, землепользователями, а также собственниками земель по наведению порядка, эффективного и рационального использования и охране всех земель.

Экологическая эффективность по землеустройству проявляется через землеустроительные мероприятия, влияющие на окружающую природную среду и на характер земли. Главным образом она выражается в улучшении окружающей природной среды и экологических систем, сохранении и воспроизводстве нарушенных природных ресурсов и природных ландшафтов [14—17].

Ведение кадастра и проведение работ, связанных с землеустройством, невозможны с неразрешенными проблемами по охране природной окружающей среды и без обеспечения экологической безопасности. Необходимо разработать обязательные мероприятия, которые будут направлены не только на сохранение экологических систем, но и на рациональное их использование, а также на восстановление природных ресурсов и их поддержание. Хорошо известно, что хозяйственное освоение любой территории невозможно без землеустроительных работ и мероприятий, которые должны быть направлены именно на регулирование отношений, связанных с землей, организацию как средств производства использования территории этой земли. Эти мероприятия обязательно должны включать все природные факторы и смогут успешно и рационально происходить только при определенном состоянии биосферы.

Происходящее нарастание антропогенного воздействия на экологические системы и глобализация исследований, связанных с экологией, требуют ужесточения мероприятий по планированию усовершенствования землепользования. При этом необходимо использовать прогрессивные новейшие достижения не только науки, но и практики [18—21]. Новые методы хозяйственной оценки должны быть разработаны с упором на повышение экологических факторов и показателей, которые в мероприятиях ранее не учитывались.

Факторы, которые являются природоформируемыми и должны характеризовать территориальную экологическую обстановку в целях создания производственной емкости и хозяйственной полезности, должны иметь важные направления планирования использования земли. Невозможно без знания этих факторов правильно выбрать рациональное направ-

ление экологического районирования по применению земель, затем научно обосновать их рыночную стоимость и в дальнейшем спрогнозировать экологическое развитие территории. Только тогда можно говорить об экологической безопасности.

Ведение кадастра недвижимости и проведение землеустроительных работ кадастра недвижимости невозможно без устранения проблем охраны окружающей среды с учетом обеспечения экологической безопасности. Это означает обязательное осуществление мероприятий, направленных на рациональное использование, сохранение, а также воспроизводство экологических систем в целях поддержания природной среды, взаимодействие между окружающей природной средой и деятельностью людей. Такое взаимодействие обеспечит поддержание состояния природы, которое не приведет к существенным нарушениям экологического баланса.

Отходы топливно-энергетического комплекса

Исследуемые отходы обогащения угля относятся к отходам топливно-энергетического комплекса [22]. Топливо-энергетический комплекс является одним из основных загрязнителей окружающей природной среды: выбросы в атмосферу (48 % всех выбросов), сбросы сточных вод (36 % всех сбросов), образование твердых отходов (30 % всех твердых загрязнителей) [23—25].

К отходам топливно-энергетической промышленности относят продукты, получаемые в виде отходов при добыче, обогащении и сжигании твердого топлива [23—25]. Эту группу отходов разделяют по источнику образования, виду топлива, числу пластичности минеральной части отходов, содержанию горючей части, зерновому составу, химико-минералогическому составу, степени плавкости, интервалу размягчения, степени вспучиваемости и т. д.

Длительное хранение отходов теплоэнергетики в золоотвалах способствует попаданию вредных веществ и ионов тяжелых металлов в воду и почву. По оценкам автора [26—29], антропогенная составляющая формирования качества поверхности вод уже соизмерима с природной составляющей, что представляет угрозу устойчивому водопользованию. Очевидно, что необходимо снижать антропогенную нагрузку посредством внедрения региональных нормативов, изменения платы за загрязнение водных объектов и использование отходов энергетики в производстве строительных материалов.

Кроме того, около 70 % золошлаковых материалов и отходов углеобогащения имеет повышенное содержание несгоревших остатков, что значительно сокращает потребность в топливе при обжиге керамических материалов [30—33]. Суммарное содержание подобных остатков, по мнению авторов работ [30—33], может удовлетворить значительную часть потребности в топливе при производстве керамических теплоизоляционных материалов, а минеральная часть отходов энергетики — до одной третьей части потребности в глинистом сырье, отощителях и плавнях.

Ухудшение экологической обстановки связано с загрязнением атмосферы. В выбросах оксида серы в атмосферу лидирует энергетика (70 %).

Необходимо отметить, что сокращение запасов традиционного природного сырья заставляет искать новые способы его замещения различными видами отходов [34—36]. Опыт передовых зарубежных стран показал техническую осуществимость данного направления, при этом выступающего еще и как инструмент защиты природной среды от загрязнения [37—40]. Вместе с тем из отходов или из отходов в комбинации с природным сырьем могут быть изготовлены практически все основные строительные материалы. За счет вовлечения многотоннажных отходов в производство керамических материалов массового потребления, к которым относится легковесный кирпич, можно кардинально изменить параметры сырьевой базы России, что поспособствует снижению экологической напряженности в регионах [37—40].

Согласно европейскому законодательству (директива Европейского Парламента и Совета Европейского Союза 2008/98/ЕС) имеет место приоритетность методов управления отходами. Наиболее приемлемым вариантом утилизации отходов с сопутствующим повышением энергоэффективности композитного производства является их переработка в целях повторного использования полученных продуктов.

Неограниченными возможностями использования отходов отличается отрасль, производящая строительные керамические материалы [37—40]. Это объясняется большими масштабами строительного комплекса, его материалоемкостью и номенклатурой изделий.

Одной из самых материалоемких отраслей народного хозяйства является производство керами-

ческих материалов строительного направления. Поэтому отходы топливно-энергетического комплекса целесообразно использовать в производстве керамических легковесных кирпичей [41—47].

Цель работы — анализ возможности получения из отходов углеобогащения легковесного кирпича на основе межсланцевой глины без применения природных традиционных материалов; обсуждение проблем утилизации промышленных отходов и охраны окружающей среды.

Сырьевые материалы

Для получения легковесного кирпича в качестве глинистого компонента использована межсланцевая глина (МГ) [48—51]. МГ является отходом горючих сланцев и образуется при их добыче на сланцеперерабатывающих заводах (на шахтах). По числу пластичности (27—32) МГ относится к высокопластичному глинистому сырью с истинной плотностью 2,55—2,62 г/см³.

В качестве отощителей и выгорающих добавок использовались [52—55]:

- К1 — отходы флотации углеобогащения фабрики "Томусинская" (ГОФ, Кемеровская область);
- К2 — угольные шламы флотационного углеобогащения, "Обуховская" (ЦОФ, Ростовская область);
- К3 — отходы углеобогащения, "Абашевская" (ЦОФ, Новокузнецк);
- К4 — отходы углеобогащения, "Коркинский разрез" (ЦОФ, Челябинская область).

Химические составы МГ исследуемых компонентов представлены в табл. 1, фракционные — в табл. 2, технологические свойства — в табл. 3.

Таблица 1

Химический состав компонентов

Компонент	Содержание оксидов, масс. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	п.п.п.
МГ	45—47	13—14	5—6	11—13	2—3	3—4	9—20
К1	53—54	18—19	6—7	1—2	0,3—0,7	4—5	16—17
К2	35—36	14—15	5—6	1—2	1—1,5	1—1,5	33—34
К3	54—55	16—17	3—4	5—6	1,5—2	3—4	13—14
К4	43—44	17—18,5	5—6	3—4	2—3	2—3	19—20

Примечание: п.п.п. — потери при прокаливании; R₂O = Na₂O + K₂O.

Таблица 2

Фракционный состав компонентов

Компонент	Содержание фракций, % (размер частиц, мм)				
	>0,063	0,063—0,01	0,01—0,005	0,005—0,001	<0,0001
МГ	5	7	12	14	62
К1	35	27,1	6,7	12,8	18,4
К2	37,8	24,2	7,1	13,2	17,7
К3	52,1	9,8	8,5	12,8	16,8
К4	38,8	27,1	8,2	11,3	14,6

Таблица 3

Технологические показатели компонентов

Компонент	Теплотворная способность, ккал/кг	Огнеупорность, °С		
		начало деформации	размягчение	жидкоплавкое состояние
МГ	1100	1260	1290	1320
К1	2700	1220	1260	1300
К2	2800	1250	1300	1350
К3	2500	1260	1300	1320
К4	1800	1230	1270	1300

Отходы топливно-энергетического комплекса с повышенной теплотворной способностью (>1000 ккал/кг; табл. 3) целесообразно использовать не только в качестве отощителя, но и в качестве выгорающих добавок для производства легковесных кирпичей [52—55]. К группе выгорающих добавок относятся различные виды твердого топлива, в частности антрацит, коксовая мелочь и т. п. [4]. Их вводят в состав шихты до 3 % по объему, т. е. до 60—80 % от общей потребности топлива на обжиг изделий. Их назначение — интенсифицировать процесс обжига, улучшить спекаемость массы и тем самым повысить прочность изделий [4].

Результаты исследования

Физико-механические свойства легковесного кирпича. Сырьевые материалы измельчали до прохождения сквозь сито 1 мм, затем тщательно перемешивали. Керамическую массу готовили пластическим способом при влажности 20—22 %. Из нее формовали кирпичи размером $250 \times 120 \times 65$ мм. Высушенные кирпичи до остаточной влажности не более 5 % обжигали при температуре 1000°C (конечная температура обжига). В табл. 4 приведены составы керамических масс, а в табл. 5 — физико-механические и химические свойства легковесных кирпичей.

Таблица 4

Составы керамических масс

Компонент	Содержание компонентов, масс. %			
	1	2	3	4
МГ	70	70	70	70
К1	30	—	—	—
К2	—	30	—	—
К3	—	—	30	—
К4	—	—	—	30

Таблица 5

Физико-механические показатели легковесных кирпичей

Показатели	Составы			
	1	2	3	4
Предел прочности при сжатии, МПа	11,8	12,4	12,6	13,2
Предел прочности при изгибе, МПа	2,7	2,8	2,9	3,1
Морозостойкость, циклы	28	29	31	34
Усадка, %	7,3	7,4	7,5	7,3
Термостойкость, теплосмены	2	3	2	2
Плотность, кг/см ³	1140	1130	1180	1250
Теплопроводность, Вт/(м · °С)	0,19	0,18	0,20	0,23

При содержании в отходах топливно-энергетического комплекса органики 20—30 % положительный эффект достигается добавкой в шихту не более 30 % отходов углеобогащения. В этих случаях исследуемые отходы способны заменить вводимый в шихту уголь, создать восстановительную среду в толще обжигаемого материала и при достаточном количестве в компонентах оксидов железа ($>3\%$ Fe_2O_3) перевести оксиды в закисные соединения, что способствует интенсификации процесса обжига. Выгорающие добавки — отходы углеобогащения — не только повышают пористость керамических изделий, но и способствуют равномерному спеканию керамического черепка. При выгорании органической добавки выделяется небольшое количество сопутствующих газов, что приводит к уплотнению стенок вокруг каждой частицы. В итоге повышается прочность всего изделия.

Строительный легковесный (теплоизоляционный) кирпич подразделяют в зависимости от плотности на три класса: А — от 700 до 1000 кг/м^3 ; Б — от 1000 до 1300 кг/м^3 ; В от 1300 до 1450 кг/м^3 . Как видно из табл. 5, все легковесные кирпичи составов № 1—4 относятся к классу Б.

Заключение

Получены керамические легковесные кирпичи на основе отходов топливно-энергетического комплекса без применения природного традиционного сырья.

Исследуемые отходы имеют повышенную теплотворную способность, поэтому их целесообразно применять не только в качестве отощителей, но и в качестве выгорающих добавок, что позволит исключить использование в составах керамических масс антрацита, коксовой мелочи и т. п.

Выгорающие добавки не только повышают пористость керамических изделий, но и способствуют равномерному спеканию керамического черепка.

Использование отходов топливно-энергетического комплекса в производстве теплоизоляционных материалов способствует утилизации промышленных отходов, охране окружающей среды и расширению сырьевой базы для строительных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Экологический менеджмент. — Актөбе: Ақтөбінский университет им. акад. С. Баишева, 2019. — 240 с.
2. Kairakbaev A. K., Abdrakhimova E. S., Abdrakhimov V. Z. Innovative Approaches to Using Kazakhstan's Industrial Ferrous and Non-ferrous Tailings in the Production of Ceramic Materials // Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. 2020. V. 989. P. 54—61.

3. Kairakbaev A. K., Abdрахимова E. S., Abdрахимов V. Z. Use of Nonferrous Metallurgy Waste: Clayey Portion of the Zirconilmenite Ore Gravity Tailings and Pyrite Cinders in Tile-Making // Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. 2020. V. 989. P. 47—53.
4. Абдрахимов В. З. Концепция современного естествознания. — Самара: Самарский государственный экономический университет, 2015. — 340 с.
5. Abdрахимов V. Z., Abdрахимова E. S. Oxidation Processes in the Firing of Porous Filler Based on Oil Production Wastes and Intershale Clay // ISSN 0040-5795, Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2020. V. 54. № 4. P. 750—755.
6. Абдрахимов В. З. Влияние нанотехногенного сырья на сушильные свойства и физико-механические показатели керамического кирпича // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2020. № 1. С. 29—34.
7. Стеценко А. А., Абдрахимов В. З. Использование отходов топливно-энергетического комплекса и фосфорного производства в производстве керамического кирпича // Экология промышленного производства. 2020. № 3. С. 23—28.
8. Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З. Кислотоупорные плитки из отходов черной и цветной металлургии Казахстана // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. 2020. № 1. С. 62—67.
9. Ильина Л. А., Абдрахимов В. З. Экологические и экономические аспекты использования в производстве строительных материалов отходов топливно-энергетического комплекса и их классификация // Экологические системы и приборы. 2020. № 8. С. 28—44.
10. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Рециклинг отходов топливно-энергетического комплекса: нефтяного шлама и межсланцевой глины в производстве пористого заполнителя на основе жидкостекольной композиции // Бурение и нефть. 2020. № 6. С. 42—49.
11. Абдрахимов В. З., Абдрахимов Д. В. Школьное образование и экология // Вестник Прикамского социального института. 2019. № 2. С. 60—69.
12. Субеев З. Т., Абдрахимов Д. В., Абдрахимов В. З. Взаимосвязь экономической экологии, "зеленой" экономики и управление отходами // Территория инноваций. 2019. № 5. С. 39—44.
13. Абдрахимов Д. В., Абдрахимов В. З. Качественное школьное образование по экологии способствует экологической безопасности // Территория инноваций. 2019. № 3. С. 47—51.
14. Абдрахимов В. З., Кайракбаев А. К., Абдрахимова Е. С. Использование в производстве клинкерного кирпича отходов цветной металлургии и энергетики Восточного Казахстана // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 3. С. 14—18.
15. Абдрахимов В. З. Экономические и практические аспекты использования отходов горючих сланцев в производстве легковесного кирпича // Экономика строительства. 2020. № 1. С. 64—73.
16. Абдрахимов В. З. Снижение экологического ущерба за счет использования отходов цветной металлургии и энергетики в производстве легковесных огнеупоров // Экологические системы и приборы. 2020. № 2. С. 23—34.
17. Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Структура пористости и технические свойства клинкерных материалов на основе отходов цветной металлургии Восточного Казахстана // Стекло и керамика. 2020. № 2. С. 44—45.
18. Абдрахимов В. З. Физико-химические исследования отходов цветной металлургии Восточного Казахстана — глинистой части "хвостов" гравитации циркон-ильменитовой руды // Экологическая химия. 2020. № 1. С. 49—58.
19. Абдрахимов В. З. Влияние отходов производства минеральной ваты — диабазовой шихты на физико-механические показатели и фазовый состав керамического кирпича // Изв. вузов. Строительство. 2019. № 8. С. 37—44.
20. Абдрахимов В. З. Рециклинг отходов энергетики и цветной металлургии в производстве керамического кирпича способствует энергетической безопасности биосферы // Биологическая совместимость: человек, регион, технологии. 2019. № 3. С. 71—80.
21. Абдрахимов В. З. Влияние полевошпатового концентрата на фазовый состав плитки для полов на основе отходов цветной металлургии // Изв. вузов. Строительство. 2019. № 11. С. 33—42.
22. Абдрахимов В. З. Использование флотационного углеобогащения в производстве пористого заполнителя на основе жидкого стекла // Экология промышленного производства. 2019. № 4. С. 25—29.
23. Кайракбаев А. К., Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З. Экономические, экологические и практические аспекты использования горелых пород и бурового шлама в производстве пористого заполнителя // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 11. С. 26—31.
24. Абдрахимов В. З. Использование отхода обогащения угля и бейделлитовой глины в производстве пористого заполнителя на основе жидкостекольных композиций // Изв. вузов. Строительство. 2019. № 7. С. 25—34.
25. Абдрахимов В. З. Использование нефтяного шлама в производстве пористого заполнителя способствует развитию "зеленой" экономики и транспортно-логистической инфраструктуры // Бурение и нефть. 2019. № 11. С. 54—59.
26. Абдрахимов В. З., Ильина Т. А. Использование золошлакового материала в производстве пористого заполнителя способствует развитию "зеленой" экономики и транспортно-логической инфраструктуры // Уголь. 2019. № 11. С. 59—63.
27. Федоренко Р. В., Абдрахимов В. З., Колпаков А. В. Экологические и экономические аспекты, способствующие развитию "зеленой" экономики и транспортно-логической инфраструктуры // Экология промышленного производства. 2019. № 3. С. 22—26.
28. Абдрахимов В. З. Повышение экологической безопасности за счет использования золошлакового материала и отработанного катализатора в производстве керамического кирпича на основе бейделлитовой глины // Биологическая совместимость: человек, регион, технологии. 2019. № 2. С. 35—42.
29. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Структура пористости пористого заполнителя на основе горелой породы, глиежей и жидкостекольных композиций // Химическая технология. 2019. Т. 20. № 8. С. 354—360.
30. Абдрахимов В. З. Использование золошлакового материала и нанотехногенного карбонатного шлама в производстве кирпича на основе бейделлитовой глины // Строительство и реконструкция. 2019. № 2. С. 81—89.
31. Abdрахимов V. Z., Abdрахимова E. S. Study of the Distribution of Iron Oxides in Intershale Clay and Oil Sludge Porous Filler with Mossbauer Spectroscopy // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2019. V. 53. Iss. 4. P. 703—707.
32. Абдрахимов В. З. Влияние фазового состава на морозостойкость керамического кирпича на основе бейделлитовой глины и золошлакового материала // Изв. вузов. Строительство. 2019. № 3. С. 41—49.
33. Абдрахимов В. З. Повышение экологической безопасности за счет использования отхода обогащения угля в производстве пористого заполнителя на основе жидкого стекла и монтмориллоновой глины // Энергосбережение и водоподготовка. 2019. № 3. С. 33—38.
34. Kairakbaev A. K., Abdрахимов V. Z., Abdрахимова E. S. Mössbauer Spectroscopy Study of the Iron Oxides, Phase Composition, and Porosity Structure in Ceramic Brick Based on Intershale Clay and Lignite Slag // Glass and Ceramics. 2019. V. 76. № 1—2. P. 56—62.
35. Абдрахимов В. З. Исследование тепломассообменных процессов при обжиге керамических материалов на основе межсланцевой глины и нефтяного шлама // Бурение и нефть. 2019. № 3. С. 52—53.
36. Сафронов Е. Г., Сунтеев А. Н., Коробкова Ю. Ю., Абдрахимов В. З. Экологические, экономические и практические аспекты использования многотоннажных отходов топливно-энергетического комплекса — сланцевой золы в производстве пористого заполнителя // Уголь. 2019. № 4. С. 44—49.
37. Абдрахимов В. З. Использование нефтешлама в производстве пористого заполнителя на основе монтмориллоновой глины и жидкостекольной композиции // Бурение и нефть. 2019. № 2. С. 38—45.
38. Абдрахимов В. З., Колпаков А. В. Аспекты использования отходов топливно-энергетического комплекса и химической промышленности в производстве керамического кирпича // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 1. С. 46—59.
39. Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Использование золошлакового материала Восточного Казахстана в производстве пористого заполнителя на основе жидкостекольной композиции // Уголь. 2019. № 1. С. 70—73.
40. Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Исследование методом ЯГР-спектроскопии оксидов железа, фазового состава и структуры пористости керамического кирпича на основе межсланцевой глины и шлама от сжигания бурого угля // Стекло и керамика. 2019. № 2. С. 15—22.
41. Абдрахимов В. З. Снижение экологического ущерба экосистемам за счет использования межсланцевой глины и золошлакового материала в производстве легковесного кирпича и пористого заполнителя // Уголь. 2018. № 10. С. 85—91.
42. Абдрахимов В. З. Влияние отходов нефтедобычи на физико-механические показатели легковесного огнеупорного изделия // Бурение и нефть. 2018. № 11. С. 52—57.

43. Ильина Л. А., Абдрахимов В. З. Использование отхода топливно-энергетической промышленности — золошлакового материала — в производстве пористого заполнителя на основе жидко-стекляной композиции // Экология промышленного производства. 2018. Вып. 4. С. 16—22.
44. Абдрахимов В. З. Повышение экологической безопасности за счет использования межсланцевой глины и электростале-плавильного шлака в производстве керамического кирпича // Энерго-сбережение и водоподготовка. 2018. № 6. С. 47—51.
45. Рошупкина И. Ю., Абдрахимов В. З., Колпаков А. И., Абдрахимов В. З., Колпаков А. И. Снижение экологического ущерба за счет использования горелых пород и микрокремнезема в производстве пористого заполнителя // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2018. № 3. С. 35—45.
46. Абдрахимов В. З. Исследование структурно-реологических свойств керамических масс, физико-механических свойств и текстуры керамического кирпича на основе горючих сланцев // Изв. вузов. Строительство. 2018. № 9. С. 43—45.
47. Кайракбаев А. К., Ильина Л. А., Абдрахимов В. З. Использование шлакопыльцевого отхода от производства феррохрома для получения пористого заполнителя способствует охране окружающей среды // Экологическая химия. 2018. Т. 27. № 6. С. 340—348.
48. Абдрахимов В. З., Абдрахимов В. З. Окислительные процессы при обжиге пористого заполнителя на основе отходов нефтедобычи и межсланцевой глины // Химическая технология. 2018. № 8. С. 352—358.
49. Ильина Л. А., Абдрахимов В. З., Колпаков А. В., Кайракбаев А. К., Рошупкина И. Ю. Экологические и экономические ас-

пекты использования многотоннажных отходов топливно-энергетического комплекса в производстве керамического кирпича // Экология промышленного производства. 2018. № 3. С. 7—14.

50. Абдрахимов В. З., Абдрахимов В. З., Абдрахимов И. Д. Исследования состава выделяющихся газов и пористости при термообработке теплоизоляционного материала на основе нефтяного шлака и межсланцевой глины // Бурение и нефть. 2018. № 7, 8. С. 70—77.

51. Абдрахимов В. З., Рошупкина И. Ю., Абдрахимов В. З., Кайракбаев А. К., Колпаков А. В. Влияние топливосодержащих отходов на структуру пористости теплоизоляционного материала // Строительство и реконструкция. 2018. № 2. С. 113—120.

52. Абдрахимов В. З., Абдрахимов В. З. Снижение экологического ущерба экосистемам за счет использования отходов горючих сланцев в производстве легковесного кирпича и пористого заполнителя // Экологическая химия. 2017. Т. 26. № 4. С. 190—197.

53. Абдрахимов В. З., Абдрахимов В. З. Инновационные направления по использованию отходов углеобогащения и межсланцевой глины в производстве теплоизоляционных материалов // Энергосбережение и водоподготовка. 2017. № 2. С. 54—58.

54. Абдрахимов В. З., Абдрахимов В. З. Исследование методом ЯГР-спектроскопии оксидов железа в керамическом кирпиче на основе межсланцевой глины и отходов обогащения бурового угля // Вестник СПбГУ. Физика и химия. 2017. Т. 4(62). Вып. 2. С. 117—125.

55. Абдрахимов В. З., Абдрахимов В. З., Абдрахимов И. Д. Получение теплоизоляционного материала на основе жидкого стекла и отходов углепереработки, образующихся при обогащении коксующих углей // Уголь. 2017. № 4. С. 64—67.

The use of coal waste in the production of a lightweight brick promotes the optimization of land management and inventories

V. Z. ABDRAKHIMOV

Samara State University of Economics, Samara, Russia

Environmental efficiency is manifested in land management through land management measures on the natural environment and on the nature of the land. The main role of environmental efficiency is expressed in improving the environment and ecological systems, preserving and reproducing disturbed natural resources and natural landscapes. Ceramic lightweight bricks, the density of which does not exceed 1250 kg/m³, are obtained on the basis of waste from the fuel and energy complex without the use of natural traditional raw materials. The investigated waste has an increased calorific value, therefore, it is advisable to use them not only as deodorizers, but also as burn-out additives, which will make it possible to exclude the use of anthracite, coke breeze, etc. in the compositions of ceramic masses. Burn-out additives not only increase the porosity of ceramic products, but also promote uniform sintering of the shard. Research has shown that efficient use of natural resources; reduction of pollution; low carbon emissions; preventing the loss of ecosystem services and biodiversity, will reduce the risks of negative impact on the environment.

Keywords: waste of coal enrichment, lightweight bricks, fuel and energy complex, land management, cadastres, porosity structure.

Bibliography — 55 references.

Received September 29, 2020

УДК 504.064.4

Сравнительный анализ технологий по сортировке отходов компании "Benli Recycling Group" и регионального оператора "ТБО "Экосервис"

О. Н. БОРИСОВА, канд. техн. наук

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

Представлен сравнительный анализ технологий сортировки твердых бытовых отходов в условиях турецкой и российской практик.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, переработка, сортировка, вторсырье, технологические операции, мусоросортировочный комплекс.

