

ЭКОЛОГИЯ

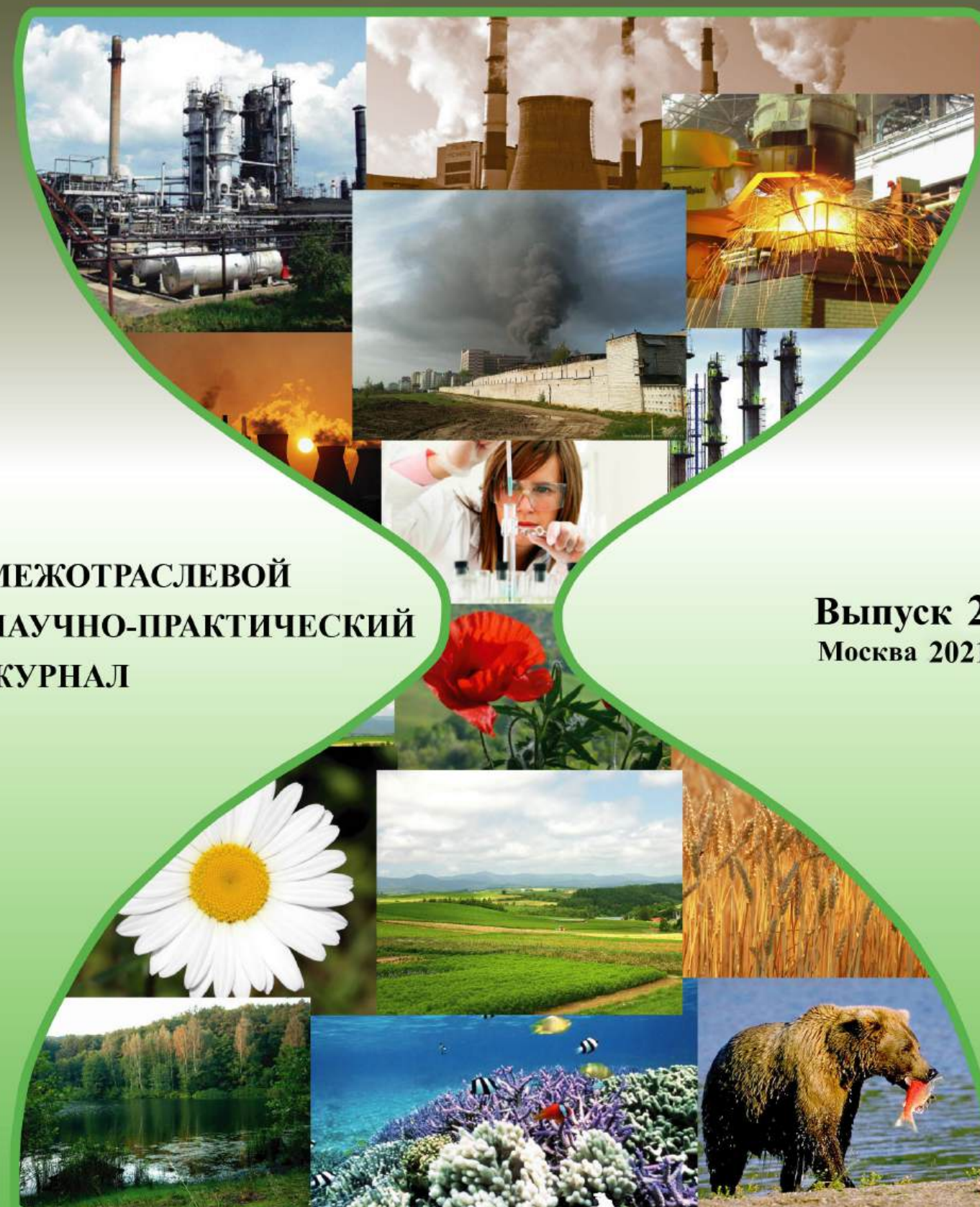
промышленного
производства

Индекс 80090



ЭКОЛОГИЯ

промышленного
производства



МЕЖОТРАСЛЕВОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

Выпуск 2
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 2 (114)

Издается с 1993 г.

Москва 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ, УТИЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕРАБОТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

- Горькова Н. В., Булычев С. Н. Современные пути решения проблемы обращения с отходами в разных странах 2
- Артемов А. В., Переславцев А. В., Воишин С. А., Тресвятский С. С., Коробцев С. В. Плазменная переработка смеси коммунальных, полимерных и медицинских отходов: технико-экономический анализ 7
- Уварова А. С., Виткалова И. А., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Влияние кирпичного боя на свойства облицовочного композиционного материала на основе вторичного полимерного связующего 13
- Шапиро С. Р., Абдрахимов В. З. Экономическая, экологическая и практическая целесообразность использования отходов углеобогащения ЦОФ "Абашевской" в производстве легковесного сейсмостойкого кирпича 18

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДООЧИСТКА

- Масленников А. А., Демидова С. А., Бочарова Л. Ю., Клаучек В. В., Антонов В. А. Эколого-токсикологическая оценка опасности загрязнения воды водоёмов основной свинцово-никелевой солью фталевой кислоты 24

ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

- Алмазов Е. В., Морозенко М. И. Оценка эколого-экономических показателей плазменной технологии переработки медицинских отходов 29
- Курбаков Д. Н., Кузнецов В. К., Сидорова Е. В., Андреева Н. В., Саруханов А. В., Новикова Н. В., Кречетникова Е. О. Оценка экологического состояния снежного покрова в 30-километровой зоне Новолипецкого металлургического комбината 34

ОЧИСТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ

- Катин В. Д., Косыгин В. Ю., Квасников М. П. Управление процессом горения топлива и токсичностью дымовых газов, выбрасываемых из нефтезаводских печей, методами многокритериальной оптимизации 41
- Овчинников Е. В., Федоткин Р. С., Уюттов С. Ю., Крючков В. А. Комбинированная силовая установка с улучшенными экологическими показателями 44

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»

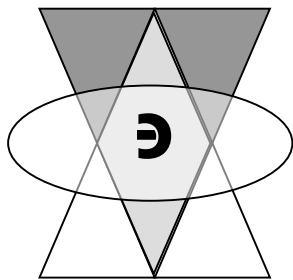
Редакционный совет:

А. М. Амирханов, канд. биол. наук, зам. руководителя
Федеральной службы по надзору в сфере природо-
пользования; **Э. В. Гирисов,** д-р филос. наук, проф.,
акад. Российской экологической академии, Московская
государственная академия делового администрирова-
ния; **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; **В. А. Грачев,** чл.-кор. РАН,
д-р техн. наук, проф., президент, генеральный дирек-
тор Неправительственного экологического фонда
им. В. И. Вернадского; **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 «Фрэком»; **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 промыш-
ленной 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 Российско-
го 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 эне-
ргоэкологических проблем автотранспортного комплекса
при МАДИ

© Федеральное государственное унитарное пред-
приятие «Научно-технический центр оборонного ко-
мплекса «Компас» (ФГУП «НТЦ оборонного комплекса
«Компас»), 2021



Обезвреживание, утилизация и переработка промышленных отходов

УДК 628.4.03

DOI: 10.52190/2073-2589_2021_2_2

Современные пути решения проблемы обращения с отходами в разных странах

Н. В. ГОРЬКОВА, канд. техн. наук; **С. Н. БУЛЫЧЕВ**, канд. техн. наук
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

Подробно проанализирована система обращения с отходами в разных странах. Рассмотрены основные этапы переработки отходов. Особое внимание уделено их первоначальной сортировке. Описаны программы раздельного сбора твердых отходов в России. Проанализированы пути решения проблем минимизации образования отходов и вовлечения их во вторичный оборот.

Ключевые слова: образование отходов, переработка отходов, обращение с отходами, твердые бытовые отходы, сортировка, вторичная переработка, утилизация.

Проблема образования отходов приобрела глобальные масштабы и угрожает будущему человечества. Ежегодно на планете образуется более 2 млрд т твердых бытовых отходов, и эта цифра продолжает стремительно расти. Ожидается, что при быстром росте населения и урбанизации к 2050 г. ежегодное образование отходов увеличится до 3,4 млрд т/г.

По ежегодной статистике самых экологически чистых стран, рейтинг которых составляет Yale Center for Environmental Law and Policy (Центр экологической политики и права при Йельском университете), Россия по данным за 2020 г. занимает 58 место [1]. Такой оценке подверглось 180 стран, каждой из которых был присвоен индекс экологической эффективности (Environmental Performance Index — EPI). В 2020 г. России был присвоен индекс 50,5, тогда как в 2018-м г. он составлял 63,79 и страна занимала 52-е место в данном рейтинге. По состоянию на 2020 г. самыми экологически чистыми странами с индексом выше 80 признаны Дания (82,5), Люксембург (82,3), Швейцария (81,5), Великобритания (81,3), Франция (80).

Несмотря на то что многие страны уделяют внимание введению новых проектов и законов в сфере

защиты окружающей среды, принятых мер становится недостаточно. Одной из главных проблем, которая усугубляет экологическую ситуацию и является одной из причин образования отходов, является отсутствие эффективной системы обращения с отходами.

Помимо этой проблемы существует и ряд других причин, которые способствуют образованию отходов производства и потребления и ускоряют их стремительный рост. Это увеличение:

- количества продукции одноразового использования;
- численности населения, в итоге чего имеет место стремительный рост различных торговых центров, спроса на товары потребления и т. п.;
- объемов продукции, изготовленной из синтетических материалов.

Обращение с отходами в разных странах

Главный показатель в области обращения с отходами, к которому стремятся все страны, — увеличение доли переработки отходов от общего числа образованных отходов производства и потребления [2]. Это дает возможность возврата в хозяйственный оборот невозобновляемых природных ресурсов, которые ранее были использованы при производстве продукции. Чем больше показатель переработки отходов, тем больше полезных материалов возвращается во вторичный оборот. Вследствие этого меньше отходов идет на захоронение, на переработку отхо-

Горькова Наталья Владимировна, доцент.

E-mail: holy81@mail.ru

Булычев Сергей Николаевич, доцент.

E-mail: bulychovsn@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 27 апреля 2021 г.

© Горькова Н. В., Булычев С. Н., 2021

дов затрачивается меньше ресурсов, чем при производстве новой продукции. Использование вторичных материалов снижает количество вредных выбросов в окружающую среду, которое могло бы быть образовано в случае производства этих материалов заново.

Опыт передовых стран в области управления муниципальными или бытовыми отходами (Европа, Япония, США) показывает, что лучший способ избавиться от мусора — правильно сочетать переработку того, что подходит для вторичного использования, и сжигание всего остального мусора. На рис. 1 показано, сколько мусора образуется в разных странах.