В мировой практике стратегия уменьшения количества твердых бытовых отходов (ТБО, solid waste), направляемых на объекты санитарной очистки, во многом базируется на реализации программ ресурсосбережения. Эти программы предусматривают использование методов сортировки для выделения из ТБО ценных компонентов до их вывоза на полигон или доставку на мусоросжигательный завод (МСЗ). При этом может предусматриваться выделение из ТБО не только ценных, но и опасных компонентов (для улучшения характеристик отходов, направляемых на захоронение или сжигание).

Применяемые в России технологические процессы сортировки отходов неудовлетворительно решают задачи ресурсосбережения и экологической безопасности, что является следствием низкого качества сырья на входе в процесс (система подготовки отсутствует). Не учитывается гетерогенный состав ТБО, представляющих смесь различных по свойствам, крупности, ценности и степени опасности компонентов [1, 2].

Целевая задача повышения эффективности процессов ресурсо- и энергосбережения при обращении с ТБО — оптимизация состава сырья на входе в процесс и реализация соответствующих требований к оборудованию (выбор наиболее эффективных устройств и аппаратов). Качественный и количественный состав отходов на входе в технологический процесс должен удовлетворять требованиям рационального использования технологического сырья в качестве вторичных материальных и энергетических ресурсов (ВМР и ВЭР). Одновременно требования к сырью на входе в процесс являются базовой основой рациональной технической и экономической политики оптимизации комплексного управления ТБО по критериям ресурсо- и энергосбережения и экологической

безопасности (повышение эффективности процессов сбора, обработки и переработки ТБО).

Важнейшую роль в процессе управления ТБО играет технологическая операция сортировки. Её можно использовать для оптимизации состава твердых коммунальных отходов (ТКО) (с точки зрения гомогенизации, повышения и стабилизации теплотворной способности, извлечения полезных компонентов, снижения содержания опасных и балластных компонентов и т. д.) [3, 4].

Сортировка как подготовительная операция оптимизирует последующие производства, является важнейшим первичным мероприятием по сокращению потока ТБО на захоронение и сжигание, по уменьшению токсичных выбросов при термической переработке ТБО [5, 6].

Выбор техники для реализации процессов сортировки ТКО базируется на анализе рынка оборудования (представлен ниже) и привязан к составу, крупности и свойствам обогащаемого и перерабатываемого сырья.

Перечислим требования, предъявляемые к сырью на входе в процесс сортировки на сортировочном комплексе (в %) (целевое назначение операции сортировки — извлечение ресурсоценных компонентов ТБО для последующей переработки): макулатура 50—60; металлы 2—10; текстиль 2—5; стекло 5—10; полиэтилентерефталат (ПЭТФ) 5—15; полимерная пленка 3—5; прочее 5—10 [7, 8].

Таким образом, алгоритм управления ТБО на стадии ресурсосбережения предусматривает стабилизацию процесса сбора отходов по качеству техногенного сырья. В роли критерия оптимальности принимают степень утилизации ТБО (количество ресурсов, выделенных для вторичного использования) [9, 10].

Борисова Оксана Николаевна, доцент высшей школы сервиса.
E-mail: borisova-on@bk.ru

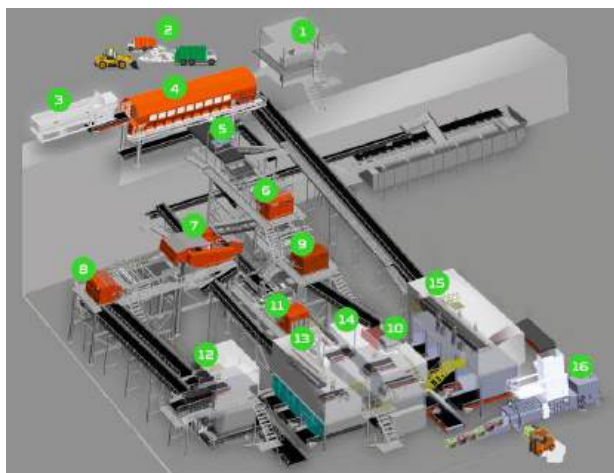
Статья поступила в редакцию 9 января 2021 г.

© Борисова О. Н., 2021

Анализ оборудования мусоросортировочного комплекса в Турции (г. Эскишехир)

Фирма "Бенли" специализируется на четырех видах деятельности, в том числе и вид деятельности по сортировке отходов. Комплексы по сортировке быто-

вых отходов и отходов производственного назначения являются объектами, стабильно работающими в Турции (рисунок).



Сортировочный комплекс в г. Эскишехир (Турция)

Рассмотрим процессы сортировки "чистого мусора" (тара и упаковочные материалы) от места приема отходов до брикетирования вторсырья.

- Отходы поступают на завод по сортировке и утилизации ТБО, где ежедневно перерабатывается около 200 т упаковочных материалов.

- Обработка отходов начинается на приемной площадке.

- Отходы отправляются на линию автоматизированной сортировки, где проходят через разрыватель пакетов.

- Содержимое транспортируется в барабанный грохот. В сите Trommel отходы (в основном тара и упаковочные материалы) делятся на классы крупности.

- Отходы поступают на участок автоматического определения металлов (металлический сепаратор с лентой), где металлы отделяются от общего потока отходов при помощи магнита перед их загрузкой в носитель.

- Все пластмассовые материалы в отходах после первого разделения на грохоте Trommel сортируются оптическими сепараторами для подачи в баллистический сепаратор. Оставшиеся смешанные отходы переносятся в другие оптические сепараторы.

- Баллистический сепаратор является важным компонентом мусоросортировочного завода. Его основное назначение — отделение 2-мерных (легких) и 3-мерных (тяжелых) фракций отходов друг от друга для обеспечения высокой эффективности разделения в дальнейших процессах. Турецкая фирма "Benli Recycling Group" является производителем баллистического сепаратора. Она позаимствовала это "ноу-хау" из Европы.

- Сортировка 2-мерных материалов происходит аналогично 3-мерным продуктам; оптические сепараторы запрограммированы на извлечение 2-мерных материалов (полиэтиленовые пакеты, пластмассы и т. д.). Продукты обнаруживаются с большой точностью и автоматически отправляются на конвейеры.

- Таким же образом происходит извлечение бумажных отходов;

- Далее ТБО поступают на линию по извлечению алюминия (вихревой электромагнитный сепаратор). В этой части извлекаются цветные металлы. Извлечение происходит с помощью вихревого тока, образующегося в магнитном поле. Материал переносится на конвейерную ленту, а затем — в нужный бункер;

- На следующем этапе 3-мерные материалы разделяются баллистическим сепаратором без ручной сортировки на разные виды пластика. PE, PP — на первом этапе с использованием одного оптического сепаратора, PET — путем повторной загрузки линии на 2-м этапе автоматически. Оптический сепаратор осуществляет сортировку с высокой скоростью (3,5 м/с, что в 20 раз быстрее по сравнению с сепарацией оператором);

- Все отсортированные отходы поступают в специальные бункеры-накопители;

- Пресс сжимает отсортированные отходы, поступающие из бункеров в тюки, в соответствии с их категориями (пластик, бумага, металлы и т. д.) для отправки на склады или предприятия для переработки.

Комплекс по сортировке отходов работает в автоматическом режиме, оснащён блоком управления, который обеспечивает детальную видимость всего объекта, предполагает точечные решения по вопросам неисправности, аварийной ситуации, рекомендациям по техническому обслуживанию, поддерживает систему обеспечения эффективности процесса сортировки.

Таким образом, на мусороперерабатывающем комплексе извлекают практически все материалы, которые можно использовать в качестве вторсырья. Их прессуют и продают профильным переработчикам.

Технология сортировки отходов, используемая региональным оператором ТБО "Экосервис" в Красноуфимске

При въезде на завод каждый мусоровоз взвешивают. На разгрузку машину пропускают, только если она зарегистрирована в системе "Электронный талон и АИС-отходы". Сотрудник пропускного пункта сверяет номера с электронной базой. Информация о количестве мусоровозов и балансе массы поступает в надзорные органы в режиме онлайн. Сортировка начинается на приемной площадке, ТБО — отдельно, крупногабаритный мусор (КГМ) — отдельно. Затем отходы загружают в специальный шредер, где их измельчают. Далее отходы отправляют на линию автоматизированной сортировки, где они проходят через разрыватель пакетов, который не измельчает содержимое, что важно для дальнейших технологических процессов. По цепному конвейеру отходы попадают в кабину предварительной сортировки. Там оборудованию помогают люди. Сортировщики выбирают крупный картон и стекло, а остальной мусор движется дальше в барабанный грохот. В нем общий поток делится на три части в зависимости от размера

фракции. Крупные фракции (более 300 мм) сортируют вручную для отбора пластика, картона, а также топливной фракции. Мелкие (до 70 мм) поступают на участок автоматического определения металлов и затем попадают на площадку компостирования. У средней фракции (более 70 мм) более сложный путь. На первом этапе материал поступает на современные оптические сепараторы, которые автоматически сканируют весь поток отходов и с помощью сжатого воздуха выбирают нужные материалы. Первый оптический сепаратор извлекает пластик, пригодный для переработки. Затем его отправляют на балистический сепаратор (он делит материал на плоскую (2D) и объемную (3D) фракции). Плоские пластики, пленку дополнительно сортируют вручную (линия контроля качества). Объемные бутылки, канистры, тубики и т. д. тоже попадают на круг контроля качества. Их делят по материалам: ПЭТФ-тара, полиэтилен, полипропилен [11]. Затем весь общий поток отходов без пластика попадает на второй оптический сепаратор для автоматического отбора картона и бумаги. Всю макулатуру уже по необходимости разделяют по видам. Оставшиеся отходы, в том числе цветной металл, еще раз сортируют вручную (контроль качества машины). В завершение поток отходов проходит через магнитный металлосепаратор для отбора черных металлов [2].

На линии автоматизированной сортировки обрабатывают примерно 45 т отходов в час. Не более 50 % отходов, поступивших на сортировку, идет на захоронение, около 20 % от завезенных отходов вторично перерабатывают и более 30 % отправляют на участок компостирования.

Заключение

В России активно функционирует порядка 200 предприятий по переработке ТБО, а вместе с ними примерно 50 мусоросортировочных комплексов. Конечно, они не в состоянии справиться с масштабными отходами [12].

Рассмотрим как сказывается подобная ситуация на перспективах для перерабатывающего бизнеса.

К очевидным преимуществам для начала бизнеса в мусороперерабатывающей промышленности в России можно отнести:

- постоянно растущие ресурсы;
- спрос на переработанную продукцию;
- возможность выбора специализации и масштаба (работа с одним видом отходов или специализация на сборе и сортировке мусора);
- практическое отсутствие конкуренции в отрасли;
- достойный уровень рентабельности при грамотной организации бизнеса;
- возможность заручиться поддержкой муниципальных органов власти и местного самоуправления;
- в контексте планируемого закона о запрете сжигания отходов, которые могут быть переработаны, необходимость в организации многочисленных мусоросортировочных заводов.

Также следует обратить внимание на проблемы в отрасли, которые мешают ее развитию:

- отсутствие культуры и законодательной базы для сортировки отходов;
- полное отсутствие правового регулирования вопросов переработки;
- низкое потребление продуктов переработки;
- высокая степень коррумпированности власти на всех уровнях;
- отсутствие политической воли и готовности к сотрудничеству со стороны местных руководителей;
- необходимость собрать очень много разрешительных документов в различных инстанциях;
- поиск источников поставок сырья и направлений сбыта.

Самая трудная из всех перечисленных проблем — сортировка ТБО. Ни население, ни бизнес не обучены делать это самостоятельно и добровольно, а государство пока не поощряет деятельность в данном направлении. В результате имеется два выхода: наладить тесное сотрудничество с сортировочным пунктом или пунктом утилизации либо организовать собственную линию по сортировке. Однако даже в этом случае часть сырья будет испорчена [7, 13].

Инвестиции на старте можно минимизировать, выбрав направление деятельности и объемы переработки. Это также влияет на необходимое оборудование и на его стоимость (например, указанные варианты мусоросортировочных линий в зависимости от параметров и возможностей переработки определенного вида отходов: ТБО, бумаги и картона, полиэтилена, ПЭТФ-тары, металла). Грамотный анализ возможностей и оборудования перед запуском сортировочной линии поможет существенно снизить первоначальные затраты, а значит, и повысить рентабельность предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Эволюция стратегии управления ТБО // Твёрдые бытовые отходы. 2014. № 11(101). С. 12—15.
2. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Невнязчивые советы по наболевшей проблеме // Твёрдые бытовые отходы. 2014. № 7(97). С. 15—19.
3. Shubov L. Y., Borisova O. N., Doronkina I. G., Chudaykina G. M. An integrated approach to tourism development and environmental protection // World Applied Sciences J. 2014. V. 30. № 30. P. 30, 31.
4. Грецишкин 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.
5. Шубов Л. Я., Борисова О. Н. Об оптимизации управления твердыми бытовыми отходами в системе ЖКХ // ЖКХ. 2013. № 11. С. 20—29.
6. Доронкина И. Г., Борисова О. Н., Шубов Л. Я. Разработка технологических решений, повышающих эффективность комплексного управления твердыми бытовыми отходами // Сервис в России и за рубежом. 2011. № 8(27). С. 108—120.
7. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Технологии обращения с отходами: преимущества и недостатки, мифы и реалии // Твёрдые бытовые отходы. 2011. № 10(64). С. 10—15.
8. 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.

9. **Borisova O. N., Doronkina I. G., Sumzina L. V., Maximov A. V., Gozalova M. R.** The life in a metropolis: an integrated approach to tourism development and environmental protection: 5th International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences and Arts SGEM 2018. Conference proceedings. 2018. P. 545—552.

10. **Borisova O. N., Doronkina I. G., Demenev A. V., Malyutin G.** Integration of educational technologies into the municipal solid waste management: 5th International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences and Arts SGEM 2018. Conference proceedings. 2018. P. 441—446.

11. **Борисова О. Н.** Ресурсосбережение в строительстве — стимул экологического прогресса // Экология промышленного производства. 2020. № 1(109). С. 39—42.

12. **Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Юдин А. Г., Гречишкин В. С.** Принципы Zero Waste: современное прочтение // Твердые бытовые отходы. 2013. № 5(83). С. 8—11.

13. **Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г.** Ситуация с отходами в московском регионе: планы и реалии (продолжение) // Твердые бытовые отходы. 2010. № 2(44). С. 27—35.

Comparative analysis of waste sorting technologies of the company "Benli Recycling Group" and the waste management company "MSW "Ecoservice"

O. N. BORISOVA

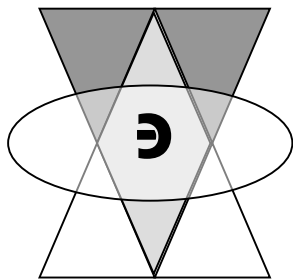
Russian State University of Tourism and Service, village Cherkizovo, Pushkin district,
Moscow region, Russia

The article presents a comparative analysis of waste sorting technologies in the conditions of Turkish and Russian practices.

Keywords: solid household waste, processing, sorting, recyclable materials, technological operations, waste sorting complex.

Bibliography — 13 references.

Received January 9, 2021



УДК 550.84

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДООЧИСТКА

Донные отложения прудков-отстойников системы очистки сточных вод как перспективное комплексное сырье

^{1, 2} Е. А. КРАСАВЦЕВА; ² А. В. СВЕТЛОВ, канд. техн. наук;

² Д. В. МАКАРОВ, д-р техн. наук

¹ Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики
ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия

² Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты,
Мурманская обл., Россия

Приведены результаты исследования химического, минералогического, гранулометрического составов отложений, образованных осевшими взвешенными веществами, из прудков-отстойников системы очистки сточных вод медно-никелевого рудника. Рассмотрена потенциальная возможность использования материала в качестве комплексного сырья. Выщелачивание 2%-й серной кислотой предварительно агломерированных взвесей с использованием в качестве связующего 30%-й серной кислоты за 90 сут позволило извлечь 36 % меди и 55,7 % никеля. Продемонстрированы сорбционные свойства обожженных гранул, изготовленных из данных отложений с применением сульфитно-спиртовой барды (ССБ) в качестве связующего, по отношению к ионам меди и никеля. В первые несколько суток эксперимента удалось сорбировать 68—73 % никеля и 90—92 % меди из модельного раствора, подаваемого в перколятор. Показана возможность получения бруситосодержащего сорбента солянокислотным вскрытием исходного материала взвесей и применения его для очистки модельных растворов от ионов фтора с эффективностью до 62 %.

Ключевые слова: взвешенные вещества, сорбент, кучное выщелачивание, очистка сточных вод, медь, никель.

В мире наметилось устойчивое снижение качества руд, поступающих на переработку. Пересмотр и усовершенствование существующих технологий обогащения требуют большого количества времени и финансовых затрат.

Актуальной задачей становится поиск новых источников сырья. Отходы, образующиеся в процессе

деятельности горнодобывающих предприятий, забалансовые руды или бедный рудный материал могут стать таким сырьем.

На территории Российской Федерации свыше 300 тыс. га земель занято техногенными отходами, в отвалах и хвостохранилищах накоплено порядка 100 млрд т отходов [1, 2]. В Мурманской области расположены крупные горнопромышленные предприятия: АО "Кольская ГМК", АО "Ковдорский ГОК", АО "Апатит" и другие. В регионе ежегодно складировается более 200 млн т горнопромышленных отходов (ГПО): забалансовых руд, породных отвалов, хвостов обогащения и шлаков, общий объем которых достиг около 8 млрд т. Поддержание отвалов вскрышных пород и шлаков, хвостов и шламохранилищ требует значительных капитальных и материальных затрат. На длительное время выводятся из хозяйственного оборота значительные площади земель [3, 4].

Красавцева Евгения Андреевна, младший научный сотрудник.

E-mail: Vandeleur2012@yandex.ru; e.krasavtseva@ksc.ru

Светлов Антон Викторович, научный сотрудник.

E-mail: antonsvetlov@mail.ru

Макаров Дмитрий Викторович, директор, заведующий лабораторией.

E-mail: mdv_2008@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2020 г.

© Красавцева Е. А., Светлов А. В., Макаров Д. В., 2021

В ряде работ [5, 6] представлены технологии, позволяющие извлекать ценные компоненты из хвостов обогащения медно-никелевых руд. Вместе с тем такое сырье, как хвосты флотации, позволяет получать сорбент на их основе и в дальнейшем использовать его для очистки стоков предприятий.

Цель данной работы — рассмотреть принципиальную возможность использования взвешенных веществ, осевших в прудках-отстойниках медно-никелевого рудника, для доизвлечения цветных металлов методом кучного выщелачивания и для получения сорбента для очистки сточных вод.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлись донные отложения, образованные взвешенными веществами, осевшими в прудках-отстойниках рудничных вод медно-никелевого рудника, расположенного на Крайнем Севере. Пробы были отобраны в 2016 г. при реконструкции прудков (рис. 1). Ежегодно образуется порядка 10 тыс. т материала, который предприятие рассматривает в качестве бедной руды, однако пока не перерабатывает.



Рис. 1. Осушенный прудок-отстойник рудничных вод

По результатам рентгенофазового анализа типичными минералами являются кальцит CaCO_3 , кварц SiO_2 , хлорит $(\text{Mn}, \text{Al})_6(\text{OH})_8(\text{Si}, \text{Al})_2$, энстатит $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$, антигорит $(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, тальк $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, форстерит Mg_2SiO_4 , монтмориллонит $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, магнетит Fe_3O_4 , халькозин Cu_2S , пентландит $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ и пирротин Fe_{1-x}S .

Результаты силикатного и ситового анализа материала отложений представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав исследуемого материала

Содержание, масс. %			
SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3
35,56	0,88	8,38	2,06
FeO	MnO	CaO	MgO
11,97	0,18	9,68	13,67
K_2O	Na_2O	P_2O_5	Cu
0,66	1,12	0,11	0,16
Ni	SO_3	ппп	Сумма
0,32	4,99	10,75	100,49

Таблица 2

Гранулометрический состав исследуемого материала

Фракция, мм	-0,064 + 0,05	-0,05 + 0,04	-0,04
Выход, %	92,9	6,51	0,59

Рассмотрены два возможных направления использования исследуемого материала: для доизвлечения цветных металлов и для получения сорбента для очистки сточных вод.

По результатам атомно-адсорбционной спектроскопии вскрытых открытым кислотным способом проб установлено, что в донных отложениях прудков содержится 0,32 % никеля и 0,16 % меди, что позволяет рассматривать исследуемый материал в качестве объекта для кучного выщелачивания [7—9].

По опыту работы с аналогичными видами отходов известно, что после определённой обработки их можно рассматривать также в качестве сорбентов цветных металлов [6].

Материал предварительно гранулировали. Для экспериментов по извлечению цветных металлов методом кучного выщелачивания партию гранул изготавливали с использованием в качестве связующего 30%-го раствора серной кислоты. Исследования сорбции проводили на материале, который сначала гранулировали с использованием в качестве связующего ССБ, а далее вели обжиг в муфельной печи (700 °С, 2 ч).

Полученные гранулы представляли собой по форме прессованные таблетки 3—4 мм в диаметре и 1—1,5 мм толщиной (рис. 2). Затем гранулы помещали в стеклянные перколяторы.

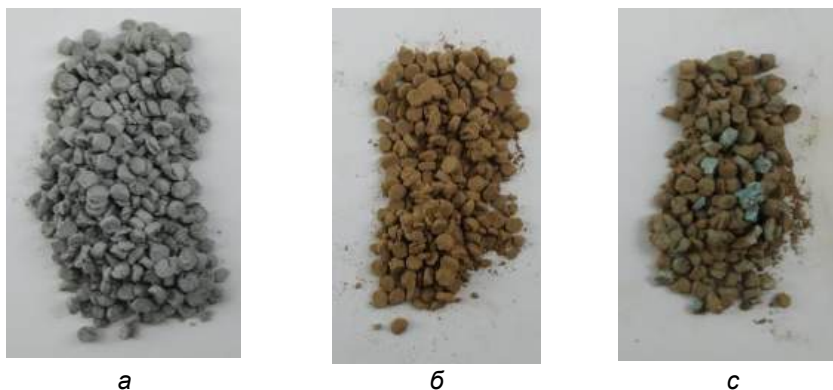


Рис. 2. Пример гранул, изготовленных из донных отложений:
а — исходные; б — обожженные; в — после сорбции

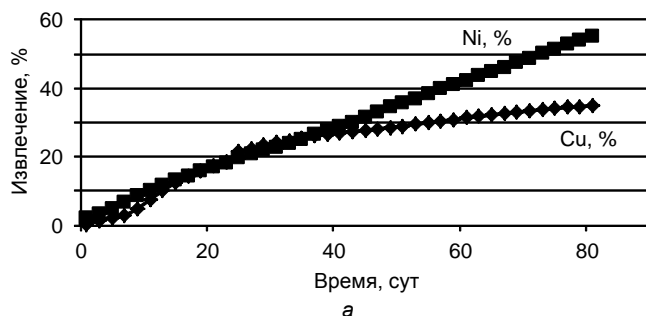
Для проверки возможности использования взвесей в качестве техногенного сырья для извлечения цветных металлов партию гранул выщелачивали раствором 2%-й серной кислоты.

Для изучения сорбционных свойств обожженных гранул в перколятор подавали модельный раствор, приготовленный из сульфатов меди и никеля и содержащий по 1 г/л ионов Cu^{2+} и Ni^{2+} .

В перколяторы диаметром 2,5 см помещали 84 г предварительно агломерированного материала (высота загрузки 23 см), один раз в сутки трижды в неделю подавали по 50 мл раствора серной кислоты в первом случае и модельного раствора сульфатов цветных металлов — во втором. Длительность эксперимента составляла 90 сут. На выходе фиксировали объем растворов, pH, Eh, фильтрат анализировали на содержание меди, никеля.

Результаты и обсуждение

Результаты эксперимента по сернокислотному выщелачиванию гранул из взвешенных веществ из прудков-отстойников представлены на рис. 3. За 90 сут обработки раствором серной кислоты необработанных гранул удалось добиться извлечения 55,7 % никеля и 36 % меди. Водородный показатель растворов практически не изменился и составил 1,2—1,3; Eh снизился с 490 до 402 мВ.



Рентгенофазовый анализ гранул по завершении эксперимента не выявил рефлексов сульфидов на дифрактограмме. Отдельно стоит отметить, что гранулы к концу опыта практически не разрушились, а фильтрационные характеристики ухудшились незначительно.

Результаты эксперимента по оценке сорбционных свойств обожженных гранулированных взвесей по отношению к ионам цветных металлов представлены на рис. 4. В течение первых десяти суток сорбция ионов меди находилась на уровне 90—93 %, никеля — 70 %, затем плавно снижалась. На 90-е сутки из модельного раствора извлекалось порядка 54 % Cu и 29 % Ni.

Вскрытие гранул показало, что происходит обогащение материала по меди и никелю до содержаний, сравнимых с промышленными. Так, содержание меди в гранулах верхней части колонок увеличилось до 0,9 %, в нижней — до 1,6 %. Содержание никеля также возросло с 0,32 до 0,84 и 1,22 % в верхней и нижней частях колонки соответственно.

По известной методике солянокислотной переработки, ранее примененной к хвостам обогащения вермикулитовых и медно-никелевых руд [10], синтезировали бруситосодержащий реагент из исследуемого материала. На рис. 5 представлена рентгенограмма образца. Отмечены рефлексы брусита, кальцита и галита.

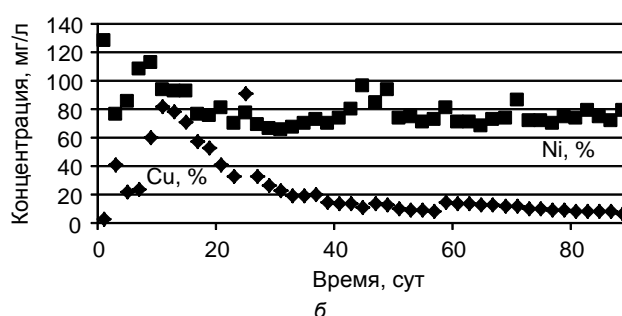


Рис. 3. Извлечение меди и никеля (а) и концентрация металлов в продуктивных растворах (б) в зависимости от времени выщелачивания

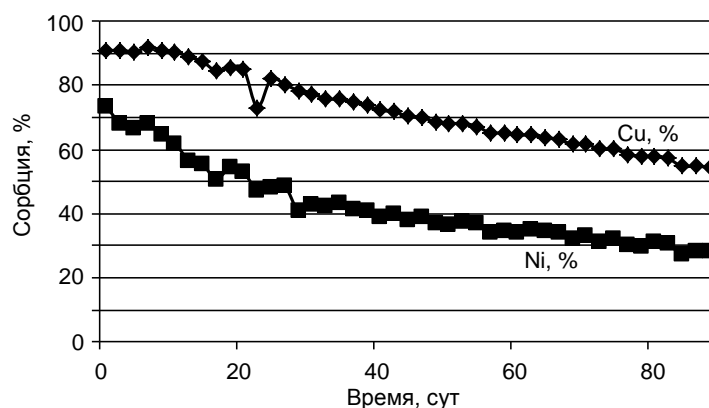


Рис. 4. Сорбция ионов меди и никеля из модельных растворов

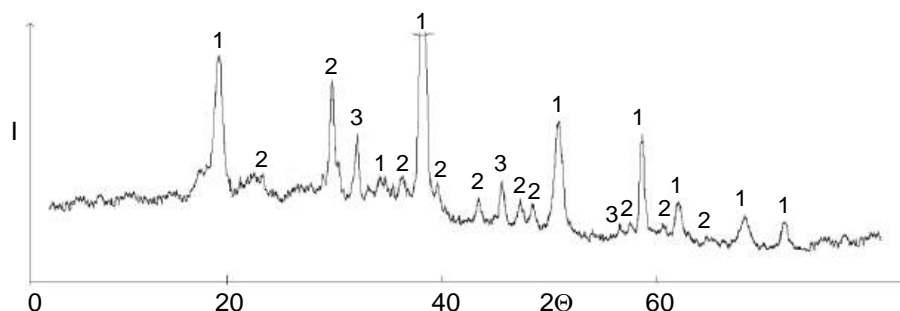


Рис. 5. Рентгенограмма сорбента, полученного солянокислотным вскрытием из донных отложений прудков-отстойников АО "Кольская ГМК": рефлекс: 1 — брусит; 2 — кальцит; 3 — галит

Ранее аналогичные сорбенты были опробованы авторами для очистки сточных вод от ионов фтора [11]. Пробные эксперименты с образцами, полученными из исследуемого материала, показали удовлетворительные результаты. При расходе термоактивированного в течение двух часов при температуре 500 °С реагента 1 г/л в статических условиях за один час удалось очистить модельные растворы, содержащие 10 и 100 мг/л фтор-ионов, на 36 и 62,2 % соответственно.

Заключение

Исследованы химический, минералогический и гранулометрический составы донных отложений прудков-отстойников медно-никелевого рудника, сформировавшихся за пять лет в условиях Крайнего Севера.

В лабораторных условиях выполнен эксперимент с использованием технологии кучного выщелачивания. Донные отложения прудков-отстойников, предварительно агломерированные, подвергали выщелачиванию раствором серной кислоты. В результате эксперимента удалось извлечь 55,78 % никеля и 35,3 % меди за 90 сут.

Вместе с тем показана возможность использования обожженных гранул, полученных из донных отложений, в качестве сорбента цветных металлов при очистке стоков.

Данный объект может также оказаться перспективным материалом в том числе для получения бруситоподобного сорбента, который может быть применен в системах очистки сточных вод от ионов фтора, тяжелых металлов и мышьяка [12, 13].

В дальнейших работах планируется детализировать возможности использования донных отложений в качестве бедного рудного материала и исходного сырья для получения сорбентов.

*Работа выполнена в рамках тем НИР
№ 0226-2019-0001 и 0226-2019-0047 и частично
поддержана из средств гранта РФФИ
№ 19-05-50065 Микромир*

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов Е. М., Садыков Р. К., Алискеров В. А., Киперман Ю. А., Комаров М. А. Техногенные месторождения — проблемы и перспективы вовлечения в хозяйственный оборот // Разведка и охрана недр. 2010. № 2. С. 17—20.
2. Быховский Л. З., Спорыхина Л. В. Техногенные отходы как резерв пополнения минерально-сырьевой базы: состояние и проблемы освоения // Минеральные ресурсы России. 2011. № 4. С. 15—20.
3. Министерство природных ресурсов и экологии Мурманской области, 2019. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2018 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: / <https://gov-murman.ru/region/environmentstate>
4. Маслобоев В. А., Селезнев С. Г., Макаров Д. В., Светлов А. В. Оценка экологической опасности хранения отходов добычи и переработки медно-никелевых руд // ФТПРПИ. 2014. № 3. С. 138—153.
5. Светлов А. В. Техногенные отходы горно-металлургического комплекса как сырье для очистки собственных сточных вод и доизвлечения цветных металлов: XX Научный семинар "Минералогия техногенеза-2019". — Миасс: ИМин УрО РАН, 2019. С. 116—120.
6. Riekkola-Vanhanen M., Palmu L. Talvivaara Nickel Mine — from a project to a mine and beyond: proc. of symposium Ni—Co 2013. Springer International Publishers, Switzerland. 2016. P. 269—278.
7. Watling H. R., Collinson D. M., Watling R. J., Shiers D. W. Simulated heap leaching and recovery of multiple elements from a mineralised black shale // Hydrometallurgy. 2017. № 167. P. 48—57.
8. Watling H. R., Elliot A. D., Maley M., van Bronswijk W., Hunter C. Leaching of a low-grade, copper-nickel sulfide ore. 1. Key parameters impacting on Cu recovery during column bioleaching // Hydrometallurgy. 2009. V. 97, № 3, 4. P. 204—212.
9. Баюрова Ю. Л. Сорбционная очистка сточных и природных вод от цветных металлов: XV Научный семинар "Минералогия техногенеза-2014". — Миасс: ИМин УрО РАН, 2014. С. 190—199.
10. Макаров Д. В., Семенова Е. П., Зоренко И. В., Меньшиков Ю. П. Исследование возможности использования хвостов обогащения вермикулитовых руд как сырья для получения соединений магния // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2009. № 12(1). С. 97—100.
11. Krasavtseva E. A., Svetlov A. V., Goryachev A. A., Makarov D. V., Masloboev V. A. Removal of fluoride ions from the mine water // Inzynieria Mineralna. 2020. № 1(45). V. 2. P. 71—4. DOI: <http://doi.org/10.29227/IM-2020-01-42>
12. Маслий А. И., Белобаба А. Г., Бочкарев Г. Р., Пушкарева Г. И., Коваленко К. А. Очистка техногенных вод и технологических растворов от ионов тяжелых металлов и мышьяка // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20. № 3. С. 351—356.
13. Бочкарев Г. Р., Пушкарева Г. И. Удаление стронция из водных сред с использованием природного и модифицированного сорбента // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2009. № 3. С. 104—109.

Bottom sediments of wastewater treatment settling ponds system as a promising complex raw material

^{1, 2} E. A. KRASAVTSEVA, ² A. V. SVETLOV, ² D. V. MAKAROV

¹ Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic of the Federal Research Centre "Kola Science Centre of the RAS",

Apatity, Murmansk region, Russia

² Institute of North Industrial Ecology Problems of the Federal Research Centre "Kola Science Centre of the RAS", Apatity, Murmansk region, Russia

The results of a study of the chemical, mineralogical, granulometric composition of sediments formed by settled suspended solids from settling ponds of the wastewater treatment system and considers the potential use of the material as a complex raw material are presented. Leaching of pre-agglomerated suspensions with 2 % sulfuric acid using 30 % sulfuric acid as a binder in 90 days made it possible to extract 36 % of copper and 55.7 % of nickel. The sorption properties of fired granules made with the use of sulfite alcohol stillage (SSB) as a binder were also demonstrated in relation to copper and nickel ions. In the first few days of the experiment, it was possible to adsorb 68—73 % nickel and 90—92 % copper from the model solution supplied to the percolator. The possibility of obtaining a brucite-containing sorbent by hydrochloric acid opening of the initial material of suspensions and its use for purifying model solutions from fluorine ions with an efficiency of up to 62 % is shown.

Keywords: suspended solids, sorbent, heap leaching, waste water treatment, copper, nickel.

Bibliography 13 references.

Received November 23, 2020

УДК 628.355

Бионанотехнологические аспекты очистки стоков системы водоотведения микроводорослями

В. С. ИВАНОВСКИЙ, д-р техн. наук; И. В. МАРКИН, канд. техн. наук;
Е. С. ЩЕЛКАНОВА, канд. биол. наук; Р. А. ВОЛОДЯШКИН

ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», г. Анапа, Краснодарский край, Россия

Рассмотрены прикладные аспекты бионанотехнологических процессов очистки модельных стоков системы водоотведения с использованием микроводорослей. Экспериментально определены кинетические параметры процесса культивирования микроводоросли *Chlorella vulgaris* (*C. vulgaris*) на модельных стоках систем водоотведения. Показан и исследован антимикробный эффект различных групп экзометаболических микроводорослей, рассмотрен механизм их действия.

Ключевые слова: очистка сточных вод, микроводоросли, антимикробные экзометаболические.

Сложная экологическая ситуация на большей части Российской Федерации, особенно в промышленных районах, требует принятия радикальных и широкомасштабных мер по защите окружающей среды от массовых антропогенных загрязнений [1]. Различные чрезвычайные ситуации техногенного характера часто приводят к попаданию в водоемы опасных химических соединений, что неизбежно сказывается на качестве питьевой воды и здоровье населения. В целом проблема очистки воды является одной из центральных и приобретает особое значение в условиях засушливого и жаркого климата, когда возможна нехватка пресной воды для обеспечения жизнедеятельности воинских подразделений и гражданского населения в местах ведения боевых действий и дислокации воинских подразделений.

Для решения этих проблем одним из актуальных направлений является проведение исследований, сориентированных на разработку способа очистки стоков систем водоотведения с использованием микроводорослей вида *C. vulgaris*.

Цель работы — проведение комплексного исследования по оценке эффективности использования микроводорослей *C. vulgaris* для очистки сточных вод.

Для достижения данной цели поставлены следующие задачи:

- оценить максимальные удельные скорости роста микроводоросли *C. vulgaris* в различных условиях, соответствующих трем климатическим сезонам ("лето", "осень—весна", "зима");

- определить скорости удаления основных биогенных загрязнителей — катионов аммония и фосфат-анионов — из модельных образцов;
- выделить из культуральной жидкости экзометаболические микроводорослей и оценить их антимикробное действие на микрофлору сточных вод.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выбраны микроводоросли *C. vulgaris* IPPAS C-2. Культивирование проводили в фотобиореакторе (рис. 1) с рабочим объемом 5 л.

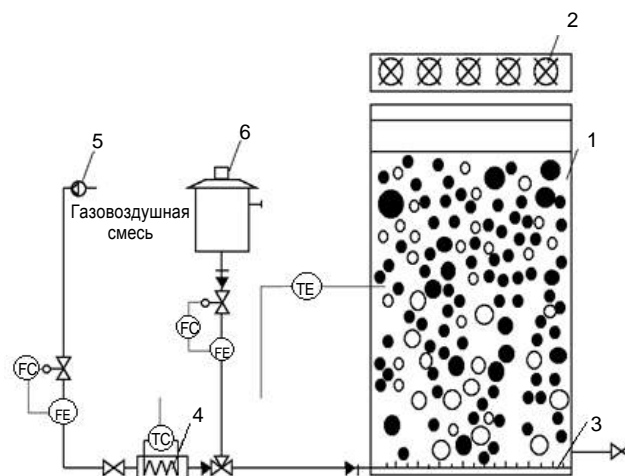


Рис. 1. Схема лабораторного фотобиореактора:

1 — рабочий объем; 2 — светодиодные лампы; 3 — устройство для подачи свежей питательной среды и барботирования; 4 — нагревательный элемент; 5 — компрессор; 6 — емкость с питательной средой; TE, FE — датчики температуры и расхода; TC, FC — регуляторы температуры и расхода

Заданный уровень освещения поддерживали светодиодными лампами. В качестве газовой смеси использовали атмосферный воздух с содержанием CO_2 0,05 %. Количество посевного материала составляло 20 % от объема питательной среды,

Ивановский Владимир Сергеевич, профессор, начальник.

E-mail: ilya.markin.92@bk.ru

Маркин Илья Владимирович, научный сотрудник.

E-mail: ilya.markin.92@bk.ru

Щелканова Елена Сергеевна, научный сотрудник.

E-mail: shchelkanova_el@mail.ru

Володяшкин Роман Андреевич, оператор.

E-mail: rvolodyashkin@bk.ru

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2020 г.

© Ивановский В. С., Маркин И. В., Щелканова Е. С., Володяшкин Р. А., 2021

начальная концентрация микроводорослей во всех образцах была одинакова (3×10^6 кл/мл). Концентрацию клеток микроводорослей в культуральной жидкости определяли методом прямого подсчета в камере Горяева.

Условия культивирования микроводоросли (температура и уровень освещенности), представленные в табл. 1, были заданы исходя из средних показателей, характерных для азотенка, установленного под открытым небом Центральной России, в указанные периоды года ("летний", "зимний", "осенне—весенний") [2].

Концентрации поллютантов (азота общего и фосфора общего) модельных образцов стоков систем водоотведения взяты из работы [3] и соответствуют следующим объектам-загрязнителям: штабы, управления и мотострелковые подразделения.

Определение концентрации катионов аммония осуществляли согласно природоохранному нормативному документу федеративному (ПНД Ф) 14.1:2.1–95 "Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов аммония в природных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера" [4].

Определение концентрации фосфат-анионов проводили согласно ПНД Ф 14.1:2.112–97 "Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации фосфат-ионов в пробах природных и очищенных сточных вод фотометрическим методом восстановлением аскорбиновой кислотой" [5].

Для наблюдения антимикробного эффекта экзометаболитов микроводоросли во всех модельных образцах был задан одинаковый уровень общего микробного числа (ОМЧ), составляющий $1,5 \cdot 10^6$ КОЕ/мл. Определение уровня ОМЧ осуществляли методом прямого посева по Коху с использованием в качестве плотной питательной среды мясоептонного агара (МПА), инкубацию проводили в течение 24 ч при температуре 37 °С.

Отделение клеток микроводорослей от культуральной жидкости осуществляли путем центрифуги-

рования на центрифуге Sigma 4-16K (rpm = 1500 в течение 10 мин). Экстракцию веществ липидной природы из культуральной жидкости производили без доступа света в мультиротаторе BioSan Multi Bio RS-24 петролейным эфиром при температуре 25 °С. Отгонку экстрагента осуществляли с использованием роторного испарителя.

Выделение экзометаболитов из культуральной жидкости проводили при помощи тонкослойной хроматографии. В качестве носителя использовали пластины, покрытые силикагелем. Подвижной фазой служила смесь петролейного эфира, этилового эфира и уксусной кислоты в соотношении 90 : 10 : 1. Проявление экстрагированных веществ проводили при помощи концентрированной серной кислоты.

Для идентификации антимикробного эффекта экзометаболитов микроводорослей использовали диско-диффузионный метод [6]. После проведения тонкослойной хроматографии находящиеся на носителе образцы экзометаболитов вырезали и помещали на чашки Петри, предварительно засеянные микроорганизмами из модельного образца. Чашки Петри инкубировали при температуре 37 °С и заданных показателях освещенности, характерных для соответствующих условий ("лето", "осень—весна", "зима"), в течение 24 ч. Антимикробный эффект образцов оценивали путем сравнения площади диска с площадью зоны подавления микробного роста вокруг него.

Для обеспечения достоверности результатов все эксперименты и анализы проводили в трех повторностях. Обработку экспериментальных данных осуществляли с использованием пакета прикладных программ Statistic.

Результаты и их обсуждение

Культивирование микроводоросли. Экспериментальное исследование процесса культивирования микроводорослей *C. vulgaris* IPPAS C-2 на образцах, моделирующих стоки системы водоотведения, позволило установить показатели, представленные в табл. 2.

Таблица 1

Характеристика модельных образцов стоков систем водоотведения

Условия культивирования	Температура T, °С	Уровень освещенности I, Клк	Катионы аммония NH_4^+ , мг/(л·сут)	Фосфат-анионы PO_4^{3-} , мг/(л·сут)	Концентрация клеток микроводорослей в среде, 10^6 клеток/мл	Уровень микробиологического загрязнения стоков (ОМЧ), 10^6 КОЕ/мл
Лето	30 ± 1	$15 \pm 0,8$	$50 \pm 1,5$	$12 \pm 0,4$	$3 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,05$
Осень—весна	15 ± 1	$7 \pm 0,4$				
Зима	10 ± 1	$6 \pm 0,3$				

Таблица 2

Расчетные показатели процесса культивирования микроводорослей *C. vulgaris* IPPAS C-2 на стоках системы водоотведения

Условия очистки	Максимальная удельная скорость роста μ_{max} , сут ⁻¹	Скорость удаления катионов аммония $\mu(\text{NH}_4^+)$, мг/(л·сут)	Скорость удаления фосфат-анионов $\mu(\text{PO}_4^{3-})$, мг/(л·сут)	Максимальная удельная скорость гибели микрофлоры μ , сут ⁻¹
Лето	$1,17 \pm 0,03$	$4,3 \pm 0,13$	$0,982 \pm 0,03$	$0,21 \pm 0,007$
Осень—весна	$0,81 \pm 0,03$	$3,955 \pm 0,16$	$0,945 \pm 0,04$	$0,15 \pm 0,006$
Зима	$0,33 \pm 0,01$	$2,455 \pm 0,07$	$0,764 \pm 0,04$	$0,10 \pm 0,004$

Наибольшие удельные скорости роста клеток микроводорослей μ_{\max} (рис. 2, а) и гибели микрофлоры $\mu_{\text{мф}}$ (рис. 2, б) наблюдались в летний период, так как данные условия приближены к оптимальным для роста водоросли [7].

Скорости удаления катионов аммония (рис. 2, в) и фосфат-анионов (рис. 2, г) достигли наибольших значений в условиях "лето", что объясняется активным метаболизмом растущих клеток, использующих катионы аммония и фосфат-анионы для биосинтеза белковых соединений.

Концентрация катионов аммония и фосфат-анионов в модельных стоках, очищенных микроводорослями, снизилась на 92 и 85 масс. %, соответственно, в течение 8 сут при культивировании в летний период. Для зимнего периода снижение концентраций катионов аммония и фосфат-анионов составило 54 и 69 масс. %, соответственно, за 11 дней. При этом уровни предельно допустимых концентраций (ПДК) катионов аммония (ПДК = 1,5 мг/л) и фосфат-анионов (ПДК = 3,5 мг/л) [8] не были достигнуты. Поэтому сбросу в окружающую среду такая вода не подлежит. Использование для очистки сточных вод микроводорослей вида *C. vulgaris* позволяет снизить концентрацию микрофлоры в сточных водах в зависимости от условий культивирования за счет выделения экзо-метаболитов антимикробного действия [9].

Исследование экзо-метаболитов микроводорослей антимикробного действия. Поскольку наибольшая скорость убыли ОМЧ наблюдалась в летний период, целесообразно исследовать на состав экзо-метаболитов культуральную жидкость, полученную при выращивании микроводоросли в "летних" условиях. Из работы [10] ясно, что антимикробным свойством обладают экзо-метаболиты микроводорослей липидной природы (неполярные соединения). Поэтому для экстракции липидов в качестве экстрагента был выбран петролейный эфир. Отбор проб для экстракции из культуральной жидкости проводили на стационарной фазе роста. Анализ экстракта методами тонкослойной и жидкостной хроматографии показал наличие в нём следующих соединений липидной природы: 1) триглицериды; 2) О-диалкилмоноглицериды; 3) жирные кислоты (миристиновая (С 14:0); пальмитиновая (С 16:0); стеариновая (С 18:0); олеиновая (С 18:1); эруковая (С 22:1)); 4) длинно-цепочечные спирты; 5) О-диалкиловые эфиры глицерина. Так как культивирование микроводоросли проводили в трёх режимах, было решено проверить антимикробный эффект выделенных веществ в различных условиях освещенности, аналогичных тем, при которых осуществлялось культивирование водорослей.

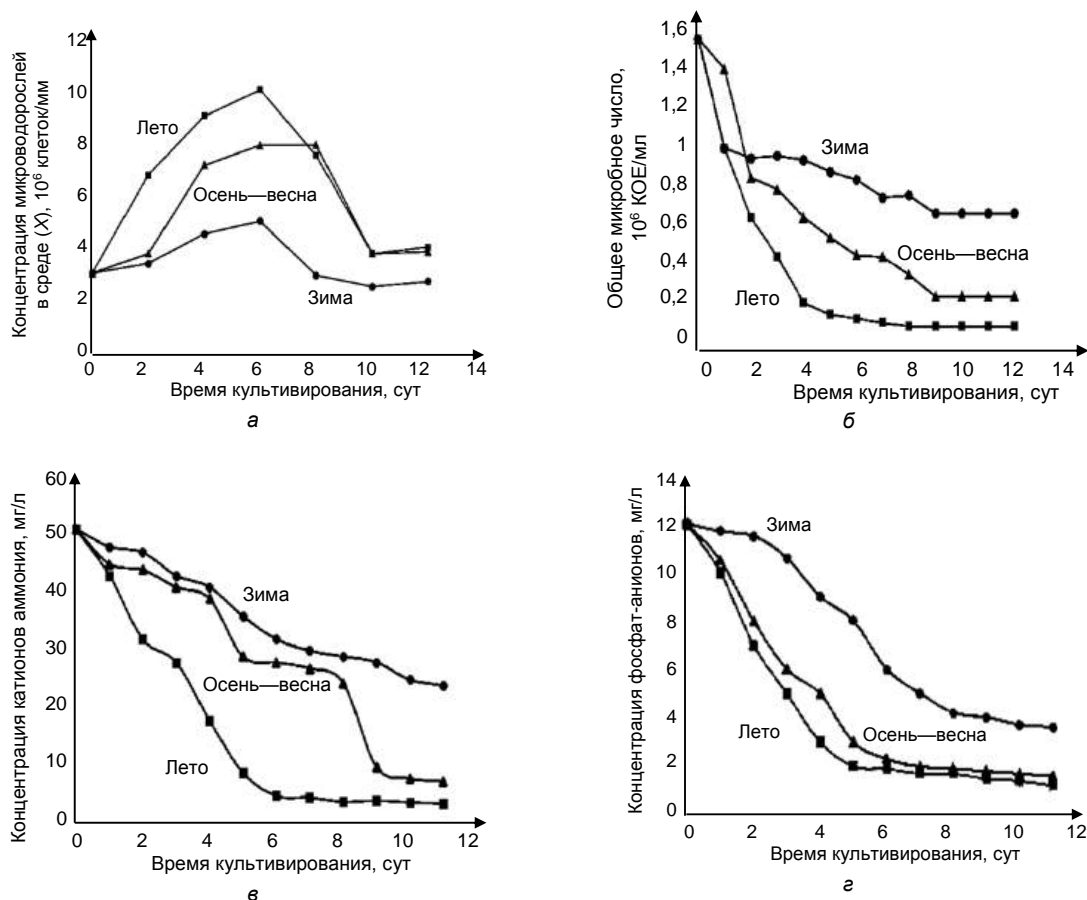


Рис. 2. Кинетика очистки муниципальных сточных вод:
а — накопление биомассы; б — убыль ОМЧ; в — убыль катионов аммония; г — убыль фосфат-анионов

Наибольшее отношение зоны ингибирования микробного роста к диаметру образца наблюдалось у второй группы веществ (О-диалкилмоноглицериды). Уменьшение уровня освещенности приводило к уменьшению зоны ингибирования в 1,95 и 5,6 раз в "осенне-весенний" и "зимний" периоды, соответственно, по сравнению с "летним" периодом (табл. 3).

Таблица 3

Антимикробный эффект основных групп экзометаболитов *C. vulgaris*

Режим освещения	Группа веществ	Отношение площади зоны ингибирования к площади диска (антимикробный эффект)
Лето	1	5,8
	2	7,8
	3	5,2
	4	4
	5	1,2
Осень—весна	1	2
	2	4
	3	1,56
	4	2
	5	1,1
Зима	1	1,3
	2	1,4
	3	1,1
	4	1,2
	5	1

При освещении, соответствующем летнему периоду, триглицериды и жирные кислоты (группы 1, 3) оказывают значительное влияние на рост микроорганизмов стоков. При уменьшении уровня освещенности их антимикробный эффект уменьшается в 2,9 и в 3,3 раза соответственно. В "зимнем" периоде антимикробный эффект триглицеридов и жирных кислот уменьшается в 4,4 и в 4,7 раза, соответственно, по сравнению с летним.

Длинноцепочечные спирты (вещество 4) проявляют выраженный антимикробный эффект в условиях летнего периода, уменьшающийся в весенне-осенний и зимний периоды в 2 и 3,3 раза соответственно.