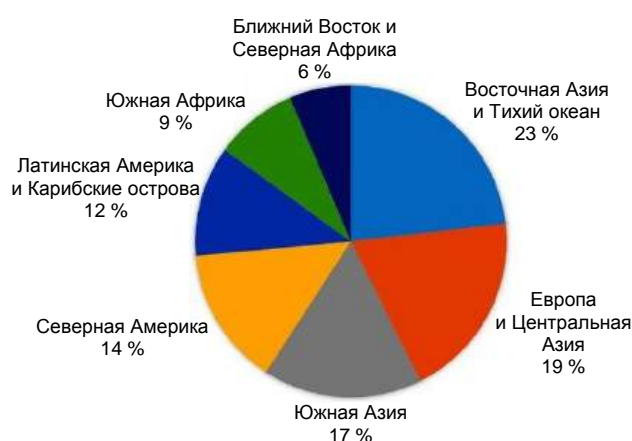


Рис. 1. Образование мусора в мире

Лидирующими странами Европейского Союза по переработке бытовых отходов являются (в процентах перерабатываемых отходов) [3]: Германия (66 %), Австрия (57,6 %), Бельгия (53,5 %), Нидерланды (53,1 %), Швеция (48,9 %), Франция (41,7 %), Испания (29,7 %).

Все твердые коммунальные отходы можно разделить по видам, представленным на рис. 2.

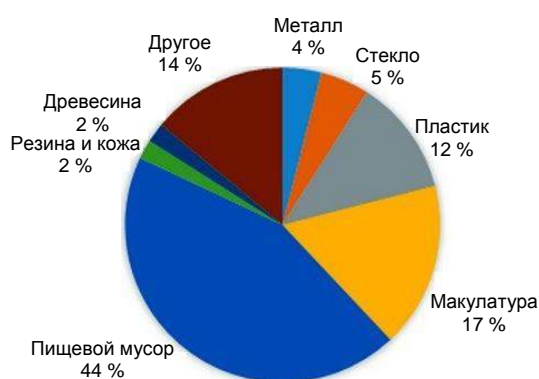


Рис. 2. Виды твердых коммунальных отходов

Согласно очередному проекту законов Европейского Союза, посвященному "мусорной" реформе, все страны в составе Европейского союза к 2025 г. должны достичь уровня утилизации в 55 %, а к 2035 г. этот показатель должен составлять 65 %. На данный момент показатель переработки отходов в Европе в среднем составляет 46 %.

Деление отходов по источникам и отраслям экономики в Европе представлено на рис. 3.

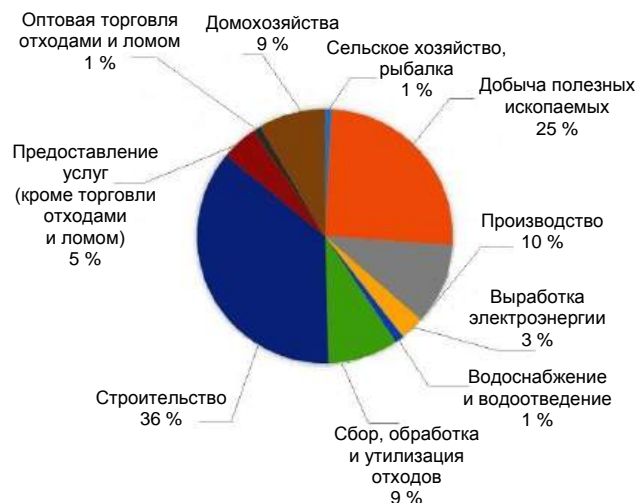


Рис. 3. Виды источников отходов в Европе

Бесспорным лидером в области утилизации отходов является Швеция с показателем утилизации 99 %. Половина из общего числа отходов идет на сжигание, остальная часть — на переработку с последующим вовлечением во вторичный хозяйственный оборот и на компост.

В США уровень переработки отходов согласно Агентству по охране окружающей среды составляет более 35 % [4]. Национального закона, который предписывал бы утилизацию отходов, в США нет. Но органы власти штатов и местные органы власти могут вводить собственные требования по утилизации отходов в соответствии с Законом о сохранении и восстановлении ресурсов. В этом законе говорится о разработке комплексных мер по управлению муниципальными и промышленными отходами экологическим департаментом каждого штата. Большая часть отходов в США (около 50 %) идет на захоронение, на сжигание отправляется около 13—15 % от общего числа отходов, а на компостирование — около 10 %. Одним из лидеров по переработке отходов является штат Калифорния с показателем в 44 %.

Доля переработанных отходов в Японии составляет 46 %. Здесь большую часть переработанного сырья составляют ПЭТ-бутылки, алюминиевые банки, стекло и бумага. Японцы нашли и такое оригинальное применение отходам, как искусственные острова, созданные с помощью переработанных отходов, на которых размещены аэропорты. Аналогичное решение использовал и Сингапур, рядом с которым находится искусственный остров Семакау, построенный из продуктов сжигания отходов.

Франция с 2021 г. намерена запретить использование всех одноразовых материалов, а уже с 2025 г. увеличить долю переработанных пластмасс до 100 %.

Одним из этапов переработки отходов является их первоначальная сортировка. Во многих странах сортировка отходов вошла в законодательство, за несоблюдение которого могут накладываться огромные штрафы. Многие страны сортируют отходы по

нескольким контейнерам (см., например, рис. 4). Каждая страна устанавливает свое количество контейнеров для разного вида вторсырья.



Рис. 4. Контейнеры для сортировки отходов

Во Франции на контейнерах для мусора стоят специальные датчики, которые регулируют его перевозку [5]. Такой датчик (или чип) дает возможность отслеживать заполнение баков, что позволяет эффективно организовывать деятельность мусоровозов, избавляя их от ненужных поездок и экономить топливо.