О-диалкиловые эфиры глицерина (вещество 5) оказывают незначительное антагонистическое действие на микрофлору сточных вод.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что антимикробный эффект экзометаболитов водорослей зависит от уровня освещенности окружающей среды. Данный эффект объясняется теорией перекисного окисления липидов Баха–Энглера [11] и цепных разветвленных реакций Н. Н. Семенова [12]: поток фотонов инициирует образование реактивных форм кислорода, которые взаимодействуют с веществами липидной формы, что приводит к появлению липидных радикалов. Образовавшиеся липидные радикалы, в свою очередь, могут атаковать молекулы белков и нуклеиновых кислот, что приводит к нарушению метаболизма и гибели клетки бактерии из микробиологического состава стоков. При этом негативного влияния на метаболизм клеток микроводоросли *Chlorella* из-за наличия эффективной системы антиоксидантной защиты не оказывается [13].

Заключение

В ходе экспериментальных исследований выявлено, что при культивировании микроводорослей *C. vulgaris* на модельных стоках происходит снижение концентраций катионов аммония и фосфат-анионов в среде, а также уменьшение микробиологического загрязнения за счет выделяемых клетками экзометаболитов, обладающих антимикробным эффектом (триглицериды; О-диалкилмоноглицериды; жирные кислоты: миристиновая (С 14:0), пальмитиновая (С 16:0), стеариновая (С 18:0), олеиновая (С 18:1), эруковая (С 22:1); длинноцепочечные спирты, О-диалкиловые эфиры глицерина). Установлены максимальные и минимальные удельные скорости роста клеток водорослей (1,17 и 0,33 сут⁻¹), убыли азот- (–4,30 и –2,46 мг/(л·сут)) и фосфорсодержащих (–0,98 и –0,76 мг/(л·сут)) субстратов соответственно, гибели микрофлоры сточных вод (–0,21 и –0,10 сут⁻¹). Количественные характеристики данных процессов напрямую зависят от условий культивирования. Наибольшее значения они достигают в условиях "летнего" сезона. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод об эффективности применения систем очистки сточных вод на основе микроводорослей *C. vulgaris* в южных регионах, где режим температуры и освещенности позволяет проводить процесс с наибольшей эффективностью. Для более детального изучения данного вопроса планируются дальнейшие исследования, направленные на определение спектра действия антимикробных экзометаболитов микроводорослей, которые будут иметь как фундаментальное, так и практическое значение для экологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попова Е. А. Синтез, свойства и некоторые виды биологической активности тетразолов: дисс. ... д-р хим. наук. — СПб., 2018. — 557 с.
2. Маркин И. В. Интеграция процессов культивирования микроводоросли *Chlorella vulgaris* на муниципальных сточных водах и биосинтеза молочной кислоты: дисс. ... канд. техн. наук. — Казань, 2020. — 160 с.
3. Ивановский В. С., Игнатчик В. С., Саркисов С. В. Управление экологической безопасностью и экономической эффективностью систем водоотведения Минобороны России // Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2019. № 4. С.52—58.
4. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов аммония в природных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера: ПНД Ф 14.1:2.1–95. Введ. с 21.03.1997. — М., 2004. — 22 с.
5. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации фосфат-ионов в пробах природных и очищенных сточных вод фотометрическим методом восстановлением аскорбиновой кислотой: ПНД Ф 14.1:2.112–97. Введ. с 21.03.1997. — М., 2004. — 18 с.
6. Решедько Г. К. Определение чувствительности к антибиотикам: методы, результаты, оценка // Клиническая антимикробная химиотерапия. 1999. Т. 1. № 3. С. 113.
7. Нагорнов С. А., Мещерякова Ю. В. Исследование условий культивирования микроводоросли хлорелла в трубчатом фотобиореакторе // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2015. Т. 21. № 4. С. 653.
8. Предельно допустимые концентрации химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: ГН 2.1.5.1315-03. Введ. с 15.06.2003. — М., 2003. — 152 с.
9. Маркин И. В., Еськова М. А., Бушковская А. И., Стехин Д. С., Киселева А. А., Кокорев Н. А. Использование микроводоросли *Chlorella Vulgaris* для очистки сточных вод: мат. Всеросс. открытого конкурса студентов вузов и молодых исследователей "Взгляд мо-

лоды на проблемы региональной экономики". — Тамбов, 2017. С. 124—127.

10. Читао С. И. Внеклеточные вещества липидной природы синезеленых микроводослей: дисс. ... канд. биол. наук. — М., 1984. — 171 с.

11. Bach A. N. On the role of peroxides in the processes of slow oxidation // Zh Russ Phys-Chem Soc. 1897. V. 29. P. 373—395.

12. Semenov N. N. Some problems relating to chain reactions and to the theory of combustion // Nobel Lecture. 1956. P. 487—514.

13. Makpol S. et al. *Chlorella vulgaris* modulates hydrogen peroxide-induced DNA damage and telomere shortening of human fibroblasts derived from different aged individuals // African J. Traditional, Complementary and Alternative Medicines. 2009. V. 6. № 4.

Bionanotechnological aspects of wastewater treatment by microalgae

V. S. IVANOVSKY, I. V. MARKIN, E. S. E. S. SHCHELKANOVA,
R. A. VOLODYASHKIN

Federal State Autonomous Institution Military Innovation Technopolis,
Anapa, Krasnodar krai, Russia

*The article deals with the applied aspects of bionanotechnological processes of model wastewater treatment in the water disposal system of the Ministry of defense of the Russian Federation using microalgae. Kinetic parameters of the cultivation process of the microalgae *Chlorella vulgaris* (*C. vulgaris*) on model wastewater systems were experimentally determined. The antimicrobial effect of various groups of microalgae exometabolites is shown and studied, and the mechanism of their action is considered.*

Keywords: wastewater treatment, microalgae, antimicrobial exometabolites.

Bibliography 13 references.

Received November 20, 2020

УДК 543.3

Влияние природных минералов на физико-химические показатели питьевой воды

А. А. МАРЦЕВ, канд. биол. наук; О. Г. СЕЛИВАНОВ

Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых,
г. Владимир, Россия

Приведены результаты исследования влияния природных минералов кремня и шунгита на такие показатели воды, как pH, общая минерализация, электропроводность, содержание катионов (NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , Ca^{2+}) и анионов (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , F^- , CO_3^{2-}). Установлено, что добавление щебня кремня и шунгита в воду достоверно существенней по сравнению с процессом отстаивания повышает водородный показатель воды. Одновременно происходит снижение в воде общей минерализации (что ведет к уменьшению показателя электропроводности). Отмечено снижение концентрации ионов кальция на 36,0 % в воде, настоянной на шунгите, и на 20,5 % в воде, настоянной на кремне. Выявлено существенное повышение концентрации ионов K^+ в воде, настоянной на кремне (46,3 %). Что касается анионов, то по F^- наблюдается снижение концентрации как в случае с минералом шунгита, так и кремня. Рекомендовано использовать данные природные минералы для очистки водопроводной воды, имеющей повышенную жесткость и избыточное содержание фторид-ионов.

Ключевые слова: водопроводная вода, шунгит, кремнь, катионы, анионы.

Количество воды, используемой человеком для питьевых и технических целей, с каждым годом возрастает. При этом вода из природных поверхностных источников настолько сильно загрязнена, что без предварительной очистки использовать ее для питьевых и технических целей опасно. Она может содержать повышенные концентрации тяжелых металлов, нефтепродуктов, фенолов, сложной хлорорганики, антибиотиков, поверхностно-активных веществ, пестицидов, свободных радикалов, патогенных микроорганизмов и т. д.

Для очистки сильно загрязненных вод до нормативных требований используют сложные комплексные многостадийные технологии водоочистки, основанные на ультра- и нанофильтрации, обратном осмосе, ионном обмене, выпаривании, электрохимических методах обработки, использовании ультрафиолетового излучения и т. д. [1—3]. Данные технологии очистки воды сложны и очень дороги. Вода из подземных артезианских источников, используемая для питьевых целей, в каждом регионе имеет свои специфические физико-химические особенности, обусловленные природными факторами конкретной географической зоны. Для Центрального региона России, в частности для Владимирской области, такими особенностями физико-химического состава природной подземной воды, используемой для

питьевых целей, являются повышенная общая жесткость и наличие в некоторых районах области повышенного содержания ионов фтора и марганца [4, 5].

Проблема очистки воды, используемой для питьевых целей, является весьма актуальной. Для этой цели в домашнем хозяйстве населением при очистке питьевой воды все чаще используют не только бытовые фильтры, но и недорогие природные минералы (шунгит, аргиллит, горный кварц, кремнь и т. д.), на которых настаивают отфильтрованную воду.

Большой интерес представляет использование для очистки воды таких природных минералов, как шунгит и кремнь, вследствие их большой распространенности, невысокой стоимости и уникальных сорбционных свойств. Проводятся исследования, направленные на использование шунгита и кремня не только в целях очистки воды [6—8], но и в сельском хозяйстве [9, 10], микробиологии [11, 12] и технологическом производстве.

Таким образом, всестороннее изучение свойств указанных природных минералов весьма актуально. Цель настоящей работы — изучение влияния природных минералов шунгита и кремня на физико-химические показатели питьевой воды.

Материалы и методы исследования

В качестве природных минералов для оценки их влияния на физико-химические показатели воды авторами *выбраны кремнь и шунгит*. Для проведения экспериментов были подготовлены щебни минералов со средним размером фракции 4—8 мм. Использовали природный минерал шунгит Зажогинского месторождения, расположенного в Карелии, и кремнь

Марцев Антон Андреевич, доцент.

E-mail: martsevaa@yandex.ru

Селиванов Олег Григорьевич, заведующий лабораториями.

E-mail: martsevaa@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2020 г.

© Марцев А. А., Селиванов О. Г., 2021

Добрятинского месторождения Владимирской области. В состав шунгита Зажогинского месторождения, кроме углерода, входят следующие соединения (масс. %): SiO_2 — 57,0; Al_2O_3 — 4,1; TiO_2 — 0,2; FeO — 0,6; MnO — 0,16; S — 1,2; K_2O — 1,5. В составе минерала кремне, кроме SiO_2 (94 масс. %), содержатся различные оксиды элементов (масс. %): Al_2O_3 (0,4—1); Fe_2O_3 (0,2—0,6); CaO (0,2—1,0), а также (мкг/г): Ba (50—60); Ti (36—120); Mn (10—50); B (25—100); Ni, Cu, Y (3—10).

Методика проведения эксперимента. В 3 стеклянные колбы наливали водопроводную воду по 500 см³. Затем в 2 колбы помещали щебень кремня и шунгита по 15 г. В 3-й колбе (контроль) оставляли только водопроводную воду. Эксперименты проводили в статическом режиме в течение 11 сут. Пробы из колб для анализа физико-химических показателей воды после процесса настаивания на щебнях кремня и шунгита отбирали в 1-е, 4-е, 7-е и 11-е сутки. С таким же временным интервалом отбирали пробы из контрольной колбы. Эксперименты проводили в 2 повторностях. Водородный показатель воды определяли на pH-метре HI 83141 HANNA. Общую минерализацию и электропроводность определяли на кондуктометре-солемере HI 9835 HANNA. Количественное содержание катионов (NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , Ca^{2+}) и анионов (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , F^- , CO_3^{2-}) в пробах воды определяли с помощью системы капиллярного электрофореза "Капель-104Т" по методикам ПНД Ф 14.1:2.4.167-2000 (для определения катионов) и ПНД Ф 14.1:2.4.157-99 (для определения анионов).

Статистическую обработку проводили с помощью программы Statistica. Статистически значимую разницу между опытом и контролем определяли с помощью t-критерия для двух независимых выборок в программе Statistica.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных экспериментов установлено, что на протяжении 11 сут водородный показатель изменялся в сторону повышения как в водопроводной воде, настоящей на шунгите и кремне, так

и в контроле. Это видно из табл. 1, где представлены физико-химические показатели водопроводной воды, настоящей на шунгите и кремне, пробы которой были отобраны на 1-е, 4-е, 7-е и 11-е сутки.

Уже на первые сутки в контроле наблюдается статистически значимое ($p = 0,000308$) отличие водородного показателя pH от аналогичного показателя на момент начала проведения эксперимента. Между опытом и контролем статистически значимые отличия также есть уже на 1-е сутки ($p = 0,000459$). Таким образом, процесс подщелачивания в опытных образцах происходит достоверно интенсивней.

Повышение pH в контроле по истечении 11 суток составило 0,67 ед., а в водопроводной воде, настоящей на шунгите и кремне, — 0,83 и 0,84 ед. соответственно. Таким образом, очевидно влияние природных минералов шунгита и кремня на водородный показатель водопроводной воды.

Процесс отстаивания воды в контроле на показатель общей минерализации статистически достоверно не повлиял (между контролем в начале проведения эксперимента и на 11-е сутки $p = 0,056544$).

В опытных образцах водопроводной воды, настоящей на кремне, показатель общей минерализации на 11-е сутки снизился на 16,0 % ($p = 0,032827$), а статистически значимое отличие проявилось уже на 4-е сутки ($p = 0,044153$). В опытных образцах водопроводной воды, настоящей на шунгите, показатель общей минерализации на 11-е сутки снизился на 23,1 %.

Аналогичные результаты получены при анализе электропроводности образцов воды, настоящей на кремне и шунгите, что вполне объяснимо, т. к. эти два показателя находятся в тесной связи друг с другом. Снижение показателя общей минерализации в образцах с водой, настоящей на шунгите и кремне, привело к снижению их электропроводности.

Большее снижение показателя общей минерализации обнаружено у водопроводной воды, настоящей на щебне минерала шунгита. Во многом это объясняется высокими сорбционными, каталитическими и восстановительными свойствами минерала шунгита, эффективность которых напрямую связана с наноструктурой и составом образующих элементов

Таблица 1

Физико-химические показатели водопроводной воды, настоящей на шунгите и кремне

Водородный показатель pH, ед.					
	0 суток	1-е сутки	4-е сутки	7-е сутки	11-е сутки
Контроль	7,72	8,01	8,32	8,40	8,39
Шунгит	7,72	8,30	8,52	8,51	8,55
Кремень	7,72	8,29	8,51	8,52	8,54
Общая минерализация, мг/л					
	0 суток	1-е сутки	4-е сутки	7-е сутки	11-е сутки
Контроль	197,0	197,1	196,3	197,3	188,4
Шунгит	197,0	189,5	173,2	160,5	151,1
Кремень	197,0	192,5	185,5	180,1	165,5
Электропроводность, μS					
	0 суток	1-е сутки	4-е сутки	7-е сутки	11-е сутки
контроль	393,5	393,3	392,5	393,1	378,7
Шунгит	393,5	378,5	350,5	321,5	302,5
Кремень	393,5	384,5	371,2	359,5	330,5

шунгитного углерода. Основу шунгитного углерода составляют полые, многослойные фуллереноподобные сферические глобулы диаметром 10—30 нм, содержащие пакеты углеродных слоев, охватывающих нанопоры. Фуллереноподобные глобулы могут содержать от нескольких десятков до нескольких сотен атомов углерода и различаться по форме и размерам. Благодаря сетчато-шарообразному строению природные углеродные фуллерены являются идеальными сорбентами, что обусловлено прежде всего наличием большого числа двойных сопряженных связей и реакционных центров на замкнутой углеродной сфере [13].

С помощью системы капиллярного электрофореза "Капель-104Т" авторами проанализирован катионно-анионный состав образцов воды, настоящей в контроле (К), на шунгите (Ш) и кремне (Кр). Полученные результаты представлены в табл. 2 и 3.

Анализ результатов показал, что на 11-е сутки в образцах воды, настоящей на шунгите, произошло существенное снижение концентрации ионов кальция (на 36,0 %). При этом в контроле тот же показатель снизился на 16,8 %. Стоит добавить, что статистически достоверное отличие в концентрациях Ca^{2+} между контролем в самом начале проведения эксперимента и в экспериментальных образцах произошло на 7-е и 11-е сутки соответственно. Воздействие шунгита по отношению к растворенным в воде катионам Ca^{2+} объясняется тем, что ионы Ca^{2+} переводятся каталитически активным шунгитом в форму нерастворимых карбонатов за счет процесса взаимодействия с CO_2 , который генерируется при окислении органических веществ кислородом [14].

В концентрациях других катионов в воде, настоящей на шунгите, существенных изменений не произошло.

На 11-е сутки в образцах воды, настоящей на кремне, также произошло существенное снижение

концентрации ионов кальция (на 20,5 %), но не намного большее, чем в контроле (16,8 %), и статистически достоверной разницы выявлено не было ($p = 0,172128$). Следует отметить существенное увеличение в образцах воды, настоящей на кремне, концентрации ионов K^+ (на 46,3 % по сравнению с концентрацией на момент начала проведения эксперимента), а также незначительное увеличение концентрации по ионам Mg^{2+} (на 4,1 и 4,8 % для образцов воды, настоящей на шунгите и кремне соответственно).

Анализ результатов проведенных опытов (табл. 3) показывает, что на 11-е сутки в образцах воды, настоящей на шунгите и кремне, произошло незначительное повышение концентраций ионов Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- . Концентрация карбонат-ионов CO_3^{2-} в воде, настоящей на шунгите, значительно ($p = 0,014965$) снизилась (28,3 % против 11,2 % в контроле), а в воде на кремне практически не изменилась по сравнению с контролем. Необходимо отметить снижение концентрации ионов F^- в случаях с водой, настоящей как на шунгите, так и на кремне, причем в воде, настоящей на кремне, снижение концентрации произошло на 33,4 % относительно момента начала эксперимента, а в воде, настоящей на шунгите, — на 16,7 %.

Таким образом, анализируя результаты изменения концентраций катионов и анионов в воде, настоящей на шунгите и кремне, можно говорить об эффективном сорбционном действии данных природных минералов по отношению к ионам Ca^{2+} , CO_3^{2-} , F^- , что в принципе актуально для воды центрального водоснабжения некоторых районов Владимирской области, имеющей повышенную жесткость, обусловленную солями кальция, и избыточное количество фторид-ионов, присутствие которых связано с использованием в качестве питьевой воды подземных артезианских вод.

Таблица 2

Содержание катионов в образцах воды, настоящей в контроле, на шунгите и кремне, мг/л

	0 суток	1-е сутки			4-е сутки			7-е сутки			11-е сутки		
		К	Ш	Кр	К	Ш	Кр	К	Ш	Кр	К	Ш	Кр
NH_4^+	0,16	0	0,05	0,122	0,13	0	0	0	0	0	0,04	0,029	0,22
K^+	2,33	1,18	1,17	1,37	1,29	1,17	1,23	1,39	1,14	1,37	2,79	1,96	3,41
Na^+	10,21	9,05	9,65	10,34	9,13	9,02	9,29	9,95	9,83	10,22	9,93	9,22	10,78
Mg^{2+}	16,69	16,79	18,03	18,52	18,05	17,53	17,74	17,9	17,16	17,35	17,13	17,37	17,5
Sr^{2+}	0,66	0,07	0,18	0,35	0,28	0,39	0,30	0,27	0,19	0,35	0,55	0,62	0,48
Ba^{2+}	0,14	0,13	0,16	0,15	0,16	0,17	0,16	0,15	0,15	0,16	0,14	0,13	0,18
Ca^{2+}	57,58	53,62	59,23	61,85	61,67	54,12	55,52	59,42	43,59	51,29	47,9	36,84	45,7

Таблица 3

Содержание анионов в образцах воды, настоящей в контроле, на шунгите и кремне, мг/л

	0 суток	1-е сутки			4-е сутки			7-е сутки			11-е сутки		
		К	Ш	Кр	К	Ш	Кр	К	Ш	Кр	К	Ш	Кр
Cl^-	12,7	12,73	13,32	14,31	13,92	13,27	13,0	13,83	13,16	13,0	14,35	13,12	14,1
SO_4^{2-}	15,02	16,05	17,04	16,73	17,7	18,1	17,5	18,12	18,8	14,9	18,97	19,24	17,16
NO_3^-	0,58	0,59	0,61	0,65	0,61	0,70	0,73	0,64	0,71	0,68	0,64	0,72	0,70
F^-	0,24	0,25	0,13	0,25	0,21	0,22	0,20	0,22	0,19	0,18	0,22	0,20	0,16
CO_3^{2-}	180	166,6	165,7	179,0	172	157	156	147	117	139	160	129	162

Заключение

В результате проведенных экспериментов установлено, что при добавлении в водопроводную воду щебня шунгита и кремня статистически достоверно происходит процесс подщелачивания. Одновременно происходит снижение общей минерализации воды, обусловленное сорбционным действием шунгита и кремня по отношению к ионам Ca^{2+} и CO_3^{2-} . При настаивании воды на кремне она обогащается ионами K^+ и Mg^{2+} , что может благоприятно влиять на организм человека. Данные природные минералы можно использовать для очистки централизованной водопроводной воды от повышенной жесткости и от повышенного содержания фторид-ионов, что актуально для некоторых районов Владимирской области. При этом в качестве сорбента можно применять местный экологически безопасный минерал кремний Добрянтинского месторождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трифонова Т. А., Поворов А. А., Ширкин Л. А., Селиванов О. Г., Ильина М. Е. Комплексная технология очистки фильтрационных вод полигонов твердых бытовых отходов // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 11. С. 4—9.
2. Поворов А. А., Павлова В. Ф., Шиненкова Н. А., Логунов О. Ю. Технология очистки дренажных полигонных вод // Твердые бытовые отходы. 2009. № 4. С. 26—27.
3. Трифонова Т. А., Селиванова Н. В., Ширкин Л. А., Селиванов О. Г., Ильина М. Е. Проблемы утилизации ТБО на полигонах // Изв. Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 3-2. С. 685—687.
4. Трифонова Т. А., Марцев А. А., Селиванов О. Г., Подо-

лец А. А. Гигиеническая оценка содержания фтора в воде централизованного водоснабжения Владимирской области // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98. № 7. С. 701—706.

5. Martsev A., Selivanov O. The research of fluoride ions concentration in household water supply // E3S Web of Conferences. 2020. № 164. P. 01016.

6. Панов П. Б., Калинин А. И., Сороколетова Е. Ф., Кравченко Е. В., Плахотская Ж. В., Андреев В. П. Использование шунгитов для очистки питьевой воды. — Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. С. 103.

7. Гончарук В. В., Чеботарева Р. Д., Баштан С. Ю., Косоруков А. А., Демченко В. Я., Каганов В. Я. Влияние кремня на минеральный состав воды // Химия и технология воды. 2012. Т. 34. № 3. С. 249—259.

8. Скоробогатов Г. А., Гончаров Г. Н., Ашмарова Ю. А. Ионно-обменные и адсорбционные свойства карельских шунгитов, контактирующих с водой // Экологическая химия. 2012. № 21(1). С. 10.

9. Боголюбова Н. В., Романов В. Н., Девяткин В. А., Калинин Ю. К. Оптимизация процессов пищеварения и обмена веществ в организме овец при использовании комплекса эрготропных веществ в составе минерала шунгита // Ветеринария и кормление. 2014. № 5. С. 88—90.

10. Трemasова А. М., Ахметов Ф. Г., Коростылева В. П. Влияние шунгита на иммунный статус телят // Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. 2011. № 2(6). С. 97—98.

11. Пономарев А. П., Фролова Л. В. Хелатирующее воздействие водных экстрактов шунгита на микроорганизмы // Дезинфекция, антисептика. 2013. Т. 4. № 1(13). С. 50—58.

12. Серегина Н. В., Честнова Т. В. Ингибирование протеолитических и сахаролитических ферментов *Pseudomonas Aeruginosa* под действием экстракта шунгита // Вестник новых медицинских технологий. 2008. Т. 15. № 4. С. 167—168.

13. Ignatov I., Mosin O. V. The structure and composition of natural carbonaceous fullerene containing mineral shungite // International Journal of Advanced Scientific and Technical Research. 2013. V. 6. № 11—12. P. 9—21.

14. Горштейн А. Е., Барон Н. Ю., Сыркина М. Л. Адсорбционные свойства шунгитов // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 1979. Т. 22. № 6. С. 711—715.

Influence of natural minerals on physical and chemical parameters of drinking water

A. A. MARTSEV, O. G. SELIVANOV

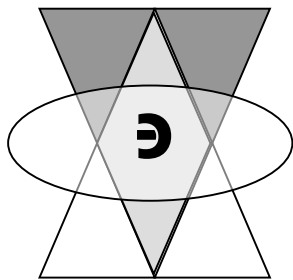
Vladimir state University named after A. G. and N. G. Stoletov, Vladimir, Russia

The article presents the results of research on the influence of natural minerals of flint and shungite on such water parameters as pH, total mineralization, electrical conductivity, cation content (NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , Ca^{2+}) and anions (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , F^- , CO_3^{2-}). It was found that the addition of crushed flint and shungite to the water significantly increases the hydrogen index of water in comparison with the settling process. At the same time, the total mineralization in the water decreases (which leads to a decrease in the electrical conductivity index). There was a significant decrease in the concentration of calcium ions (by 36.0 %) in shungite-infused water and by 20.5 % in flint-infused water. A significant increase in the concentration of K^+ ions in water infused with silicon (46.3 %) was revealed. As for anions, the F^- -concentration decreased, both in the case of the mineral shungite and flint. It is recommended to use these natural minerals for cleaning tap water that has increased hardness and excessive content of fluoride ions.

Keywords: tap water, shungite, flint, cations, anions.

Bibliography — 14 references.

Received November 22, 2020



УДК 622.692:622.276

Чрезвычайные ситуации, экологическая оценка их последствий

Паспортизация пружинных клапанов в нефтяной отрасли как механизм снижения экологических рисков

И. Б. АХМАДУЛЛИН, канд. техн. наук
ООО «Славутич», г. Ижевск, Россия

^{1, 2} **В. А. ВОЛОХИН**; ² **И. В. ГРАКОВИЧ**; ² **Н. П. КУЗНЕЦОВ**, д-р техн. наук
¹ Частная профессиональная образовательная организация «Нефтяной техникум»,
г. Ижевск, Россия
² Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова,
г. Ижевск, Россия

И. Т. СЕВРЮКОВ, д-р техн. наук
ФАУ «25-й Государственный научно-исследовательский институт химмотологии»
Министерства обороны РФ, Москва, Россия

Рассмотрены вопросы обеспечения безаварийной работы трубопроводных коммуникаций при добыче и транспортировке газа и нефти путем оценки динамических качеств клапанов с пружинными элементами. Изложена технология проведения паспортизации клапанов с пружинными элементами, в том числе в процессе их эксплуатации.

Ключевые слова: клапан с пружинным элементом, гидравлический удар, паспорт пружинного клапана.

Роль агрегатов автоматики, к которым относится аппаратура защиты и предохранения пневмогидросистем от избыточного давления в питающих трактах, в обеспечении общей надежности работы объектов машиностроения трудно переоценить. Обеспечение стабильности выходных параметров агрегатов автоматики в трубопроводных магистралях высококалорийных топлив, прежде всего криогенных, таких, как

жидкий водород, сжиженный природный газ, синтетические жидкости с повышенными агрессивными и токсичными свойствами, гарантирует надежность эксплуатации трубопроводных сетей, снижает экологические риски. Особенно актуальны эти проблемы для трубопроводных сетей в нефтегазовой отрасли, поскольку процессы добычи и транспортировки газа и нефти сопровождаются нестабильными гидравлическими процессами движения флюида, что приводит к возникновению в трубопроводной арматуре гидравлических ударов [1].

Особое внимание уделяется безопасности проводимых работ, устойчивости и надежности функционирования оборудования и безаварийной работе гидросистем бурения, сбора и транспортировки добываемых и технологических жидкостей. Важным процессом является профилактика нефтегазовых фонтанов в целях предотвращения выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду, в том числе в водные бассейны. Поэтому защита гидродинамических систем от гидравлических ударов и аномально высоких давлений является крайне актуальной. Для решения этой проблемы в отечественной нефтегазовой промышленности и за рубежом широко используют различные комплексы запорно-предохранитель-

Ахмадуллин Ильдар Булатович, директор.

E-mail: tmitmm@istu.ru

Волохин Виктор Аркадьевич, заместитель директора по учебной работе, соискатель ученой степени канд. техн. наук.

E-mail: tmitmm@istu.ru

Гракович Игорь Валентинович, соискатель ученой степени канд. техн. наук.

E-mail: tmitmm@istu.ru

Кузнецов Николай Павлович, профессор.

E-mail: tmitmm@istu.ru

Севрюков Игорь Тихонович, профессор, ведущий научный сотрудник.

E-mail: tmitmm@istu.ru

Статья поступила в редакцию 1 июня 2020 г.

© Ахмадуллин И. Б., Волохин В. А., Гракович И. В.,
Кузнецов Н. П., Севрюков И. Т., 2021

ных устройств, предохранительных клапанов [2]. Конструктивно-компоновочные особенности предохранительных клапанов определяют особенности их эксплуатации.

Особенности динамики предохранительных и регулирующих клапанов с упругими элементами (пружинами)

Работоспособность агрегатов автоматики пневмогидравлических систем во многом определяется характером динамических процессов в системе, природа которых обусловлена вибрационными и ударными нагрузками, действующими на запорно-регулирующие и предохранительные клапана, что зависит от динамических качеств клапанных агрегатов. Определение динамических характеристик таких агрегатов и коррекция их динамических параметров являются важной инженерной задачей [3].

В качестве примера решения задачи по обеспечению динамического качества пружинных предохранительных клапанов пневмогидросистем можно привести диссертационное исследование Кшуманева С. В. [4]. В [4] проведено аналитическое исследование пружинных предохранительных клапанов с учетом характера внешнего нагружения. Для построения математической модели пружинного предохранительного клапана с сильфонным чувствительным органом в [4] сделаны следующие допущения: жесткость подвижной системы клапана постоянна и определяется жесткостными характеристиками упругих уплотнительных элементов, итоговой жесткостью пружин сильфона и других конструктивных элементов клапана; деформация материала уплотнителя пропорциональна прикладываемому усилию; масса подвижной системы равна сумме масс подвижных элементов, причем в расчете учитывается 1/3 массы пружин и сильфона; эффективная площадь сильфона постоянна и не зависит от величины действующего давления и величины перемещения незакрепленного торца сильфона.

Математическая модель пружинного предохранительного клапана с упругими (пружинными) элементами обычно строится в виде дифференциального уравнения, которое описывает колебания в механическом аналоге клапана, представляющего собой гармонический осциллятор. При этом важным является адекватное определение коэффициентов, входящих в дифференциальное уравнение. Достоверность аналитического определения числовых значений этих коэффициентов с учетом сделанных в [4] предположений и допущений вызывает большие сомнения. Более того, дифференциальное уравнение фактически является приближенной математической моделью колебательных процессов в клапане, поскольку характеристики системы (инерционные, демпфирующие, упругие) являются распределенными по объему клапана параметрами. Поэтому для описания динамических процессов в клапанных устройствах более корректным является использование дифференциальных уравнений в частных производных [5]. Однако на практике системы с распределенными параметрами из-за сложности поиска решений уравнений в частных производных заменяют

на эквивалентные системы с детерминированными характеристиками, поведение которых описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями. Реальные конструкции заменяют механическими аналогами [6].

Дифференциальное уравнение колебаний гармонического осциллятора в переменных x, t имеет вид

$$M_{\text{эк}} \ddot{x} + K_{\text{эк}} \dot{x} + C_{\text{эк}} x = 0, \quad (1)$$

где $M_{\text{эк}}, K_{\text{эк}}, C_{\text{эк}}$ — эквивалентные (приведенные) характеристики инерционности, демпфирования и упругости механического колебательного контура, соответственно;
 x — перемещение подвижного узла контура;
 t — время.

Для определения приведенных характеристик клапана как гармонического осциллятора можно воспользоваться способом, изложенным в работах [7, 8], который заключается в проведении статической и динамической градуировки колебательного контура.

Статическую градуировку колебательного контура проводят в целях определения характеристики $C_{\text{эк}}$ упругого элемента, входящего в колебательный контур. В ходе проведения статической градуировки к подвижному элементу колебательного контура прикладывают определенные силовые воздействия и определяют соответствующие этим усилиям перемещения подвижного узла (элемента) контура: коэффициент пропорциональности между этими параметрами определяет числовое значение $C_{\text{эк}}$.

Параметры $M_{\text{эк}}$ и $K_{\text{эк}}$ определяют по результатам динамической градуировки колебательного контура. Для этого в точку приложения статического градуировочного усилия P прикладывают усилие, равное 0,3—0,5 усилия, используемого для проведения статической градуировки. После резкого его снятия реализуется ступенчатая функция Хэвисайда, и в колебательном контуре возникает быстро затухающий гармонический процесс [7]. Как известно, подобные колебания характеризуются постоянным периодом T и функцией убывания амплитуды колебаний ψ . С параметрами уравнения (1) они связаны следующими соотношениями:

$$T = \frac{1}{\sqrt{\frac{C_{\text{эк}}}{M_{\text{эк}}} - \frac{K_{\text{эк}}^2}{4M_{\text{эк}}^2}}}; \quad \psi = e^{-\frac{TK_{\text{эк}}}{2M_{\text{эк}}}}. \quad (2)$$

Для повышения точности определения характеристик $M_{\text{эк}}$ и $K_{\text{эк}}$ необходимо проанализировать не один, а k периодов, за которые амплитуда колебаний изменится в H_k раз:

$$H_k = \frac{A_0 e^{-\frac{tK_{\text{эк}}}{2M_{\text{эк}}}}}{A_0 e^{-\frac{K_{\text{эк}}(t+kT)}{2M_{\text{эк}}}}} = e^{-\frac{K_{\text{эк}}kT}{2M_{\text{эк}}}}, \quad (3)$$

где A_0 — начальная амплитуда колебаний.

Из последних уравнений получим

$$M_{\text{эк}} = \frac{T^2 k^2 C_{\text{эк}}}{k^2 + \ln^2 H_k}; \quad (4)$$

$$K_{\text{эк}} = \frac{2kTC_{\text{эк}} \ln H_k}{k^2 + \ln^2 H_k}. \quad (5)$$

Полученные результаты по оценке параметров колебательного контура можно адаптировать к оценке характеристик клапанов с пружинными элементами с учетом целей и задач их испытания как в заводских, так и в полевых условиях.

Задачи испытаний предохранительных и регулирующих клапанов с упругими элементами (пружинами)

Известны устройства для испытания предохранительных клапанов, примером которых является устройство по а.с. СССР № 887959, предназначенное для испытания на герметичность элементов трубопроводной арматуры, в частности пары клапан—седло [9]. Известен также прибор для проверки работоспособности предохранительных клапанов без их демонтажа из оборудования по патенту РФ на полезную модель № 84980 [10], который обеспечивает возможность определения фактического давления срабатывания клапана при отсутствии информации о реальных значениях активной площади седла клапана и величины давления в системе.

Прибор по патенту [10] состоит из механической части и электронного блока в составе процессора, клавиатуры, дисплея, схемы управления электроприводом, датчиков силы и давления с измерительными преобразователями сигналов. Он обеспечивает расчет давления срабатывания ИПК при априори неизвестных значениях активной площади S и диаметра седла клапана $D_{\text{ср}}$, а также предотвращает заклинивание червячного редуктора при выходе движущего винта за допускаемые пределы по той или иной причине. Необходимость определения фактических значений площади S и диаметра $D_{\text{ср}}$ седла клапана обусловлена тем, что эти параметры могут существенно отличаться от первоначальных по причине зарастания смолистыми, солевыми или накипными компонентами, неизбежно имеющими место в реальных полевых условиях работы клапана.

Устройство обеспечивает расчет рабочего давления предохранительного клапана с неизвестными заранее значениями активной площади и диаметра седла клапана. Для решения задачи в конструкцию клапана вводят дополнительные элементы, такие, как концевые выключатели, силовой привод, датчик силы, датчик давления. Многие из этих элементов (узлов) связаны с подвижными элементами клапана.

Именно динамика подвижных элементов клапана определяет надежность функционирования предохранительных клапанов, в том числе переходные процессы в клапане [4], и возможность возникновения в клапане параметрических колебаний [11].

На динамические процессы, протекающие в предохранительных клапанах, в устройствах с упругими элементами влияют такие их характеристики, как инерционные диссипативные и упругие (жесткостные) параметры. Эти характеристики должны быть внесены в паспорт клапана (устройства с упругими элементами) и могут быть определены в результате проведения статической и динамической градуировки подвижных частей клапана (устройства с упругими элементами), как это уже было отмечено, по параметрам перемещения подвижной части клапана (устройства с упругими элементами). Под параметрами перемещения подвижной части клапана (устройства с упругими элементами) понимают не только непосредственно перемещение подвижного элемента клапана, но и скорость, и ускорение такого перемещения. Для фиксации кинематических характеристик подвижного элемента клапана (устройства с упругими элементами) можно использовать датчики перемещений, скоростей и ускорений. Однако введение этих датчиков в конструктивно-компоновочную схему клапана (устройства с упругими элементами) искажает саму схему устройства и его динамические характеристики, поскольку эти датчики оказываются механически связаны с подвижными элементами клапана, в результате чего происходит изменение эквивалентных (приведенных) характеристик клапана (приведенные инерционные, диссипативные и упругие характеристики). Более того, при введении (закреплении) датчиков в структуру клапана узлы крепления датчиков создают в устройстве люфты, что снижает точность определения его приведенных динамических характеристик. Поэтому при определении истинных инерционных, демпфирующих параметров и упругих характеристик колебательных систем (осцилляторов) целесообразно использовать бесконтактные способы определения кинематических характеристик подвижных элементов осциллятора.

Механическим аналогом предохранительного клапана, как уже отмечалось, является гармонический осциллятор, перемещение подвижной части которого (поршень) описывается обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка вида

$$m\ddot{S} + \eta\dot{S} + CS = F_0, \quad (6)$$

где S — перемещение подвижной части клапана;
 m, η, C — приведённые характеристики клапана;
 F_0 — внешняя возмущающая сила.

Механический аналог клапана с пружинным элементом (гармонический осциллятор) с элементами его градуировки и система измерений кинематических характеристик подвижного элемента системы изображены на рис. 1.

Статическая и динамическая градуировка осциллятора может быть проведена в соответствии с методиками, приведенными в [7, 8]. Статическая градуировка проводится путем наложения на тарель 5 грузов 7 известной массы и определения соответствующей этой массе перемещения поршня 2. Динамическая градуировка осциллятора производится за счет создания в аналоге затухающего колебательного процесса путем реализации импульсного сило-

вого воздействия в виде функции Дирака либо ступенчатого воздействия в виде функции Хэвисайда на поршень 2. Функцию Хэвисайда можно реализовать путем приложения к концу штока 4 (крюк 6) груза 8 на нити 9. Перерезая (пережигая) нить, реализуют динамическое воздействие на систему, в результате которого в системе возникают затухающие гармонические колебания.

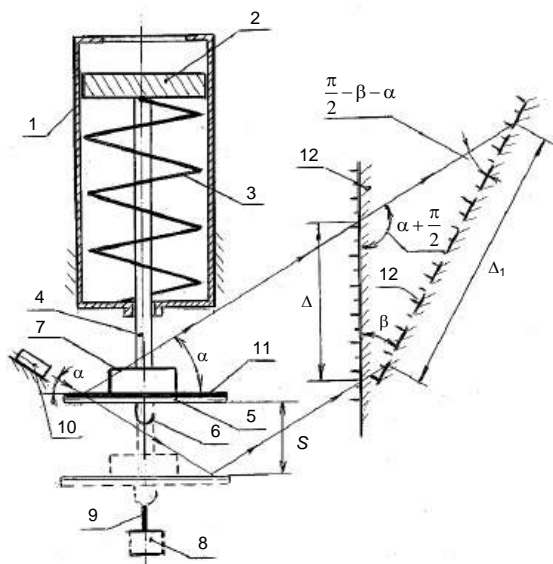


Рис. 1. Механический аналог клапана с пружинными элементами и система его паспортизации:

1 — корпус; 2 — поршень; 3 — упругий элемент (пружина); 4 — шток; 5 — тарель; 6 — крючок; 7 — тарировочный груз для статической градуировки; 8 — груз для динамической градуировки; 9 — нить; 10 — источник когерентного излучения; 11 — светотражательная (зеркальная) поверхность; 12 — панель для фиксации положения следа отраженного луча света

Типичные градуировочные характеристики для гармонического осциллятора, схема которого представлена на рис. 1, приведены на рис. 2. На рис. 2, а приведена характерная зависимость изменения силы упругости (жесткости) осциллятора, которая равна силе, приложенной к поршню 2 в зависимости от его перемещения S .

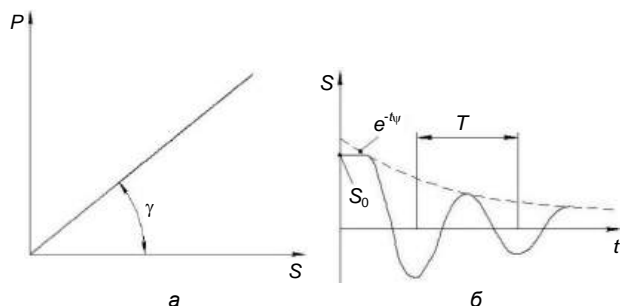


Рис. 2. Типичные градуировочные характеристики механического аналога клапана с пружинными элементами
а — зависимость изменения силы, приложенной к поршню, от перемещения S , б — зависимость перемещения S от времени t

На рис. 2, б показана типичная зависимость изменения перемещения S поршня 2 от времени при реализации функции Хэвисайда при проведении динамической градуировки. Константы m , η , C определяют решение однородного уравнения (1) [6]. Значение

коэффициента C для уравнения (6) определяется по результатам статистической градуировки. Это тангенс угла наклона графика на рис. 2, а:

$$C = \operatorname{tg} \gamma. \quad (7)$$

Колебательные процессы (колебания) характеризуются постоянным периодом T (рис. 2, б) и функцией затухания амплитуды колебаний ψ , которые с параметрами левой части уравнения (6) связаны следующими соотношениями:

$$T = \frac{1}{\sqrt{\frac{C}{m} - \frac{\eta^2}{4m^2}}}; \quad (8)$$

$$\psi = e^{-\frac{T\eta}{2m}}. \quad (9)$$

Для повышения точности определения характеристик m и η необходимо проанализировать на рис. 2, б не один период, а несколько k , за которые амплитуда колебаний изменится в H_k раз:

$$H_k = \frac{A_0 e^{-\frac{T\eta}{2m}}}{A_0 e^{-\frac{\eta}{2m}(t+kT)}} = e^{-\frac{\eta k}{2m} T}. \quad (10)$$

Коэффициент затухания H_k и период колебаний T определяют путем непосредственных измерений перемещения поршня 2 (рис. 1). Из выражений (8) и (10) получаем

$$m = \frac{T^2 k^2 C}{k^2 + \ln^2 H_k}; \quad (11)$$

$$\eta = \frac{2kT C \ln H_k}{k^2 + \ln^2 H_k}. \quad (12)$$

Для определения значений приведенной массы m и приведенного коэффициента диссипативности η по зависимостям (11) и (12) необходимо определить характеристики колебательного процесса, изображенного на рис. 2, б, — параметры T и H_k .

Перемещения клапана можно фиксировать видеокамерой. Однако при этом для отслеживания перемещений поршня 2 необходимо выполнить в корпусе 1 на рис. 1 продольный разрез (не показанный на рис. 1), что невозможно выполнить в корпусе реального клапана, поскольку тогда его функция нарушится. Вместе с тем возможен и иной бесконтактный способ определения характеристик динамики подвижной части гармонического осциллятора (подвижной части клапана).

Бесконтактный способ определения характеристик перемещения подвижной части клапана

Для реализации данного способа достаточно на подвижную часть гармонического осциллятора (клапана), выходящую за пределы корпуса 1 (рис. 1) гар-

монического осциллятора, например на тарель 5, нанести тонкую (пренебрежимо малой массы) полосу 11 с высокой отражательной способностью. Подавая на зеркало 11 под стационарным углом α когерентный луч света от источника 10, роль которого может выполнять лазерная указка, и фиксируя положение следа отраженного луча света на панели 12 (рис. 1) с нанесенной на нее координатной сеткой, можно определить характеристики колебательного процесса в гармоническом осцилляторе (клапане). При этом изменение перемещения S будет соответствовать изменению параметра Δ ($2S = \Delta$).

Амплитуда колебаний (перемещение S) поршня 2 является величиной малой, поэтому малым будет и величина Δ при её фиксации. В измерительных системах для усиления сигнала, снимаемого с датчика, используют усилители сигнала. Для схемы на рис. 1 необходимо увеличить перемещение следа светового луча Δ по сравнению с перемещением S . Этого можно добиться, отклонив координатную сетку на панели 12 на угол β . По теореме синусов

$$\frac{\Delta}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta - \alpha\right)} = \frac{\Delta_1}{\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right)}. \quad (13)$$

Используя известные тригонометрические формулы, получим зависимость изменения параметра Δ_1 от перемещения S :

$$\Delta_1 = 2S \frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha + \beta)} = KS, \quad (14)$$

где K — коэффициент усиления сигнала.

Определяя с помощью видеокамеры, не показанной на рис. 1, положения светового зайчика (следа отраженного луча света) на координатной сетке на панели 12 в фиксированные моменты времени, получим массив информации $\{t_i, \Delta_{1i}\}$, а следовательно, и массив $\{t_i, S_i\}$, который строится в соответствии с зависимостью (14) и может быть обработан методом наименьших квадратов для получения параметров функционала:

$$S = B_0 e^{-\vartheta t} \cos \omega t, \quad (15)$$

где B_0 — начальная амплитуда колебаний поршня 2;

ϑ — декремент затухания колебаний поршня 2;

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ — частота колебаний поршня 2 (рис. 1).

Поскольку параметры ϑ и ω связаны с параметрами m и η гармонического осциллятора (предохранительного клапана), поэтому определив параметры ϑ и ω , можно определить параметры m и η .

Систему измерений перемещений подвижной части гармонического осциллятора (клапана) можно существенно упростить, если вместо видеокамеры и

координатной сетки на панели 12 (рис. 1) использовать интерактивную доску.

Процедура определения приведенных характеристик механического аналога предохранительного клапана может быть адаптирована к процедуре паспортизации клапана.

Технология паспортизации клапана с упругими элементами (пружинами)

Схема системы паспортизации предохранительного клапана и типичная конструктивно-компоновочная схема клапана приведены на рис. 3.

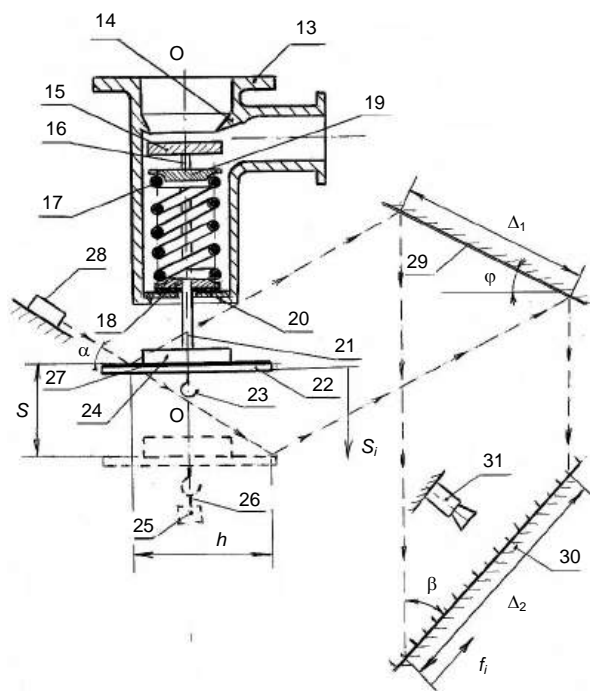


Рис. 3. Схема паспортизации клапана с упругими элементами (пружинами):

13 — корпус клапана; 14 — седло клапана; 15 — поршень клапана; 16 — шток; 17 — упругий элемент в виде цилиндрической винтовой пружины; 18 — верхний пружинный упор; 19 — нижний упор; 20 — верхняя крышка клапана; 21 — хвостовик штока; 22 — градуировочная тарель для статической градуировки; 23 — крючок для проведения динамической градуировки; 24 — градуировочная масса для проведения статической градуировки; 25 — груз для динамической градуировки; 26 — нить; 27 — зеркальная поверхность; 28 — источник когерентного света; 29 — отражающее зеркало; 30 — интерактивная доска (планшет), видеокамера

Паспортизацию предохранительного клапана производят по результатам его статической и динамической градуировки, как это было проведено при паспортизации гармонического осциллятора, схема которого приведена на рис. 1. При этом перед градуировкой предохранительного клапана его продольная ось $O-O$ располагается вертикально, а корпус клапана 13 жестко фиксируется, причем хвостовик 21 штока 16 направлен вниз (рис. 3).

При этом необходимо, чтобы отраженный от зеркала 29 световой поток (след светового луча) всегда был на плоскости планшета (интерактивной доске) 30, расположенном под углом β к вертикали, а длина h зеркальной поверхности 27 должна обеспечивать отражение светового луча от источника света 28 для

всего диапазона S перемещения подвижных элементов 15, 16, 18, 22 клапана.

Легко показать, исходя из геометрических соображений и законов отражения света (угол падения α равен углу отражения), что

$$\Delta_2 = 2S \frac{\cos \alpha \cos \varphi}{\sin \beta \sin(\alpha + \varphi)}. \quad (16)$$

После выполнения перечисленных операций предохранительный клапан готов к паспортизации, в ходе которой проводят его статическую и динамическую градуировку.

Статическая градуировка. Статическую градуировку предохранительного клапана проводят для определения приведенной жесткостью (упругой характеристики клапана) $C_{\text{пр}}$. Статическая градуировка проводится путем наложения на тарель 22 груза 24 различной массы. Под действием груза 24 весом P_i происходит сжатие пружины 17 и перемещение вниз тарели 22 на величину S_i , в результате чего имеет место смещение следа светового луча по светоотражательной (зеркальной) поверхности 27 вправо (см. рис. 3). Соответственно будет перемещаться и след светового луча, отраженного от зеркала 29, по панели 30 (интерактивной доске). Перемещение следа светового луча f_i , соответствующее нагрузке P_i , заносится в память процессора, к которому подключена интерактивная доска и который не показан на рис. 3. Таким образом между перемещениями S_i и f_i существует однозначная линейная зависимость. В результате получаем два массива данных: $\{P_i\}$ и $\{f_i\}$. Учитывая, что пружина, используемая в предохранительном клапане, подчиняется закону Гука, методом наименьших квадратов обработав массивы данных $\{P_i\}$ и $\{f_i\}$, с учетом (16) получаем

$$P = C \frac{2 \cos \alpha \cos \varphi}{\sin \beta \sin(\alpha + \varphi)} S + A, \quad (17)$$

где $A, C = \text{const}$.

Тем самым эквивалентная жесткость предохранительного клапана будет определяться выражением

$$C_{\text{эк}} = C \frac{2 \cos \alpha \cos \varphi}{\sin \beta \sin(\alpha + \varphi)}. \quad (18)$$

Для определения инерционных демпфирующих (диссипативных) характеристик предохранительного клапана проводят его динамическую градуировку.