Большинство стран, в частности Франция, ввели дополнительный экологический сбор на упаковку из пластика и стекла. В результате потребители вынуждены платить больше, но могут вернуть часть денег, сдавая тару, как это уже принято в Германии. Если предприятие использует переработанные материалы, оно имеет право на пониженный налог.

Другим подходом в сортировке отходов пользуются в Японии. Жители Японии разделяют все отходы на 4 категории: несгораемые, сгораемые, перерабатываемые и крупногабаритные. Каждый вид отходов должен складываться в пакет определенного цвета. На крупногабаритные отходы наклеивают специальные ярлыки, свидетельствующие об уплате налога за утилизацию. Для туристов японцы тоже нашли решение — урны с отверстиями специальной формы, подходящей для строго определенных отходов.

Если в Европе сортировка отходов уже является неотъемлемой частью повседневной жизни, то в России только подходят к этому этапу. В нашей стране совсем недавно начал интенсивно развиваться раздельный сбор твердых бытовых отходов среди населения [6]. С 1 января 2019 г. в Московской области и с 1 января 2020 г. в Москве введена система двухконтейнерного сбора отходов согласно следующему принципу:

- сухие и чистые отходы (или непищевые отходы), в которые входят пластик, бумага, стекло, металл;
- все органические, мокрые и грязные отходы (или так называемые смешанные отходы) — пищевые отходы, средства личной гигиены и т. д.

Сухие отходы должны складываться в синий бак, органические — в серый. Такие баки вывозят разные мусоровозы соответствующей расцветки. Отходы из синего бака (сухие отходы) на мусороперерабатывающем предприятии тщательно сортируют методом сепарации на металл, бумагу, стекло и пластик. В дальнейшем каждую фракцию ждет переработка.

Мокрые отходы следуют одному из двух вариантов: отправка на заводы по термообработке с минимизированным выбросом опасных и вредных газов в атмосферный воздух; размещение на закрытых ком-

постных площадках, где в дальнейшем с помощью специальных веществ отходы превращают в удобрение.

Хорошим примером участия жителей в поддержке раздельного сбора отходов служит несколько семей из г. Реутова, которые стали инициаторами экологической программы "TrashBack". Этот проект создан в целях приучения населения к раздельному сбору отходов, в результате чего оно сможет получать бонусы в виде скидки на оплату ЖКХ и т. п., а также служит улучшению экологической обстановки в городе. Суть проекта состоит не только в сортировке отходов на фракции, но и в маркировке пакетов специальным штрих-кодом и отслеживании их вплоть до мусороперерабатывающего завода.

Для удобства жителей, небезразличных к экологической ситуации, усугубившейся из-за отходов, Гринпис создал всероссийскую карту пунктов приема вторсырья [7]. Пример такой карты представлен на рис. 5. Вторсырье, которое можно сдать в данном пункте, обозначено на карте разными цветами, что значительно упрощает поиск пунктов приема отходов.



Рис. 5. Карта пунктов приема вторсырья Москвы

Сортировка отходов — важный этап на пути их сжигания, так как именно состав отходов определяет вредные вещества в отходящих дымовых газах. Отсутствие вредных веществ в отходах в процессе сжигания гарантирует качественный и чистый воздух.

Современные пути решения проблемы вовлечения отходов во вторичный оборот и минимизации отходов

Самый эффективный способ сокращения отходов — постараться их не создавать. Создание нового продукта требует много материалов и энергии: сырье необходимо добыть, продукт — изготовить и транспортировать. В результате самыми эффективными способами экономии природных ресурсов и защиты окружающей среды являются сокращение и повторное использование материалов. Именно поэтому необходимы современные и экологически безопасные решения в области обращения с отходами и в области создания продукции. Также недостаточно изученной является проблема оценки экологической

эффективности различных материалов с учетом их полного жизненного цикла, начиная со стадии сырья и заканчивая вторичной переработкой, хотя в этой области уже появились системные исследования, (см., например, [8—11]).

Одним из удачных примеров вторичного использования материалов является шведско-швейцарская транснациональная компания Tetra Pak, занимающаяся изготовлением упаковок для пищевых продуктов и упаковочного оборудования. Компания изготавливает упаковку, которая состоит из возобновляемых или переработанных материалов, пригодных для вторичного использования, что значительно снижает воздействие на окружающую среду [12]. Производство осуществляется при строгом соблюдении требований к безопасности продуктов питания. Компания следует принципу низкоуглеродного производства, снижая энергозатраты, а также увеличивая долю возобновляемого материала в упаковке, например заменяя полимеры на основе ископаемого топлива на биополимеры из сахарного тростника. Также расширяется ассортимент крышек и ламинирующих покрытий из биополимеров, чтобы еще больше снизить "углеродный след".

Исследования в этой области не только занимают много времени, но и требуют больших инвестиций. Поэтому многие фирмы не спешат использовать такие технологии в своем производстве и мало учитывают риск и ущерб, наносимые в ходе их деятельности.

Одним из самых распространенных загрязнителей являются пакеты. По статистике, представленной Гринпис, за год в мире используют более 500 млрд пластиковых пакетов, в частности в России — 26,5 млрд, что составляет 5 % от мирового потребления [7]. Такие пакеты имеют маленький срок службы, но являются одним из основных источников загрязнения, который разлагается в течение 700—1000 лет.