Динамическая градуировка предохранительного клапана. В ходе проведения динамической градуировки предохранительного клапана для его подвижного узла, состоящего из элементов 15, 16, 19, 21, 22, 23 (рис. 3), создают затухающие колебания, в ходе которых деформируется пружина 17. Для реализации колебательного процесса в предохранительном клапане на тарель 22 устанавливают и жестко фиксируют

груз 24 весом P_0 , обеспечивающим перемещение (сжатие) пружины 17 на $2/5$ ее максимального сжатия, равного Δ (рис. 3). Далее к крюку 23 на нити 26 подвешивают груз 25 с весом, достаточным для деформации пружины 17 до $4/5\Delta$ (максимального сжатия пружины 17). После подачи питания на источник когерентного света 28, подачи питания на интерактивную доску 30 и коммутирования ее с компьютером (не показанным на рис. 3) предохранительный клапан и измерительная система готовы к проведению динамической градуировки предохранительного клапана.

В ходе проведения динамической градуировки для создания колебательного процесса для подвижного звена предохранительного клапана на него (узел, состоящий из элементов 15, 16, 19, 21—23) оказывают ступенчатое силовое воздействие в виде функций Хэвисайда [7], перерезав нить 26. В системе возникает затухающий гармонический процесс, типичный вид которого приведен на рис. 2, б: изменение координаты S по времени линейно связано с перемещением f светового зайчика (следа светового луча) на панели 30 (интерактивной доске). Измеряя в i -е моменты времени t_i отклонения f_i , а соответственно, с учетом коэффициента усиления

$$K = \frac{2 \cos \beta \cos \varphi}{\sin \beta \sin(\alpha + \varphi)}, \quad (19)$$

узнают перемещения S_i подвижного узла предохранительного клапана. В результате динамической градуировки предохранительного клапана получают два массива числовых характеристик: $\{S_i\}$ и $\{t_i\}$. Эти массивы информации с помощью метода наименьших квадратов позволяют построить эмпирическую модель вида (15), т. е. определить характеристики предохранительного клапана ϑ и ω , а также погрешность их оценки.

Параметр ω определяет период колебаний:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (20)$$

Исходя из значения H_k для k периодов колебаний по зависимости (10), а также по (11) и (12) определяют приведенные характеристики клапана с элементами его градуировки $M_{\text{пр}}$ и $\eta_{\text{пр}}$. При этом в значение $M_{\text{пр}}$ входит не только масса подвижного узла предохранительного клапана, но и масса тарели 22 с крюком 23, которая определяется до проведения процедуры динамической градуировки и равна m_0 . Кроме того, в массу $M_{\text{пр}}$ входит масса груза 24, закрепленного на тарели 22, равная m_1 , обеспечивающая деформацию пружины 17 до $2/5$ диапазона ее максимальной деформации Δ . Тогда приведенная масса подвижного узла предохранительного клапана определяется по формуле

$$m_{\text{пр}} = M_{\text{пр}} - m_0 - m_1. \quad (21)$$

Найденные значения $C_{ЭК}$, $m_{ПР}$, $\eta_{ПР}$ являются характеристиками данного (испытываемого) предохранительного клапана, которые могут быть внесены в паспорт предохранительного клапана. Более того, изложенный способ паспортизации предохранительного клапана может быть легко адаптирован к использованию в полевых условиях, поскольку при эксплуатации клапана из-за погодных условий, влияния рабочей среды в гидромагистралях могут возникнуть изменения паспортных характеристик предохранительного клапана.

Способ паспортизации предохранительных и регулирующих клапанов с упругими элементами (пружинами), позволяет определять их приведенные инерционные, диссипативные и упругие характеристики. Способ апробирован при проведении тестирования модельного гармонического осциллятора, фотография которого приведена на рис. 4.



Рис. 4. Процесс тестирования гармонического осциллятора с витой пружиной

На фотографии видны гармонический осциллятор с отражательной поверхностью, в качестве которой взят CD-диск, лазерная указка и отраженный CD-дискотом луч света.

Выводы

Повышение надежности работы регулирующих и предохранительных клапанов с упругими элементами в виде витых цилиндрических пружин снижает риски экологических катастроф при эксплуатации трубопроводных магистралей различного назначения.

Эффективность эксплуатации клапанов с пружинными элементами определяется не только характером протекания динамических процессов в магистральных (например, отсутствие или наличие в трубопроводах гидроударов), но и характером динамических процессов в самих клапанах как механических колебательных контурах.

Характер динамического процесса в клапанах определяется приведенными инерционными характеристиками подвижного узла клапана, состоящего из поршня и штока, его диссипативными свойствами,

обусловленными главным образом потерями на преодоление сил трения, а также характеристиками упругости (жесткости) пружинных элементов клапана.

Приведенные характеристики клапанов могут быть определены по результатам статической и динамической градуировки клапана как колебательной системы аналогично тому, как это делается при паспортизации стендовых силоизмерительных систем, предназначенных для испытания ракетных двигателей в целях определения их силовых характеристик.

В ходе проведения статической и динамической градуировки определяют перемещения подвижного узла клапана под действием приложенных силовых воздействий и изменение перемещений по времени в ходе колебательных процессов в клапане.

Перемещения подвижных элементов клапана определяют по отклонению светового луча, подаваемого на светоотражательную поверхность, закрепленную перпендикулярно продольной оси штока на его хвостовике, выходящем за пределы корпуса клапана. Обработка законов изменения перемещений подвижного узла позволяет проводить паспортизацию клапана как в заводских, так и в полевых условиях в рамках проведения регламентных работ с клапанами и не требует использования специальной измерительной аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волохин А. В., Арсибеков Д. В., Колесова С. Б., Волохин В. А., Волохин Е. А. Современные подходы к совершенствованию новых технических средств и технологий в добыче нефти и газа: мат. Всеросс. научно-практ. конф. "Современные технологии извлечения нефти и газа, перспективы развития минерально-сырьевого комплекса (российский и мировой опыт)", 17—19 мая 2018 г. С. 202—210.
2. Абубакиров В. Ф. Оборудование буровое, противовыбросовое и устьеовое. В 2 томах. — М.: Газовая промышленность, 2007.
3. Хазов Б. В. Управление надежностью машин на этапах их жизненного цикла. Справочник // Инженерный журнал. 1999. № 9, 12; 2000. № 1, 2.
4. Кшуманев С. В. Исследование и обеспечение динамического качества пружинных предохранительных клапанов пневмогидросистем железнодорожного транспорта. Дисс. ... канд. техн. наук. — Самара, 2005. — 203 с.
5. Смирнов М. М. Дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка. — М.: Наука, 1964. — 206 с.
6. Магнус К. Колебания. Введение в исследование колебательных систем. — М.: Мир, 1982. — 303 с.
7. Черепов В. И., Кузнецов Н. П., Гребенкин В. И. Идентификация силовых характеристик объектов машиностроения. Паспортизация силоизмерительных систем. — М. — Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2002. — 200 с.
8. Камашев А. Г., Кузнецов Н. П., Николаев В. А., Черепов В. И. Построение математических моделей многокомпонентных силоизмерительных устройств // Измерительная техника. Сер. "Метрология". 1980. Вып. 7. С. 26—33.
9. Григорьев В. П., Диметрович А. А., Рувинский О. Ш. Устройство для определения параметров герметизации пары клапан-седло. Авторское свидетельство СССР № 887959 / МПК: G 01 M 3/08. Оpubл. 07.12.1981. Бюл. № 45.
10. Гришаев А. К., Ермишин В. В., Стахурлов Д. В. Прибор для проверки работоспособности предохранительных клапанов без их демонтажа из оборудования. Патент РФ на полезную модель № 84980 / МПК G 01 L 1/00. Оpubл. 2009.07.20.
11. Кузнецов Н. П., Пономаренко В. А., Салтыков А. И., Бухтулова Е. В. Техно-экономические аспекты городского централизованного водоснабжения. — М.: Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2006. — 480 с.

Passportization of spring valves in the oil industry as a factor of reducing ecological risks

I. B. AHMADULLIN

LLC "Slavutich", Izhevsk, Russia

^{1, 2} V. A. VOLOKHIN, ² I. V. GRAKOVICH, ² N. P. KUZNETSOV

¹ POO "Petroleum Technical College", Izhevsk, Russia

² Izhevsk State Technical University named after Mikhail Kalashnikov, Izhevsk, Russia

I. T. SEVRYUKOV

FAU "25 State Research and Development Institute of a himmotologiya"
of the Ministry of Defence of the Russian Federation, Moscow, Russia

In article are considered issues related with ensuring trouble-free operation of pipeline communications during the production and transportation of gas and oil by assessing the dynamic qualities of valves with spring elements. The technology of passportization of valves with spring elements, including during their operation, is set out.

Keywords: valve with spring element, hydraulic shock, spring valve passport.

Bibliography 11 references.

Received June 1, 2020

УДК 502.58

Анализ влияния природных и антропогенных факторов на формирование катастрофических наводнений в низовье реки Амур

А. Г. ЧВЕРТКИН, канд. техн. наук; С. Н. БУЛЫЧЕВ, канд. техн. наук
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

Е. А. ВАСЬКОВА

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия

Показаны изменения стока в створе нижнего Амура — зависимые переменные — предиктанты от факторов, которые являются предикторами. Проведен их статистический анализ, отражающий закономерность в возникновении экстремальных максимальных расходов в нижнем Амуре. Проанализировано влияние антропогенных факторов на изменение стока в нижнем русле реки Амур. Данные подходы позволяют исключить из рассмотрения факторы, которые не относятся к стокоформирующим на рассматриваемом участке реки. Продемонстрирована динамика прохождения волны паводка 2013 г., особенностью которого являлись снижение стока в середине участка нижнего Амура и его увеличение в конце, а именно в с. Богородском. На основании статистического анализа с применением метода множественной линейной регрессии определены основные предикторы, повлиявшие на сток. Полученные данные позволили разработать математическую модель формирования расхода. Данную модель можно применять при построении карт затопления в районе нижнего Амура.

Ключевые слова: катастрофическое наводнение, паводок, расход, стокоформирующий фактор, множественная линейная регрессия, коэффициент корреляции, предиктор, статистический анализ, предиктант.

Бассейн реки Амур расположен на юге Дальнего Востока. Данная местность подвержена влиянию муссонных ветров, под действием которых территорию заливают осадки в летне-осенний период. Из-за этого происходят частые наводнения паводкового, катастрофического характера. На притоках реки Амур построены две гидроэлектростанции (ГЭС), которые позволяют срезать пики паводков (Зейская ГЭС в 1985 г. и Бурейская ГЭС в 2007 г.). С момента их строительства паводки наблюдались только в верхнем бассейне реки Амура, так как ГЭС позволили удерживать большой объем воды.

В 2013 г. гидроэлектростанции не удержали поток воды и нижний Амур был охвачен продолжительным паводком. При этом значения наивысших расходов превышали значения за весь период инструменталь-

ных наблюдений (121 год). Необычность явления также заключалась в математических выбросах при построении кривых обеспеченности расходов для гидрологических постов в нижнем русле реки Амур. На рис. 1, 2 и 3 представлены графики обеспеченности максимальных расходов за весь период инструментальных наблюдений в г. Хабаровске, г. Комсомольске-на-Амуре, с. Богородском.

По оси абсцисс отложена обеспеченность максимальных расходов, которая отражает вероятность повторения определенного значения стока. Ось ординат — модульный коэффициент стока, который вычисляется для каждого значения максимума расхода по формуле

$$K_i = Q_i / Q_{\text{сред}},$$

где Q_i — значение максимального расхода в i -м году наблюдений;

$Q_{\text{сред}}$ — среднее многолетнее значение максимального расхода за весь период наблюдений.

Таким образом, обеспеченность расхода в 2013 г. составила для г. Хабаровска 1 %, г. Комсомольска-на-Амуре и с. Богородское — 1,2 %. При этом в случае с. Богородское отчетливо видно отклонение точки, соответствующей рассчитанному модульному коэффициенту, от кривой распределения Пирсона III типа.

Чверткин Алексей Геннадьевич, доцент.

E-mail: leliosha@yandex.ru

Булычев Сергей Николаевич, доцент.

E-mail: bulychovsn@yandex.ru

Васькова Есения Андреевна, аспирантка 2-го курса географического факультета, главный специалист отдела гидрометрии и гидрологической сети.

E-mail: esenya95@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2020 г.

© Чверткин А. Г., Булычев С. Н., Васькова Е. А., 2021

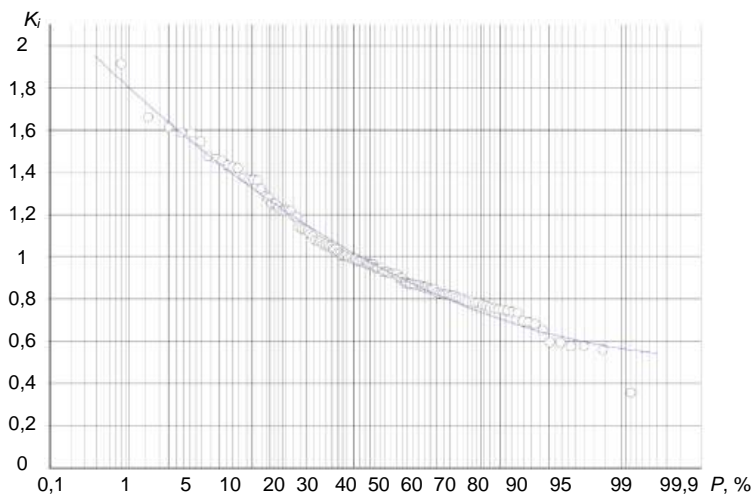


Рис. 1. Распределение обеспеченностей максимальных расходов в створе нижнего Амура г. Хабаровска

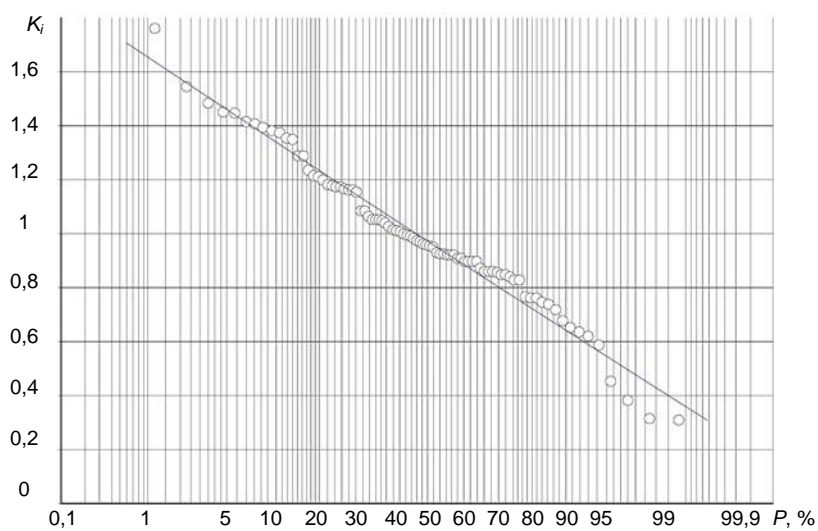


Рис. 2. Распределение обеспеченностей максимальных расходов в створе нижнего Амура г. Комсомольска-на-Амуре

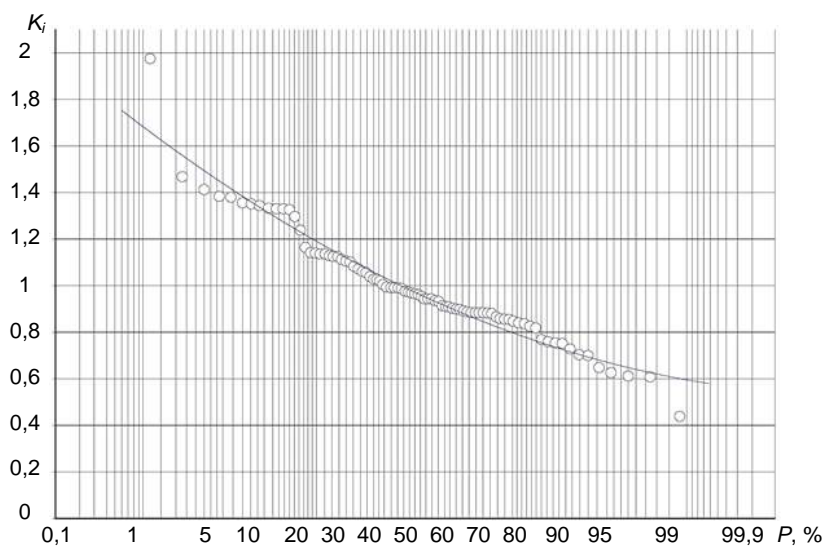


Рис. 3. Распределение обеспеченностей максимальных расходов в створе нижнего Амура с. Богородское

Цель данной работы — анализ возникновения разброса точек из спектра возможных значений расходов на основании данных максимальных расходов в пунктах нижнего русла реки Амур.

Для достижения указанной цели ставятся следующие задачи:

- выявить основные закономерности водности реки в ее нижнем течении;

- определить возможную роль антропогенного влияния на увеличение расходов в нижнем русле реки Амура в период паводка 2013 г.;

- определить основные параметры, которые привели к математическим выбросам точек на кривой обеспеченности максимальных расходов.

В связи со 121-летним периодом инструментальных наблюдений за гидрологическим режимом реки в ее нижнем течении применяется статистический метод анализа.

Ранее не поднималась проблема комплексного анализа максимальных расходов именно в нижнем Амуре. Было проведено достаточно много исследований в части бассейна верхнего и среднего Амура, но не в рассматриваемых пределах. Интерес к данной тематике связан в первую очередь с наблюдаемыми тенденциями в изменении климата — глобальным повышением температуры и обильными осадками, которые приводят к сугубо катастрофическим наводнениям в бассейне реки Амура, в частности его низовье.

За весь период инструментальных гидрологических наблюдений в бассейне нижнего Амура проведены исследования, которые тесно связаны с данной проблематикой. В работе [1] представлены основные причины возникновения наводнения на Амуре в 2013 г.: переувлажненность почвы в конце 2012 г., обильные осадки в зимний период 2013 г., каскадность развития паводка, а также обильные осадки вследствие циклона 2013 г. Наводнение обосновывается комплексом природных и антропогенных факторов. Приведен анализ значений расходов в присутствии Зейской и Бурейской ГЭС и при их отсутствии. Доказан срез паводка за счет этих гидротехнических сооружений. О роли гидротехнических сооружений в 2013 г. также сообщается в [2]. Авторы указывают на возникновение чрезвычайных ситуаций, связанных с выходом из строя дамб. Данное событие повлекло за собой затопление деревень, перекрытие крупных путей сообщения. При этом в [2] не произведена оценка указанных событий в части вероятного вклада в общую волну паводка в нижнем Амуре.

Оценка антропогенного влияния с конкретными цифрами приведена в [3]. Согласно ей, подъему уровня воды способствовали построенные ранее берегозащитные дамбы, польдеры, лесоразработки и пожары в бассейнах рек, мосты, в частности железнодорожная насыпь Транссибирской магистрали,

проложенная в пойме Амура. Кроме того, происходит интенсивное освоение территории в районе нижнего Амура на острове Большой Уссурийский, большая часть которого с 2005 г. принадлежит КНР. По данным исследований все перечисленные факторы увеличили уровень воды в районе Хабаровска на 70 см.

Особенно четко тема настоящего исследования обоснована в [4]. Основная идея работы состоит в доказательстве существования колебаний в реке Амур многоводных и маловодных фаз, а также их связи с солнечной активностью. Также приводится спектральный анализ, выполненный с помощью программы STATISTICA. Однако известно, что полученные результаты в данном обеспечении могут иметь сильные искажения и представлять собой шумы. Кроме того, в работе выполнен анализ разностной интегральной кривой на основе модульных коэффициентов среднегодовых значений стока в г. Хабаровске за 110 лет. Работа опубликована в 2007 г., когда река еще не достигала экстремально минимального (в 2008 г.) и максимального (в 2013 г.) расходов, автор приводит прогноз, согласно которому река увеличит свою водность через 3—6 лет, что соответствует 2010—2013 гг.

Благодаря современной научно-технической оснащенности, а также накопленным знаниям и средствам гидрологических расчетов представляется возможным провести анализ по данным максимальных значений, имеющимся для нижнего Амура, и сделать выводы, соответствующие задачам работы.

Статистический анализ расходов в русле нижнего Амура

Исходными данными для проведения статистического анализа являются расходы, соответствующие следующим гидрологическим постам нижнего Амура:

- 48,519439, 135.017162 — г. Хабаровск;
- 50,483741, 137.031961 — г. Комсомольск-на-Амуре;
- 52,371375, 140.424197 — с. Богородское.

Начальной точкой анализа является оценка однородности рядов исходных данных на основании критерия Диксона, который позволяет выявить резко отклоняющиеся от эмпирического распределения величины.

Результаты расчета критериев максимальных расходов исходного ряда приведены в табл. 1.

Таблица 1

Максимальные эмпирические и теоретические значения критерия Диксона для створов бассейна нижнего Амура

№	Наименование гидрологического поста	D_{1n}	D_{1n}^*	Q , м ³ /с	Год	D_{2n}	D_{2n}^*	Q , м ³ /с	Год
1	г. Хабаровск	0,094	0,07	41200	1897	0,11	0,08	46100	2013
2	г. Комсомольск-на-Амуре	0,0042	0,156	37900	1932	0,0049	0,166	43200	2013
3	с. Богородское	0,11	0,68	39830	1932	0,16	0,079	53600	2013

Примечание: D_{1n} и D_{2n} — рассчитанные значения критерия Диксона для максимальных расходов; D_{1n}^* и D_{2n}^* — теоретические значения критерия Диксона [5, 6].

Согласно совокупности полученных данных значение максимального расхода 2013 г. в селе Богородском является неоднородным. Причина этого носит вариационный характер, включающий возможность возникновения ошибки при замерах или влияние природных и антропогенных факторов на расход в Богородском. Для выявления причины возникновения неоднородности необходимо провести анализ общей динамики водности реки в ее нижнем течении, а также определить возможность влияния тех или иных факторов на сток реки в данном створе. Определить фазы водности реки позволяют разностные интегральные кривые. Исходными данными являются максимальные расходы реки в створах нижнего русла Амура. На рис. 4 представлен график разностных интегральных кривых.

По оси абсцисс представлен временной период инструментальных наблюдений за гидрологическим режимом реки в нижнем течении. Для г. Хабаровска временной ряд приведен в большем размере, так как наблюдения в данном створе ведутся с 1896 г.

По оси ординат отложен разностный модульный коэффициент стока, который вычисляют следующим образом:

$$S_n = \sum_{i=0}^n [(K_i) - 1],$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, n,$$

где K_i — модульный коэффициент максимального расхода.

В г. Хабаровске период наблюдений значительно продолжительнее, чем в остальных пунктах. Период повышенной водности наблюдался здесь с 1896 г. по 1920-е гг. В эти годы отмечены высокие значения максимальных расходов и уровней воды. После 1920-х гг. водность значительно снизилась и ординаты интегральной кривой стали отрицательными. Это связано с климатическими изменениями в глобальном масштабе, которые наблюдались повсеместно в данный период. Небольшие значения разности модульных коэффициентов отмечены и в двух нижних створах.

В конце 1950-х гг. произошло повсеместное повышение водности, после чего, в конце 1970-х гг. динамика повышения незначительно снизилась, но осталась в области положительных значений. В начале 2000-х гг. разности модульных коэффициентов достигли отрицательных значений, и в 2010 г. река вновь вошла в многоводную фазу. Обобщая полученные данные, можно отметить наблюдаемые тридцатилетние многоводные фазы. Маловодные фазы оказываются заключены в пределы 45 лет после 1920-х гг., а многоводные — 30 лет.

С учетом выявленной динамики цикличности периодов многоводной и маловодной фаз реки началом формирования катастрофического наводнения в 2013 г. можно считать 2010 г.

Для того чтобы исключить влияние антропогенного фактора, используется суммарная интегральная кривая. Совокупность интегральных кривых для каждого створа нижнего русла Амура представлена на рис. 5.

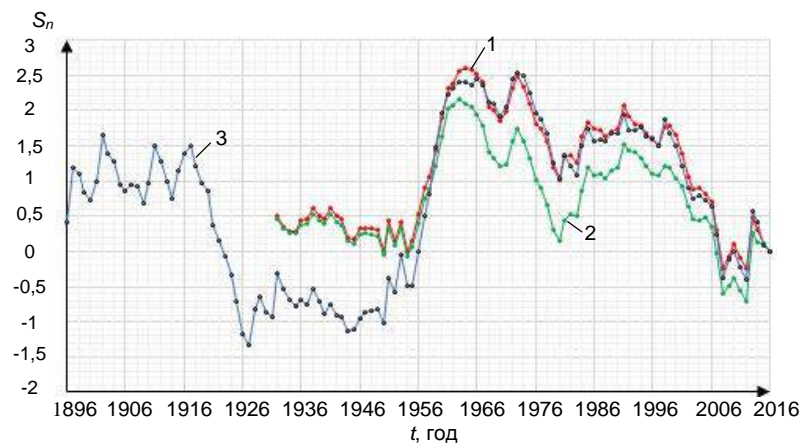


Рис. 4. Разностная интегральная кривая максимальных расходов воды по трем створам в нижнем русле Амура с 1932 г. по 2016 г.:

1 — Комсомольск-на-Амуре; 2 — с. Богородское; 3 — Хабаровск

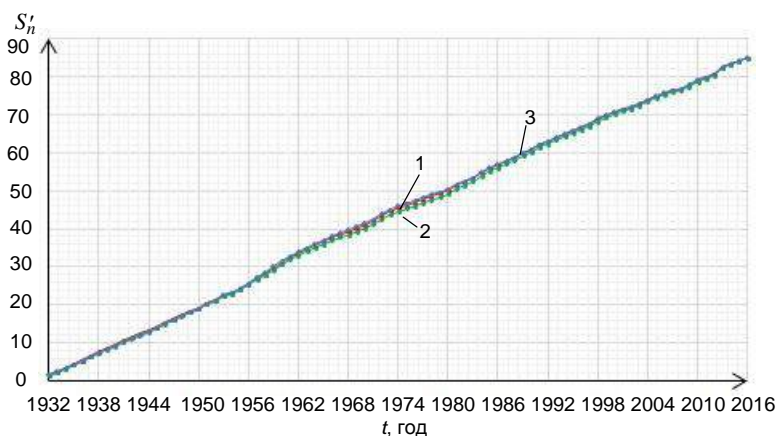


Рис. 5. Интегральная кривая максимальных расходов по трем створам в нижнем русле реки Амура:

1 — Комсомольск-на-Амуре; 2 — с. Богородское; 3 — Хабаровск

По оси абсцисс отложен временной период инструментальных наблюдений за гидрологическим режимом реки в нижнем течении.