Уже около 80 стран мира отказались от пластиковых пакетов, а также запретили или регулируют их обращение экономическими механизмами в виде штрафов и налогов. Примером может послужить крупнейшая сеть супермаркетов Великобритании Tesco, которая еще в 2017 г. полностью отказалась от одноразовых пластиковых пакетов, предлагая покупателям многоразовые пакеты, состоящие на 80 % из переработанных материалов. Также во многих странах стимулируют покупателей использовать свои емкости для приобретения товаров, продавая их на развес.

Большой интерес представляют фандоматы — автоматы по приему вторсырья за деньги или другие бонусы. Чаще всего в качестве такого вторсырья выступают стеклянные и ПЭТ-бутылки, а также алюминиевые банки. В России первый фандомат был установлен в Москве в 2004 г. Фандоматы, в частности, можно встретить в сети магазинов "ВкусВилл". Фандомат быстро распознает упаковку или одновременно несколько упаковок, даже смятых, надежен и дешев в обслуживании. Помимо таких устройств существуют пункты по приему вторсырья за деньги. Данная система хорошо стимулирует население принимать участие в раздельном сборе отходов.

В ноябре 2020 г. на одном из московских мусоро-

перерабатывающих заводов начал свою работу роботизированный комплекс для сортировки мусора. Пока его работа ведется в экспериментальном режиме. Его тестированием занимается лаборатория инноваций столичного Департамента информационных технологий, которая была создана для координации проектов в сфере "умного города" в 2016 г. Благодаря тому что робот обладает технологией компьютерного зрения, он может распознавать различные типы отходов по внешнему виду, разделять отходы по типам или фракциям. Распознавание может идти по цветам, форме, материалу. Данная машина является самообучающейся, облегчает человеческий труд и повышает производительность сортировки мусора на 15 %.

Современная жизнь невозможна без инновационных технологий. Автоматическая сортировка мусора представляет собой пример того, как новшества приходят в сферу жилищно-коммунального хозяйства. Это позволяет наиболее полно и эффективно выделять ту часть отходов, которая подлежит вторичной переработке.

Преимущества переработки отходов следующие [13]:

- уменьшение количества отходов, отправляемых на полигоны и мусоросжигательные заводы;
- сохранение природных ресурсов, таких, как древесина, вода и полезные ископаемые;
- повышение экономической безопасности за счет использования внутренних источников сырья;
- предотвращение загрязнения окружающей среды путем уменьшения необходимости использовать новое сырье и затрачивать ресурсы на производство новой продукции;
- экономия энергии;
- поддержание производства и создание новых рабочих мест в перерабатывающей и обрабатывающей промышленности.

Заключение

Проблемы окружающей среды быстро прогрессируют. Иногда эти проблемы становятся непреодолимыми. Невозможно полностью изменить мир и его функциональные системы, но можно многое сделать для того, чтобы обратить вспять негативные аспекты в пределах нашей досягаемости. Переработка отходов дает прекрасную возможность принести пользу окружающей среде и ее обитателям, поскольку главными преимуществами переработки отходов являются снижение экологического вреда, наносимого окружающей среде, и предотвращение еще большего ущерба, который может возникнуть в ходе производства новой продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wendling Z. A., Emerson J. W., de Sherbinin A., Esty D. C., et al. Environmental Performance Index. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law & Policy [Электронный ресурс]. URL: <https://epi.yale.edu/downloads/epi2020report20210112.pdf> (дата обращения: 20.04.2021).
2. Кривошеин Д. А., Дмитренко В. П., Федотова Н. В. Си-

стемы защиты среды обитания. Т. 2. — М.: Академия, 2014. — 349 с.

3. Пинаев В. Е., Чернышев Д. А. Регулирование деятельности по обращению с отходами — опыт Европейского союза // Интернет-журнал "Науковедение". 2014. № 4(23). 2014. С. 1—12.

4. Анисимов А. П. Развитие экологического законодательства в США: проблемы и перспективы // Изв. Саратов. ун-та. Новая серия. Сер. "Экономика. Управление. Право". 2020. Т. 20. Вып. 3. С. 301—309.

5. Преликова Е. А., Юшин В. В., Вертакова Ю. В. Эколого-экономические приоритеты раздельного сбора отходов // Лесотехнический журнал. 2019. № 1(33). С. 187—195.

6. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Стратегия оптимизации комплексного управления твердыми бытовыми отходами в Российской Федерации // Экология промышленного производства. 2017. № 4. С. 16—25.

7. Faraca G., Astrup T. Plastic waste from recycling centres: Characterisation and evaluation of plastic recyclability // Waste Management. 2019. V. 95. P. 388—398.

8. Sorokin A. E., Bulychov S. N., Gorbachev S. I. Environmental impact of paints in high-tech production // Russian Engineering Research. 2019. V. 39. № 9. P. 816—819.

9. Sorokin A. E., Bulychov S. N., Gorbachev S. I. Environmental impact of structural metals // Russian Engineering Research. 2020. V. 40. № 2. P. 149—151.

10. Sorokin A. E., Bulychov S. N., Gorbachev S. I. Environmental impact of polymer composites // Russian Engineering Research. 2021. V. 41. № 1. P. 53—55.

11. Горбачев С. И., Сорокин А. Е., Булычев С. Н. Оценка техносферной безопасности изделий с учетом полного жизненного цикла материалов // СТИН. 2021. № 5. С. 34—37.

12. Ma Y. Changing Tetra Pak: from waste to resource // Science Progress. 2018. V. 101(2). P. 161—170.

13. Кривошеин Д. А., Дмитренко В. П., Федотова Н. В. Основы экологической безопасности производств. — СПб.: Лань, 2015. — 336 с.

Modern ways of solving the problem of waste management in different countries

N. V. GORKOVA, S. N. BULYCHEV

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

The article analyzes in detail the system of waste management in different countries. The main stages of waste processing, where special attention is paid to the initial sorting of waste, are considered. The programs of separate collection of solid waste in Russia are described. Modern ways of solving the problems of waste minimization and recycling are analyzed.

Keywords: waste generation, waste recycling, waste management, municipal solid waste, sorting, recycling, utilization.

Bibliography — 13 references.

Received April 27, 2021

УДК 504.064.47:628.475.3-7:533.9.15

DOI: 10.52190/2073-2589_2021_2_7

Плазменная переработка смеси коммунальных, полимерных и медицинских отходов: технико-экономический анализ

А. В. АРТЕМОВ, д-р хим. наук; А. В. ПЕРЕСЛАВЦЕВ, канд. техн. наук;
С. А. ВОЩИНИН; С. С. ТРЕСВЯТСКИЙ; С. В. КОРОБЦЕВ, канд. физ.-мат. наук
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

Приведены данные о переработке твердых коммунальных отходов, отходов полимерных материалов, медицинских отходов и смесей отходов в высокотемпературном плазменном конвертере (ВТПК). Приведена принципиальная технологическая схема комплекса ВТПК, предусматривающая получение базальтоподобного шлака, электрической и тепловой энергии. Выполнен расчет основных технико-экономических показателей работы комплекса ВТПК. Получена математическая модель процесса, учитывающая влияние морфологического состава отходов на экономические показатели.

Ключевые слова: переработка медицинских отходов, отходов полимерных материалов, твердых коммунальных отходов, плазменные технологии, технико-экономические расчеты, оптимизация.

Статья является продолжением работ, опубликованных в 2010—2020 гг. и затрагивающих технологию и экономику плазменной переработки различных типов отходов (твердых, жидких и газообразных углеводородов [1], отработанных автомобильных покрышек [2], тяжелых нефтяных остатков [2], нефтесодержащих отходов [3], стеклосодержащих отходов [4], иловых отходов [5, 6]), и касается переработки смеси твердых коммунальных отходов (ТКО), отходов полимерных материалов (ОПМ) и медицинских отходов (МО).

Выбор такого морфологического состава смеси отходов обусловлен несколькими причинами:

- ограничением минимальной производительности комплекса ВТПК по отходам в 12,5 тыс. т/год;
- максимальным количеством МО в одном лечебно-профилактическом учреждении, не превышающим 1,5—2,0 тыс. т/год, и необходимостью перерабатывать токсичные МО в смеси с другими типами нетоксичных отходов, к которым прежде всего относятся ТКО и ОПМ;

- необходимостью быстрой детоксикации МО, особенно в период эпидемий/пандемий, подобных COVID-19;

- отсутствием каких-либо ограничений на объеме переработки ТКО и большим количеством несортированных ТКО, скапливающихся в местах компактного проживания.

Результаты и их обсуждение

Для анализа был выбран наиболее простой вариант работы комплекса ВТПК, который предусматривает получение в качестве товарной продукции только электроэнергии, тепловой энергии (пар, горячая вода) и базальтоподобного шлака. Принципиальная схема этого варианта комплекса ВТПК показана на рис. 1.

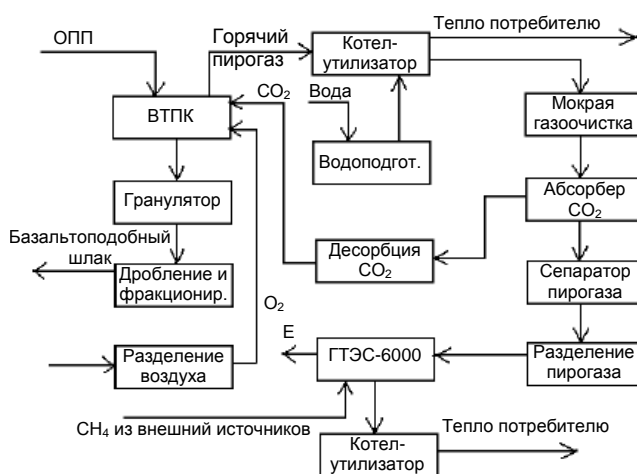


Рис. 1. Принципиальная схема варианта комплекса ВТПК

Артемьев Арсений Валерьевич, профессор, ведущий научный сотрудник.
E-mail: arsenyart@mail.ru

Переславцев Александр Васильевич, начальник лаборатории.
E-mail: pereslavltsav@nrcki.ru

Вощинин Сергей Александрович, главный специалист.
E-mail: vossergey@gmail.com

Тресвятский Сергей Сергеевич, начальник группы.
E-mail: arsenyart@mail.ru

Коробцев Сергей Владимирович, заместитель руководителя ККФХТ по научной работе.
E-mail: korobtsev_sv@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 16 марта 2021 г.

© Артемьев А. В., Переславцев А. В., Вощинин С. А., Тресвятский С. С., Коробцев С. В., 2021

Преимуществом данной технологии перед традиционным сжиганием отходов является практически полное извлечение CO_2 из пирогаза и повторное его использование в качестве плазмообразующего газа. Кроме того, температурный режим и конструктивные особенности комплекса ВТПК практически исключают возможность образования дибензодиоксинов и дибензофуранов в ходе процесса. Состав перерабатываемых отходов (ОПМ, МО и ТКО) приведен в табл. 1. Сравнительный технико-экономический анализ проводили для постоянной годовой производительности комплекса ВТПК по отходам в 25 000 тыс. т. (3357,5 кг/ч с учётом реального времени эксплуатации 7466 ч/год). На выход и состав пирогаза, получаемого в результате высокотемпературной плазменной конверсии в ВТПК, а следовательно, и на калорийность пирогаза и энергетические показатели работы комплекса в целом основное влияние оказывают состав перерабатываемых отходов и количество кислородного дутья в зону пиролиза ВТПК.