По оси ординат представлен суммарный модульный коэффициент, который вычисляется как

$$S'_n = \sum_{i=0}^n (K_i), \quad i=0, 1, 2, \dots, n.$$

При более детальном анализе интегральных кривых отмечаются изменения в характере стока в период строительства Зейской и Бурейской ГЭС (1985 г. и 2007 г. соответственно), однако они незначительны. Из этого следует, что влияние данных сооружений на формирование максимального стока в нижнем течении Амура невелико [3]. В то же время есть доказательства [1], что данные ГЭС оказывают существенное влияние на срезание волны паводка, а следовательно, и на снижение максимальных расходов.

Для более точного представления о влиянии строительства ГЭС рассмотрены интегральные кривые по каждому створу с оценкой изменения коэффициента линейного тренда для периодов в соответствии с временными отрезками по разностной интегральной кривой (табл. 2).

Таблица 2

Изменение коэффициентов линейного тренда интегральной кривой в зависимости от периода по створам нижнего Амура

Наименование створа	Период, г.	Коэффициент линейного тренда
Хабаровск	1896—1926	0,998
	1927—1956	0,974
	1957—1979	0,966
	1980—2006	1,005
	2007—2016	1,101
Комсомольск-на-Амуре	1932—1952	0,980
	1952—1980	1,026
	1980—2007	1,007
	2008—2016	1,077
с. Богородское	1932—1950	0,987
	1952—1980	1,026
	1980—2007	1,007
	2008—2016	1,077

Коэффициенты линейного тренда незначительны, что является подтверждением отсутствия существенного влияния гидротехнических сооружений на максимальный сток в нижнем русле Амура.

Определить влияние природных факторов позволяет корреляционный и регрессивный анализ.

Основополагающим фактором в формировании стока на реке Амур являются осадки. Результаты корреляционного анализа зависимости среднегодовых значений стока от среднегодовых сумм осадков за период с 1982 по 1992 гг. представлены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции зависимости среднегодовых расходов воды от среднегодовых осадков с 1982 по 1992 гг.

Наименование гидрологического поста	Коэффициент корреляции
Хабаровск	0,87
Комсомольск-на-Амуре	0,12
с. Богородское	0,02

Поскольку анализ проводился по данным метеорологических станций и постов с соответствующими им данными расходов гидрологических постов, в с. Богородском учитывалось влияние осадков другого пункта, чем в г. Хабаровске.

Таким образом, в условиях сток-формирования в створе с. Богородское исключается антропогенное влияние и остается природное. Последний фактор является многокомпонентным, поэтому необходима его более детальная проработка.

Статистический метод регрессионного анализа позволяет выявлять предикторы, влияющие на предиктант, которым в данном случае является расход.

Исходными данными для анализа явились предикторы, приведенные в табл. 4.

Модель регрессии строится в программном обеспечении Statistica 10 с применением функции множественной линейной регрессии методом включения и значением критерия Фишера 0,001. Исходные данные являются среднемесячными значениями за 2013 г.

Таблица 4

Исходные данные для модели регрессии

Наименование населенного пункта	Предикторы			
	Влажность H , кг/м ³ [8]	Температура T , °C [8]	Осадки P , мм [8]	Расход Q , м ³ /с [7]
Им. Полины Осипенко	+	+	+	
Богородское		+	+	+
Софийский Прииск	+	+	+	
Нижнетамбовское		+		
Елабуга		+	+	
Хабаровск	+	+	+	+
Советская Гавань	+	+	+	
Комсомольск-на-Амуре				+
Джаоре		+	+	
Лермонтовка	+	+	+	
Архангеловка				+
Гуга				+

В ходе вычислений предиктант приобретает следующий вид:

$$Q_{\text{Богородское}} = 2,64Q_{\text{Комсомольск}} - 1,70Q_{\text{Хабаровск}} + \\ + 120,96T_{\text{Джаоре}} + 67,89P_{\text{Лермонтовка}} + \\ + 28,96P_{\text{Нижнетамбовское}} - 2459,84.$$

В данной модели все предикторы, кроме предиктора температуры, находятся выше по течению и тем самым не дают полного обзора факторов. Поэтому требуется их исключение из анализа. Стандартная ошибка полученной модели равна 1018,214.

Модель с исключенными факторами сокращается до трех предикторов и выглядит следующим образом:

$$Q_{\text{Богородское}} = 1486,1H_{\text{Им. Полины Осипенко}} + \\ + 579,9T_{\text{Советская гавань}} - 83,5P_{\text{Джаоре}} - 88615,2.$$

Величина стандартной ошибки увеличивается в 10 раз и составляет 16502,95. Но при этом выявляется отчетливая закономерность влияния на сток в данном створе метеорологических данных пунктов, приближенных к морю.

При вычислении коэффициента корреляции между массивами данных по осадкам доступных метеорологических станций, представленных в табл. 4, и среднемесячными значениями расходов в с. Богородское в 2013 г. выявляется закономерность (табл. 5).

Таблица 5

Коэффициенты корреляции между среднемесячным количеством осадков и среднемесячными значениями расходов в с. Богородское

Населенный пункт	Коэффициент корреляции
Им. Полины Осипенко	0,54
Лермонтовка	0,53
Хабаровск	0,65
Елабуга	0,63
Софийский Прииск	0,77

Очевидно, что в 2013 г. сток-формирование в с. Богородское осуществлялось за счет влияния комплекса осадков в створах выше, а также стекания объема воды с северо-восточной стороны.

При исключении из исходных данных анализа всех предиктантов, кроме осадков, модель формирования расхода в с. Богородском выглядит следующим образом:

$$Q_{\text{Богородское}} = 719,395P_{\text{Софийский Прииск}} - \\ - 422,137P_{\text{Нижнетамбовское}} - 609,767P_{\text{Елабуга}} + \\ + 368,184P_{\text{Джаоре}} - 230,547P_{\text{Им. Полины Осипенко}} + \\ + 5096,564.$$

Стандартная ошибка данной модели составляет 2113,836, что больше по сравнению с первой моделью и меньше в 8 раз по сравнению со второй.

Обобщая данные моделей, в первую очередь необходимо учитывать волну паводка со створа выше, как это отображено в первой модели. Также на

расход в с. Богородском влияют осадки и влажность станций, расположенных северо-западнее от с. Богородское. Последнее связано с высокой плотностью гидрологической сети в данном районе, где присутствует зона частичной мерзлоты. В связи с увеличением температуры в этом районе ее влияние на сток объясняется тем, что данные места заполняются водой в жидком агрегатном состоянии и уровень грунтовых вод повышается [9].

Заключение

Таким образом, статистический анализ исходных данных позволил выявить закономерность многоводных и маловодных фаз в нижнем русле реки Амура, что дало основание предполагать о начале многоводной фазы с 2010 г., которая продлится 30 лет.

Более того, на основании интегральной кривой удалось исключить значимость влияния на сток в нижнем русле Амура техносферных факторов.

Согласно множественной линейной регрессии в с. Богородское, расположенное в нижнем русле Амура, оказывается комплексное влияние со стороны моря в переносе дополнительных осадков и со стороны суши, находящейся по течению выше, а также с северной стороны суши, где происходит оттаивание зоны частичной мерзлоты.

Таким образом, влияние на с. Богородское со стороны плотной гидрологической сети бассейна нижнего Амура на этом участке, дополнительных осадков в силу муссонов, приближенности к морю, оттаивания зоны частичной мерзлоты и равнинного характера местности увеличит со временем площадь затопления села и поставит под угрозу жизни людей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеевский Н. И., Болгов М. В., Гарцман Б. И., Георгиевский В. Ю., Дугина И. О., Ким В. И., Махинов А. Н., Шалыгин А. Л. Экстремальное наводнение в бассейне Амура в 2013 году: анализ формирования, оценки и рекомендации // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 17—26.
2. Шалыгин А. Л., Дугина И. О. Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне Амура: причины, особенности, последствия // Экстремальные паводки в бассейне Амура: гидрологические аспекты. 2015. С. 22—35.
3. Махинов А. Н., Ким В. И., Воронов Б. А. Наводнение в бассейне Амура 2013 года: причины и последствия // Вестник ДВО РАН. 2014. № 2. С. 5—14.
4. Новороцкий П. В. Колебания стока Амура за последние 110 лет // Вестник ДВО РАН. 2007. № 2. С. 86—90.
5. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Государственное учреждение "Государственный гидрологический институт". — СПб: Нестор-История, 2010. — 162 с.
6. Магрицкий Д. В. Речной сток и гидрологические расчеты. Компьютерный практикум: учеб. пособие для академического бакалавриата. Изд. 2, испр. и доп. — М.: Юрайт, 2017. — 184 с.
7. АИС ГМВО [Электронный ресурс]. URL: <https://gmvo.sknivh.ru/index.php?id=187> (дата обращения: 10.05.2019).
8. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — мировой центр данных [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения: 12.10.2019).
9. Chvertkin A. G., Sorokin A. E., Bulychov S. N. Forecasting of the dynamics of catastrophic flooding by taking into account changes in the level of groundwater // Asia Life Sciences Supplement. The Asian International Journal of Life Sciences. 2019. № 21(1). P. 1—7.

Analysis of the influence of natural and anthropogenic factors on the formation of catastrophic floods in the lower reaches of the Amur River

A. G. CHVERTKIN, S. N. BULYCHEV

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

E. A. VASKOVA

Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

FSBI "State Hydrological Institute", St. Petersburg, Russia

The article considers the flow rates in the section of the lower Amur, which are dependent variables — predictors of factors that are predictors. Their statistical analysis is carried out, which reflects the pattern in the occurrence of extreme maximum flows in the lower Amur. In addition, the influence of anthropogenic factors on the change in runoff in the lower channel of the Amur River was analyzed. Taken together, these approaches make it possible to exclude from consideration factors that do not belong to the flow-forming ones in the considered section of the river. The dynamics of the passage of the 2013 flood wave is analyzed, a feature of which is a decrease in runoff in the middle of the lower Amur section and its increase at the end, namely, in the village Bogorodsky. On the basis of statistical analysis using the method of multiple linear regression, the main predictors that influenced the runoff were determined. The data obtained made it possible to develop a mathematical model of the flow rate formation. This model can be used to construct flood maps in the area of the lower Amur.

Keywords: catastrophic flood, flood, discharge, flow-forming factor, multiple linear regression, correlation coefficient, predictor, statistical analysis, predictant.

Bibliography — 9 references.

Received November 29, 2020

УДК 621.184.82:621.182:504.5

Разработка нейросетевого алгоритма управления канцерогенными рисками в зонах влияния источников вредных выбросов из энергетических установок промышленных предприятий

¹ В. Ю. КОСЫГИН, д-р геол.-минер. наук; ² Р. В. ДОЛГОВ; ^{2, 3} В. Д. КАТИН, д-р техн. наук;
^{2, 4} М. Х. АХТЯМОВ, д-р биол. наук

¹ Вычислительный центр Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия

² Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

³ Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

⁴ Естественно-научный институт Дальневосточного государственного университета путей сообщения, Хабаровск, Россия

Методом нейросетевого моделирования исследована проблема загрязнения воздуха выбросами вредных веществ из энергетических установок промышленных предприятий. Исходя из анализа накопленных данных и имеющихся математических моделей рассеивания в качестве предикатов для построения искусственной нейронной сети использованы данные о скорости ветра, эффективной высоте выброса, объеме выброса, концентрации загрязняющего вещества в выбросе, расстоянии по оси ветра до контрольной точки. Разработаны алгоритм обучения искусственной нейронной сети и его программная реализация. Получена зависимость, позволяющая оперативно рассчитывать канцерогенные риски, связанные с воздействием загрязняющих веществ на организм человека. Определены пути повышения точности и оперативности составления прогнозов этих рисков в зонах влияния выбросов вредных веществ из энергетических установок промышленных предприятий.

Ключевые слова: выброс вредных веществ, энергетические установки, синаптические веса, промышленные предприятия, прогноз рисков, нейронная сеть, окружающая среда, алгоритм, программная реализация.

Важным компонентом эффективного социально-экономического развития государства является состояние здоровья работающего населения, которое определяется уровнем и экспозицией комплекса вредных и опасных производственных факторов [1]. Одним из основных таких факторов, действующих на территории промышленных предприятий, является загрязнение атмосферного воздуха [2—4].

Проблема качества воздуха усугубляется эффектом накопления загрязнителей вблизи стационарных

источников выбросов промышленных предприятий и транспортных магистралей в период неблагоприятных метеорологических условий, когда концентрации загрязняющих веществ могут превышать норму в 5—15 раз. Такие уровни концентраций способны приводить не только к значительным негативным последствиям для здоровья, но и вызывать острые отравления (заболевания).

Уровень опасности (безопасности) производственной среды может быть оценен с помощью инструментов оценки риска, через критерии специальной оценки условий труда, а также через анализ превышения уровней предельно допустимых концентраций (среднесуточных для населенных территорий и максимально разовых для производственных территорий).

Высокие уровни рисков загрязнения воздушной среды вызывают рост специфических и общесоматических заболеваний, которые ухудшают такие ключевые параметры безопасности техносферы, как показатель нетрудоспособности и сокращение продолжительности жизни. Реализация рисков загрязнения воздуха приводит в конечном итоге к существенному увеличению экономических издержек.

В связи с этим вопросы прогнозирования загрязнения приземных слоев атмосферы территорий про-

Косыгин Владимир Юрьевич, ведущий научный сотрудник отдела математического моделирования.

E-mail: kosyginv@inbox.ru

Долгов Роман Владимирович, старший преподаватель кафедры "Техносферная безопасность".

E-mail: dolgopr@festu.khv.ru

Катин Виктор Дмитриевич, профессор кафедры "Техносферная безопасность", профессор кафедры "Инженерные системы и техносферная безопасность".

E-mail: katinvd@mail.ru

Ахтямов Мидхат Хайдарович, профессор, заведующий кафедрой "Техносферная безопасность", директор.

E-mail: enf@festu.khv.ru

Статья поступила в редакцию 21 декабря 2020 г.

© Косыгин В. Ю., Долгов Р. В., Катин В. Д., Ахтямов М. Х., 2021

мышленных площадок и разработки рекомендаций по снижению профессиональных рисков в зонах загрязнения атмосферного воздуха производственной среды являются весьма актуальными.

Методика исследования

Для прогнозирования концентраций загрязняющих веществ в приземных слоях атмосферы авторами использованы возможности искусственной нейронной сети [5–7].

Исходя из анализа накопленных данных и имеющихся математических моделей рассеивания в качестве предикатов для построения искусственной нейронной сети использованы следующие данные: скорость ветра, эффективная высота выброса, объем выброса, концентрация загрязняющего вещества в выбросах, расстояние по оси ветра до контрольной точки, расстояние по перпендикуляру от оси ветра до контрольной точки.

Для обеспечения достаточной вычислительной мощности нейронной сети выбрано шесть слоев нейронов. В качестве функции активации использована сигмоидальная функция, симметричная относительно оси абсцисс:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (1)$$

Основу нейронной сети составляет многослойный персептрон, обучение которого проводили по методу обратного распространения ошибки. Получение пригодной для вычислений искусственной нейронной сети осуществляли путем подстройки весовых коэффициентов связей.

Предлагаемый авторами алгоритм обучения искусственной нейронной сети предполагает следующую последовательность обработки примеров обучающего множества.

- При инициализации генерируются синаптические веса и пороговые значения, причем дисперсия выбирается таким образом, чтобы стандартное отклонение индуцированного локального поля нейронов приходилось на линейную часть функции активации (1) и не достигало области насыщения.

- На этапе обучения на входной слой искусственной нейронной сети подаются нормированные значения исходных данных — образы обучающего множества.

- Проводится послойное вычисление индуцированных локальных полей и функциональных сигналов сети:

$$v_j^l(n) = \sum_{i=0}^{m_b} w_{ij}^{(l)}(n) y_i^{(l-1)}(n), \quad (2)$$

где $y_i^{l-1}(n)$ — выходной (функциональный) сигнал нейрона i , расположенного в предыдущем слое $(l-1)$ на итерации n ;

$w_{ij}^{(l)}(n)$ — синаптический вес связи нейрона j из слоя l с нейроном i из слоя $l-1$.

Для $i = 0$ $y_0^{(l-1)}(n) = +1$, а $w_0^{(l)}(n) = b_j^l(n)$ — порог, применяемый к нейрону j из слоя l . Для нейронов первого слоя $y_j^0(n) = x_j(n)$, где $x_j(n)$ — j -я компонента входного вектора $x(n)$. Для нейронов выходного слоя $y_j^L(n) = o_j(n)$, где L — глубина сети.

- Вычисляется сигнал ошибки $e_j(n) = d_j(n) - o_j(n)$, где $d_j(n)$ — j -я компонента вектора желаемого отклика $d(n)$.

- Локальные градиенты узлов сети вычисляются по следующим формулам:

$\delta_j^{(L)}(n) = e_j^{(L)}(n) \varphi_j' [v_j^{(L)}(n)]$ для нейрона j выходного слоя L ;

$\delta_j^{(l)}(n) = \varphi_j' [v_j^{(l)}(n)] \sum_k \delta_k^{(l+1)}(n) \delta_{kj}^{(l+1)}(n)$ для нейрона j скрытого слоя l .

- Изменение синаптических весов слоя l выполняется в соответствии с обобщенным дельта-правилом:

$$w_{ij}^{(l)}(n+1) = w_{ij}^{(l)}(n) + \alpha [w_{ij}^{(l)}(n-1)] + \eta \delta_j^{(l)}(n) y_i^{l-1}(n),$$

где η — параметр скорости обучения;
 α — постоянная момента.

- На заключительном этапе производится расчет канцерогенного риска по формуле

$$R = \sum_{j=1}^N \frac{1}{\tau_j} \int_0^{\tau_j} R_j \sum_{l=1}^L \sum_{i=0}^{m_b} w_{ij}^{(l)}(n) y_i^{(l-1)}(n) d\tau, \quad (3)$$

где R — индивидуальный риск онкологического заболевания;

τ_j — время наблюдения концентрации j -го вредного вещества в зоне воздействия на человека;

R_j — единичный фактор риска для j -го вещества.

Формула (3) — это авторская модификация формулы для расчета канцерогенного риска из руководства по оценке риска для здоровья от загрязнения окружающей среды [8], полученная с учетом формулы (2).

Результаты вычислений искусственной нейронной сети по приведенному алгоритму показали достаточную сходимость с результатами расчетов по методике [9]. Отличительной особенностью предложенного алгоритма является возможность уточнения расчетов за счет дообучения искусственной нейронной сети на результатах натурных измерений на территории промышленной площадки.

Результаты исследования

На основании предложенного алгоритма расчетов искусственной нейронной сети авторами разработана его программная реализация, блок-схемы которой представлены на рис. 1 и 2.

Предлагаемая реализация авторской программы для ЭВМ позволяет на основе метеорологических параметров и известных режимов работы оборудования осуществлять численный мониторинг состояния уровней загрязнения приземных слоев атмо-

сферного воздуха промышленных площадок в режиме реального времени. Оценку точности вычислений искусственной нейронной сети осуществляли на выборке примеров, не вошедших в обучающее множество. В качестве критерия оценки было использовано значение среднеквадратической ошибки. При этом качество прогноза искусственной нейронной сети можно повышать, предоставляя ей для обучения дополнительные обучающие множества, содержащие результаты натурных измерений концентраций загрязнителей и режимы работы оборудования.

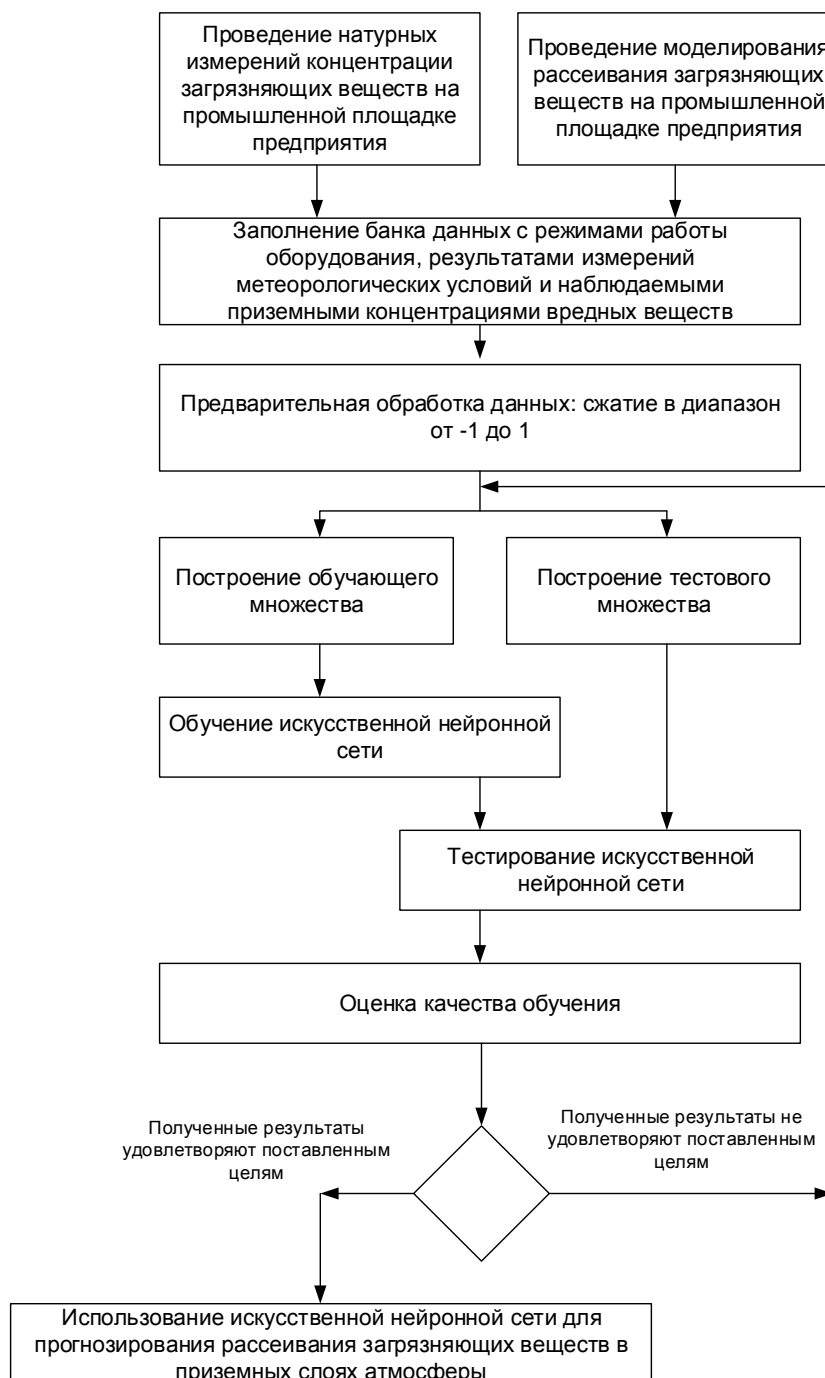


Рис. 1. Блок-схема подготовки к использованию программы для ЭВМ

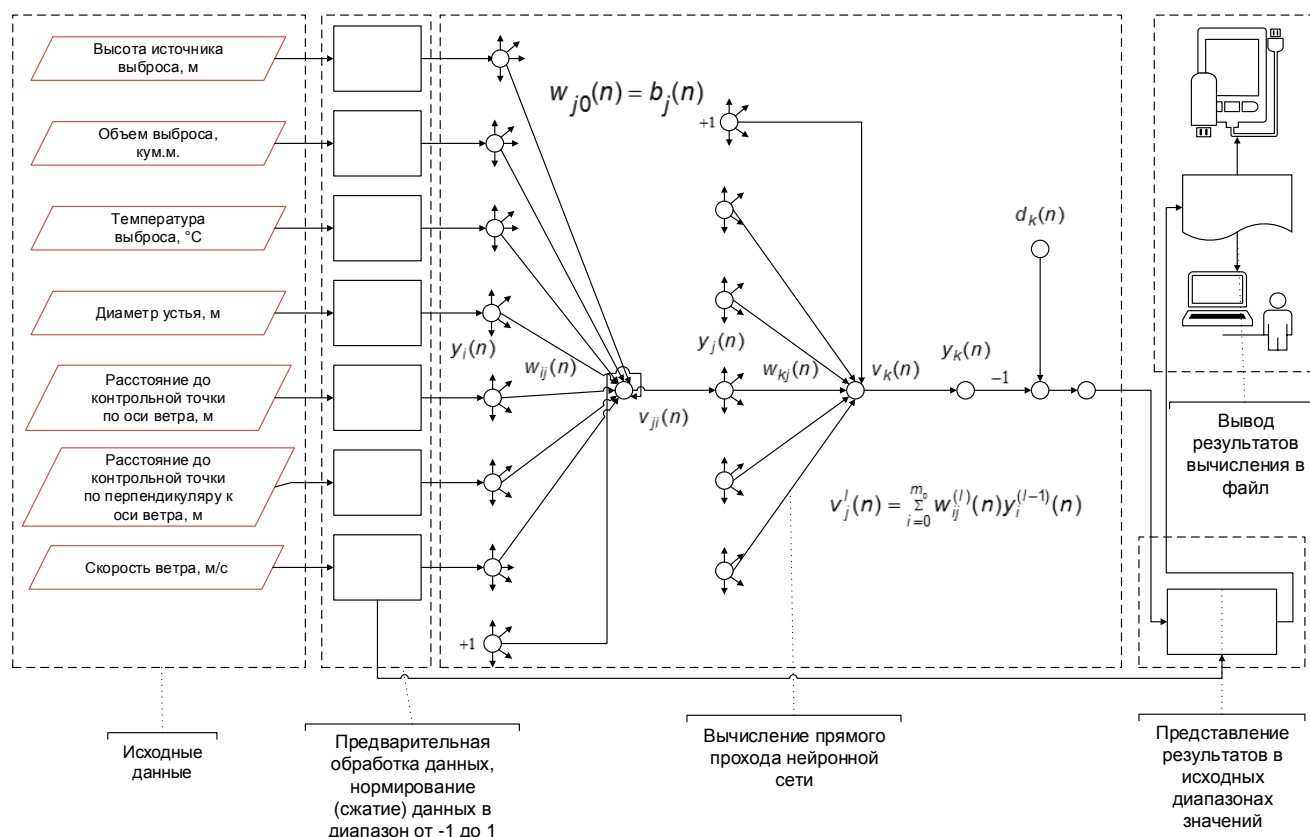


Рис. 2. Блок-схема работы программы для ЭВМ

Заключение

Предлагаемый алгоритм и его программная реализация на ЭВМ позволяют осуществлять оперативный прогноз зон повышенных уровней загрязнения приземных слоев атмосферного воздуха на территории промышленных предприятий, а также уровней индивидуального канцерогенного риска их работников. Результаты прогноза могут быть использованы при планировании работ по охране труда на территории промышленных площадок и при оценке канцерогенного риска, обусловленного воздействием загрязняющих веществ на организм человека.