Таблица 1

Состав перерабатываемых отходов

Отходы	Состав, масс. %							
	С	Н	О	N	S	H ₂ O	Стекло	Зола
ТКО	34,84	3,38	28,45	0,15	0,14	14,87	15,45	2,71
ОПМ	51,10	7,89	27,70	0,21	0,49	8,74	—	3,86
МО	29,43	4,20	29,43	0,13	0,20	16,18	20,22	0,21

В качестве плазмообразующего (рабочего) газа могут быть использованы диоксид углерода, кислород, воздух, водяной пар или их смеси. В настоящей работе в качестве плазмообразующего газа использован диоксид углерода. Плазменная технология переработки предусматривает дополнительное кислородное дутьё для полного окисления неорганических компонентов сырья и связывания образующихся оксидов превращения в базальтоподобном шлаке. Для анализа были разработаны алгоритм и программа расчета основных технико-экономических показателей процесса [3]. Основными исходными данными для расчета являлись:

- морфологический и элементный состав перерабатываемых отходов;
- производительность плазменного конвертера по отходам и их общее количество в перерабатывающем комплексе;
- состав и количество плазмообразующего газа;
- состав и количество дополнительного дутья в плазменный конвертер;
- количество плазмотронов в плавильной камере одного плазменного конвертера;
- параметры энергоблока (количество котлов-утилизаторов для утилизации тепла пирогаза, отводимого из ВТПК; количество ГТЭС и их модели; количество и мощность газовых турбин и т. д.).

Результаты расчетов приведены далее.

Комплекс ВТПК состоял из двух типовых унитарных конвертеров производительностью 12500 т/год по отходам каждый. Унитарный конвертер был оборудован 4 плазмотронами с номинальной электрической

мощностью $E_n = 600$ кВт. Реализуемая плазмотроном мощность зависит от количества дополнительного дутья кислорода в зону пиролиза ВТПК. Поэтому на первом этапе анализа был проведен расчет оптимального количества дополнительного дутья кислорода $\text{O}_2^{\text{оп}}$ в зону пиролиза ВТПК, обеспечивающего номинальную электрическую мощность плазмотрона (с учетом 10%-го запаса по мощности) $E_n = 540$ кВт. Этой номинальной электрической мощности при переработке ОПМ соответствует значение $\text{O}_2^{\text{оп}} = 238$ кг O_2 на 1 т ОПМ. Результаты расчета приведены на рис. 2.

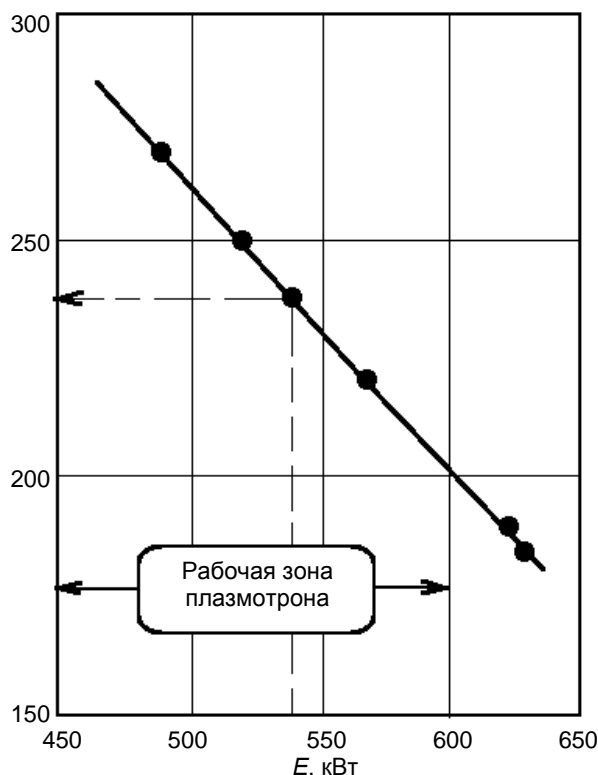
Дополнительное дутьё кислорода в зону пиролиза, кг O_2 на 1 т отходов

Рис. 2. Зависимость электрической мощности плазмотрона от дополнительного дутья в зону пиролиза ВТПК. Отходы: ОПМ (100 %)

Все дальнейшие расчеты плазменной переработки различных отходов проводили для условий оптимального количества кислородного дутья в зону пиролиза ВТПК, обеспечивающего номинальную электрическую мощность одного плазмотрона $E_n = 540$ кВт.