Использование полученной зависимости позволяет учитывать в расчетах канцерогенных рисков перемещение работников между зонами с различными уровнями загрязнения атмосферного воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трудовой кодекс Российской Федерации: "Федеральный закон Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 20.12.2017).

[Электронный ресурс]. Доступ из справочно-правовой системы "Консультант Плюс".

2. Катин В. Д., Бойко В. А. Защита атмосферного воздуха при малоотходных методах сжигания мазута и нефтезаводских газов в котлах и печах. — Владивосток: Дальнаука, 2012. — 190 с.

3. Катин В. Д., Пайметов Н. Г. Охрана воздушной среды на нефтеперерабатывающих заводах. — Хабаровск: ДВГУПС, 2008. — 152 с.

4. Матешева А. В. Идентификация стационарных источников загрязнения атмосферы на транспорте // Наука и техника транспорта. 2016. № 3. С. 20—25.

5. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики: Перцептроны и теория механизмов мозга. — М.: Мир, 1965. — 480 с.

6. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. — М.: Мир, 1992. — 240 с.

7. Fukushima K. Neocognitron: A self-organizing multilayer neural network model for a mechanism of pattern recognition unaffected by shift in position // Biological Cybernetics. 1980. № 36(4). P. 193—202.

8. Marty M. A., Siegel D. Air Toxics Hot Spots Program. Guidance Manual for Preparation of Health Risk Assessments. — California: EPA. — February, 2015. — 231 p.

9. Приказ Минприроды России от 06.06.2017 № 273 "Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе" (зарегистрировано в Минюсте России 10.08.2017 № 47734).

Working out of neural network algorithm for management of cancerogenic risks in zones of influence of sources of harmful emissions from power installations of industrial enterprises

¹ V. Yu. KOSYGIN, ² R. V. DOLGOV, ^{2,3} V. D. KATIN, ^{2,4} M. Kh. AKHTYAMOV

¹ Computing Center of the Far-Eastern Branch of the RAS, Khabarovsk, Russia

² Far Eastern State transport university, Khabarovsk, Russia

³ Pacific state university, Khabarovsk, Russia

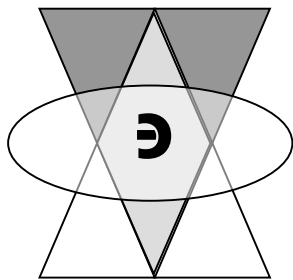
⁴ Institute of Natural Sciences Far Eastern State transport university, Khabarovsk, Russia

The method of neural network modelling investigates a problem of air pollution by emissions of harmful substances from power installations of the industrial enterprises. Proceeding from the analysis of the saved up given and available mathematical models of dispersion, as predicates for construction of an artificial neural network data about speed of a wind, effective height of emission, volume of emission, concentration of polluting substance in emission, distance on an axis of a wind to a control point are used. The algorithm of training of an artificial neural network and its program realization is developed. The dependence allowing operatively to count cancerogenic risks, connected with influence of polluting substances on a human body is received. Ways of increase of accuracy and efficiency of drawing up of forecasts of these risks to zones of influence of emissions of harmful substances from power installations of the industrial enterprises are defined.

Keywords: emission of harmful substances, power installations, synaptic weights, industrial enterprises, the forecast of risks, neural network, environment, algorithm, program realization.

Bibliography — 9 references.

Received December 21, 2020



УДК 621.433; 621.486

Очистка промышленных газовых выбросов

Система адаптации дизельного двигателя для работы в помещениях с ограниченным воздухообменом

Е. В. ОВЧИННИКОВ; А. Ю. ИЗМАЙЛОВ, акад. РАН, д-р техн. наук;
С. Ю. УЮТОВ; Р. С. ФЕДОТКИН, канд. техн. наук

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), Москва, Россия

Рассмотрен способ и дано техническое решение задачи снижения вредных выбросов и дымности трактора с дизельным двигателем, работающим на сжиженном углеводородном газе по газодизельному процессу, оснащенным системой нейтрализации вредных веществ в отработавших газах.

Ключевые слова: вредные выбросы, трактор, дизельный двигатель, ограниченный воздухообмен, сжиженный углеводородный газ.

Активно развивается использование машин для выполнения операций в производственных помещениях, помещениях сельскохозяйственного назначения, складских комплексах и т. д. Актуальным становится применение машин с электрическим приводом. Это связано с тем, что техника с двигателем внутреннего сгорания производит вредные выбросы в отработавших газах (ОГ) и повышенную дымность, при которой нахождение людей и животных в помещениях осложняется. Однако такие машины очень требовательны к своевременному обслуживанию и зачастую их стоимость достаточно высока. Поэтому все чаще используют технику с двигателями внутреннего сгорания. Применение машин с дизельными двигателями внутреннего сгорания в помещениях с ограниченным воздухообменом осложняется по экологическим показателям. Для решения этой задачи имеются способы и технические решения, применяемые на дизельных двигателях, позволяющие снизить вредные выбросы до предельно допустимых концентраций.

Овчинников Евгений Валентинович, научный сотрудник лаборатории "Двигатели и ходовые системы".

E-mail: evo-xpro-info@yandex.ru

Измайлов Андрей Юрьевич, директор.

E-mail: vim@vim.ru

Уютов Сергей Юрьевич, младший научный сотрудник.

E-mail: s_uutov@mail.ru

Федоткин Роман Сергеевич, ведущий научный сотрудник.

E-mail: frs89@bk.ru

Статья поступила в редакцию 19 октября 2020 г.

© Овчинников Е. В., Измайлов А. Ю., Уютов С. Ю., Федоткин Р. С., 2021

Многие исследователи успешно занимаются данной проблематикой, например, используют монолитные катализаторы, сажевые фильтры, комбинированные системы [1, 2]. Также активно применяют системы (SCR), в которых используются химические реагенты для дожигания вредных выбросов в каталитическом нейтрализаторе (например, мочевины — AdBlue®). Для снижения вредных выбросов также используют систему рециркуляции ОГ (EGR), которая способствует улучшению топливной экономичности, снижению детонации при работе дизеля в газодизельном режиме, повышению надежности системы на всех скоростных и нагрузочных режимах работы тепловых поршневых двигателей [3].

Помимо систем для очистки ОГ двигателей внутреннего сгорания также используют менее токсичные виды топлива [4, 5]. Использование альтернативных видов топлива, чаще всего биотоплива и смешанных видов топлива, становится все более распространенным из-за их доступности и классификации в качестве возобновляемых источников энергии. Поэтому следует учитывать экологический аспект использования таких видов топлива, т. е. их специфику с точки зрения влияния на количество вредных выбросов [6, 7].

Переход на альтернативные виды топлива не всегда позволяет добиться тех же характеристик двигателя, что и при использовании дизельного топлива. Например, переход с дизельного топлива на газомоторное с искровым зажиганием топливного заряда значительно снижает крутящий момент двигателя, который является одним из основных показателей дизельного двигателя. Некоторые исследователи проводили эксперименты по использованию сжижен-

ного углеводородного газа (СУГ) в дизельных двигателях по газодизельному процессу, т. е. использованию газомоторного топлива как частично замещающего (до 40 %), а для воспламенения применяли дизельное топливо [8].

Цель данной работы — создание для установки на трактор систем, которые позволят осуществлять снижение вредных выбросов дизельного двигателя до предельно допустимой концентрации для работы в помещениях с ограниченным воздухообменом. Для решения этой задачи разработаны способ и технические средства, позволяющие использовать СУГ по газодизельному процессу, дающие возможность заместить до 80 % дизельного топлива газомоторным, а также снизить вредные выбросы, в том числе за счет каталитического нейтрализатора и дожигания вредных выбросов в выпускном коллекторе двигателя путем впрыска активатора горения.

Материалы и методы

Для создания трактора, удовлетворяющего экологическим требованиям в помещениях с ограниченным воздухообменом, проведены стендовые испытания двигателя ММЗ Д 243, на котором отработывали системы топливоподачи газомоторного топлива, рециркуляции отработавших газов, нейтрализации отработавших газов [9]. Все системы показали свою эффективность. Получены следующие результаты: снижение дымности на 80 %, вредных выбросов — в среднем на 72 %. Полученные результаты свиде-

тельствовали об актуальности данных разработок по созданию действующего образца трактора для последующих эксплуатационных испытаний.

Для проведения исследований выбран трактор Беларус 320.4 (рис. 1), оснащенный дизельным 3-цилиндровым двигателем Lombardini LDW1603/B3 экологического стандарта Евро-3А мощностью 26,5 кВт (36,0 л. с.).

На данный трактор была установлена система адаптации, позволяющая работать на СУГ по газодизельному процессу. Помимо топливной системы на трактор также была установлена система нейтрализации отработавших газов, представляющая собой каталитический нейтрализатор, включающий систему искрогашения и сажевый фильтр производства ООО "Экоэнерготех", а также систему впрыска мочевины для дожигания вредных выбросов в каталитическом нейтрализаторе. Основные узлы и компоненты системы улучшающие экологические показатели, представлены на рис. 2.

Система нейтрализации отработавших газов работает следующим образом. Перед каталитическим нейтрализатором установлен лямбда-зонд (нижний), который считывает количество кислорода в отработавших газах. Он согласуется со вторым лямбда-зондом (верхним), расположенным после нейтрализатора. Принцип нейтрализатора основан на способности каталитических металлооксидных покрытий, нанесенных на монокристаллические блоки-носители, промотивировать окислительно-восстановительные процессы в режиме поточного реактора.



Рис. 1. Трактор Беларус 320.4 для работы в помещениях с ограниченным воздухообменом

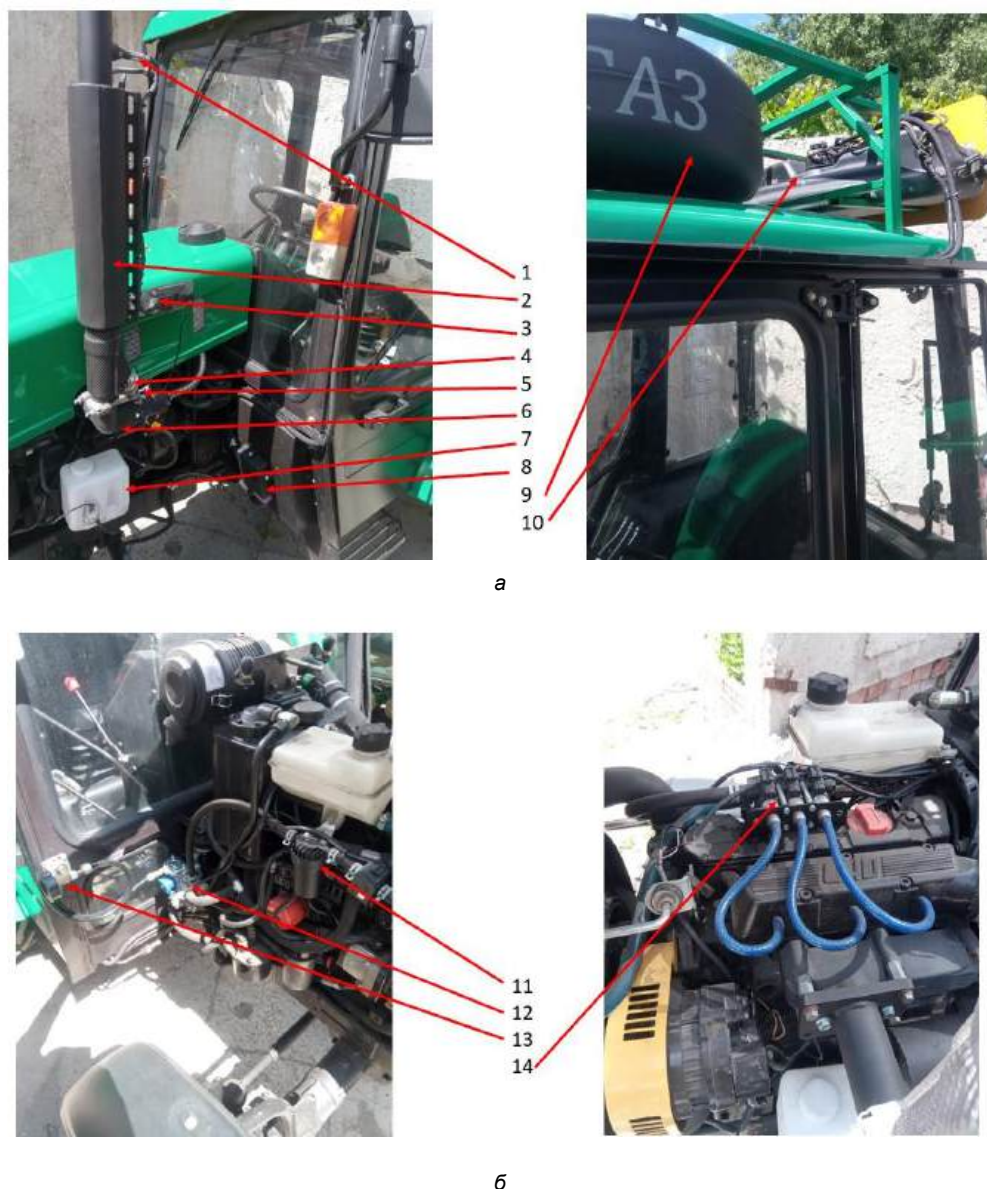


Рис. 2. Основные узлы и компоненты системы для улучшения экологических показателей:
 1 — верхний лямбда-зонд; 2 — каталитический нейтрализатор; 3 — блок управления впрыска мочевины;
 4 — форсунка впрыска мочевины; 5 — нижний лямбда-зонд; 6 — система рециркуляции ОГ; 7 — бак для активатора горения;
 8 — блок управления двигателем; 9 — баллон для СУГ; 10 — бак для мочевины с насосом;
 11 — фильтр для СУГ; 12 — теплообменник-испаритель для СУГ; 13 — заправочное устройство для СУГ;
 14 — электро-форсунки для СУГ

При прохождении потока ОГ через нейтрализатор происходит многоступенчатая его очистка от сажи, СО, СН и NO_x. При этом оксид углерода преобразуется в двуокись углерода, а углеводороды — в двуокись углерода и воду. На первой ступени происходит отделение наиболее крупных частиц сажи. На второй ступени менее крупные частицы подвергаются окислению на каталитически активном фильтре до углекислого газа и воды. На третьей ступени каталитические блоки обеспечивают восстановление NO_x до молекулярного азота. На четвертой ступени каталитические блоки обеспечивают преобразование СО и C_nH_m до углекислого газа и воды.

Основные характеристики нейтрализатора представлены в таблице.

Основные характеристики каталитического нейтрализатора

Основные параметры	Показатели
Диапазон рабочих температур, °С	300—900
Газодинамическое сопротивление, не более, кПа	3,5
Ресурс работы, не менее, лет	5
Степень очистки отработавших газов* ДВС, не менее, %	
• по окислу углерода	90—97
• по углеводородам	85—95
• по окислам азота	65—95
• по содержанию твердых частиц	85—95

*В зависимости от типа настроек двигателя

Окислы азота (NO_x), содержащиеся в ОГ, преобразуются в восстановительных катализаторах в азот (N_2) и воду (H_2O). Для этого в поток отработавших газов перед катализаторами непрерывно впрыскивают восстановительный реагент. Реагент содержат в отдельном баке. Аммиак, необходимый для восстановления окислов азота, используют не в чистом виде, а в виде водного раствора мочевины. Аммиак в чистом виде вызывает раздражение кожи и слизистой оболочки, а также имеет неприятный запах. В качестве восстановительного реагента в системе SCR используют жидкость, известную в автомобильной промышленности под маркой AdBlue®. AdBlue® представляет собой прозрачный 32,5%-й водный раствор мочевины высокой степени очистки. Мочевину получают синтетическим путём. Рабочая температура восстановительных катализаторов составляет около 200 °С. Информацию о температуре ОГ перед восстановительными катализаторами блок управле-

ния двигателя получает от датчика температуры ОГ. Восстановительный реагент AdBlue® всасывается из бака насосом и под давлением около 5 бар через нагреваемый трубопровод подаётся к форсунке (рис. 3).

Форсунка для реагента управляется от блока управления двигателя и дозированно распыляет мочевины в выпускном тракте. Впрыскиваемый реагент увлекается потоком ОГ и с помощью смесителя равномерно распределяется по объёму ОГ. На участке тракта перед катализатором (так называемом участке гидролиза) реагент разлагается на аммиак (NH_3) и двуокись углерода (CO_2). В катализаторе аммиак (NH_3) вступает в реакцию с окислами азота (NO_x), в результате которой образуются азот (N_2) и вода (H_2O). Эффективность системы контролируется датчиком NO_x (верхний лямбда-зонд).

Схема работы системы нейтрализации ОГ показана на рис. 4.



Рис. 3. Принцип работы системы подачи мочевины

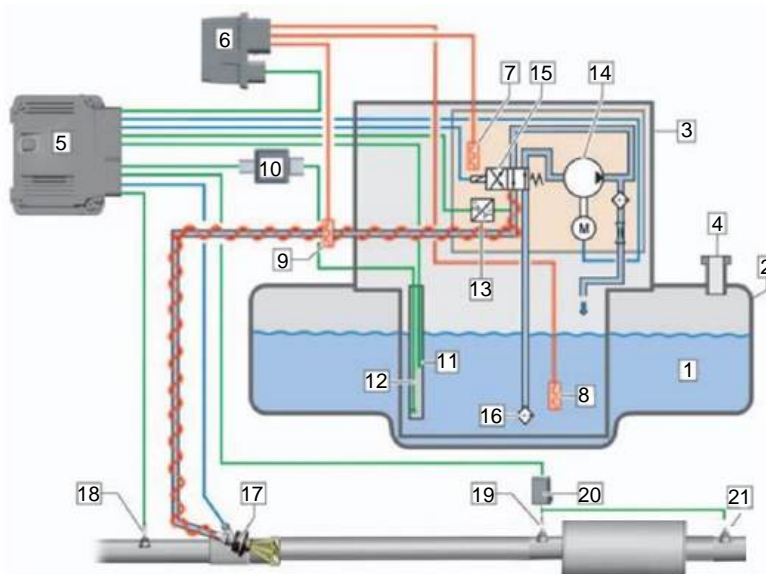


Рис. 4. Схема работы системы нейтрализации ОГ:

- 1 — восстановительный реагент; 2 — бак для реагента; 3 — подающий модуль для реагента; 4 — заливная горловина; 5 — блок управления двигателем; 6 — блок управления нагревателя реагента; 7 — нагреватель насоса реагента; 8 — нагреватель для бака с реагентом; 9 — нагреватель трубопровода для подачи реагента; 10 — блок контроля уровня реагента; 11 — датчик уровня реагента; 12 — датчик температуры реагента; 13 — датчик давления в системе дозирования реагента; 14 — насос для реагента; 15 — обратный клапан для реагента; 16 — фильтр; 17 — форсунка для реагента; 18 — датчик температуры отработавших газов; 19 — лямбда-зонд нижний; 20 — блок управления лямбда-зондов; 21 — лямбда-зонд верхний

Закключение

Проведенный анализ публикаций однозначно показывает мировую тенденцию к снижению выбросов вредных веществ от двигателей внутреннего сгорания. Актуальность использования техники для работ в помещениях с ограниченным воздухообменом не вызывает сомнений. Существующие разработки и технические решения доказали свою эффективность на стендовых испытаниях и были установлены на действующий трактор. Дополнительным положительным качеством предлагаемой разработки является то, что данную систему можно устанавливать на любой трактор, как новый, так и эксплуатирующийся. Для этого не требуется серьезных изменений в штатной системе питания. Монтаж системы возможен в течение одного дня. Стоимость устанавливаемого оборудования в зависимости от марки трактора составляет несколько сотен тысяч рублей. Рассмотренный макетный образец подготовлен к проведению эксплуатационных испытаний на производственных площадках ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

ренный макетный образец подготовлен к проведению эксплуатационных испытаний на производственных площадках ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sassykova L. R. et al. // Orient. J. Chem. 2019. V. 35(1). P. 110—127.
2. Wittka T., Holderbaum B., Dittmann P. et al. // Emiss. Control Sci. Technol. 2015. № 1. P. 167—182.
3. Kulandaivel D. et al. // Fuel. 2020. V. 278. P. 11830415.
4. Dhahada H. A. et al. // Fuel. 2020. V. 279. P. 118384.
5. Zhang Y., Lou D., Hu Z., Tan P. // J. Clean. Prod. 2019. № 225. P. 627—636. 10.1016/j.jclepro.2019.03.344
6. Kozina A., Radica G., Nizetić S. // J. Cleaner Production. 2020. № 262. P. 121105.
7. Kontsesa A. et al. // Atmospheric Environment. 2020. V. 222. P. 1171261.
8. Ianniello R. et al. // Appl. Sci. 2020. № 10(14). P. 4949.
9. Измайлов А. Ю., Савельев Г. С., Кочетков М. Н., Овчинников Е. В., Уютов С. Ю. Автотракторный дизельный двигатель, адаптированный к работе на сжиженном углеводородном газе по газодизельному процессу // Изв. МГТУ. 2018. № 1(35). С. 10—15.

Diesel engine adaptation system for operation in rooms with limited air exchange

E. V. OVCHINNIKOV, A. Yu. IZMAILOV, S. Yu. UYUTOV, R. S. FEDOTKIN
Federal Scientific Agroengineering Center VIM (FGBNU FNATS VIM), Moscow, Russia

This article discusses a method and technical solution to reduce harmful emissions and smoke of a tractor with a diesel engine running on liquefied hydrocarbon gas through a gas-diesel process equipped with a system for neutralizing harmful substances in the exhaust gases.

Keywords: harmful emissions, tractor, diesel engine, limited air exchange, liquefied petroleum gas.

Bibliography 9 references.

Received October 19, 2020

Экология промышленного производства: Межотр. науч.-практ. журнал / ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2021. Вып. 1. С. 1—52.

Редактор *О. А. Константинова*

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

Подписано в печать 24.02.2021.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 6,0. Уч.-изд. л. 6,2.

Тираж 250 экз. Заказ 1967.

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, офис 105.

ИП Кириченко Алексей Викторович.

Индекс 80090.

**БЛАНК-ЗАКАЗ НА ПОДПИСКУ 2021 г.
на издания ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»**

Наименование издания	Периодичность в год	Цена 1 экз., руб.	Кол-во выпусков в год	Общая сумма, руб.
Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России	4	1550,00		
Конструкции из композиционных материалов	4	1700,00		
Экология промышленного производства	4	1500,00		
Информационные технологии в проектировании и производстве	4	1750,00		
Вопросы защиты информации	4	1750,00		
<i>В цену включены: НДС — 10 % и стоимость почтовой доставки.</i>				

Поставка журналов подписчикам через издательство осуществляется почтовыми бандеролями с приложением всех необходимых бухгалтерских документов.

Наши реквизиты:

Полное наименование организации: _____

Сокращенное наименование организации: _____

ИНН/КПП _____

ОКПО _____

Расчётный счёт № _____ в _____

к/с _____ БИК _____

Юридический адрес: _____

Почтовый адрес: _____

Контактное лицо _____ тел. _____

E-mail: _____

(Для оформления счёта и бухгалтерских документов просьба заполнить все строчки).

Справочно:

Заполненный бланк-заказ просьба отправить по факсу: 8(495) 491-44-80 или

E-mail: secretariat@ntckompas.ru

Более подробную информацию об изданиях и подписке можно получить по телефону:

8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-20.

E-mail: ivleva@ntckompas.ru

Адрес редакции: 125424, Москва, Волоколамское шоссе, д.77.

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».