По результатам расчета для переработки 100 % ОПМ в пределах рабочей зоны плазмотрона $E_n < 600$ кВт можно сделать следующие выводы:

- увеличение E_n в интервале 520—570 кВт приводит к уменьшению требуемого потока плазмообразующего газа (CO_2) с 1900 до 1800 кг/ч;
- количество образующегося синтез-газа остается на практически постоянном уровне и составляет 3650—3700 кг/ч;
- степень замещения природного газа синтез-газом остается на практически постоянном уровне (24—25 %);

- с использованием ОПМ для внешних потребителей может быть выработано 124—129 МВт·ч/год электроэнергии, около 370 тыс. Гкал/год тепловой энергии и 934 т/год базальтоподобного шлака;

- основными экономическими показателями являются:

- затраты на строительство комплекса (около 4,2 млрд руб.);
- простой срок окупаемости (около 7,4 г.);
- чистая прибыль (около 290 млн руб./год);
- EBITDA (около 49 %);
- рентабельность (около 24 %);

- в составе газа в основном присутствуют пять компонентов (кг/ч): CO — около 2900; H₂ — 120—125; CH₄ — 560—600; H₂O — 280—380; CO₂ — 1100—1200.

В табл. 2 приведены результаты расчета процесса плазменной переработки ОПМ, ТКО и МО при оптимальном количестве дополнительного дутья кислорода в зону пиролиза ВТПК. Как видно из этих данных, для переработки ОПМ требуется значительно большее количество плазмообразующего газа и дополнительного дутья кислорода в зону пиролиза ВТПКУ по сравнению с переработкой ТКО и МО в тех же условиях. Использование ОПМ приводит к суще-

ственно большей выработке синтез-газа и значительно большей (в 2—3 раза) степени замещения природного газа синтез-газом при практически одинаковой выработке на продажу тепловой и электрической энергии. Наоборот, использование ТКО и МО вместо ОПМ приводит к большему в 2—5 раз получению базальтоподобного шлака. Что же касается экономических показателей работы комплекса ВТПК, то при практически одинаковых затратах на строительство наименьший срок его окупаемости имеет место в случае переработки МО (3,9 г.), наибольший — при переработке ТКО (11,63 г.), промежуточный (7,42 г.) — в случае переработки ОПМ. Аналогично ОПМ имеют промежуточные между МО и ТКО значения других экономических показателей. Значительные различия в содержании основных компонентов пирогаза связаны в основном с различным элементарным составом перерабатываемых отходов (см. табл. 1).

Помимо технико-экономического анализа плазменной переработки ОПМ, ТКО и МО представляла определенный интерес оценка этих же показателей для переработки смеси отходов: ОПМ + ТКО (табл. 3) и ОПМ + МО (табл. 4).

Таблица 2

Результаты расчета процесса плазменной переработки ОПМ, ТКО и МО при оптимальном количестве дополнительного дутья кислорода в зону пиролиза

Показатель	Перерабатываемые отходы		
	ОПМ — 100 %	ТКО — 100 %	МО — 100 %
1. Поток плазмообразующего газа (CO ₂), кг/ч	1859	1573	1533
2. O ₂ ^{оп} , кг O ₂ на 1 т отходов	238	153	141
3. Электр. мощность 1 плазмотрона, кВт	539,4	539,9	539,5
4. Количество синтез-газа, кг/ч	3682	1409	2142
5. Степ. замещения природ. газа синтез-газом, %	24,71	7,44	11,84
6. Электроэнергия на продажу, МВт·ч/год	125427	125395	125422
7. Тепловая энергия на продажу, Гкал/год	369586	367466	365698
8. Базальтоподобный шлак на продажу, т/год	934	2427	4940
9. Основные экономические показатели			
9.1. Затраты на строительство комплекса, млрд руб.	4,236	4,275	4,265
9.2. Простой срок окупаемости, лет	7,42	11,63	3,90
9.3. Чистая прибыль, млн руб./год	290,33	154,97	662,01
9.4. EBITDA, %	35,80	30,05	60,31
9.5. Рентабельность, %	28,64	16,19	41,60
10. Содержание компонентов в пирогазе, кг/ч			
10.1. CO	2902	1232	1828
10.2. H ₂	124	94	81
10.3. CH ₄	585	—	156
10.4. H ₂ O	320	1590	794
10.5. CO ₂	1133	1681	1335

Таблица 3

Результаты расчета процесса плазменной переработки смеси ОПМ + ТКО при оптимальном количестве дополнительного дутья кислорода в зону пиролиза

Показатель	Содержание ОПМ в смеси с ТКО, %		
	25	50	75
1. Поток плазмообразующего газа (CO ₂), кг/ч	1644	1714	1785
2. O ₂ ^{оп} , кг O ₂ на 1 т отходов	174	195	216
3. Электр. мощность 1 плазмотрона, кВт	540,2	540,5	540,8
4. Количество синтез-газа, кг/ч	1977	2546	3115
5. Степ. замещения природ. газа синтез-газом, %	11,76	16,08	20,41
6. Электроэнергия на продажу, МВт·ч/год	125377	125360	125342
7. Тепловая энергия на продажу, Гкал/год	367995	368524	369052
8. Базальтоподобный шлак на продажу, т/год	2054	1680	1307
9. Основные экономические показатели			
9.1. Затраты на строительство комплекса, млрд руб.	4,265	4,255	4,246
9.2. Простой срок окупаемости, лет	10,17	9,06	8,17
9.3. Чистая прибыль, млн руб./год	169,27	210,18	250,97
9.4. EBITDA, %	35,22	40,05	44,56
9.5. Рентабельность, %	17,43	21,33	25,11
10. Содержание компонентов в пирогазе, кг/ч			
10.1. CO	1650	2068	2485
10.2. H ₂	101	109	116
10.3. CH ₄	134	285	435
10.4. H ₂ O	1272	954	636
10.5. CO ₂	1543	1406	1268

Таблица 4

Результаты расчета процесса плазменной переработки смеси ОПМ + МО при оптимальном количестве дополнительного дутья кислорода в зону пиролиза

Показатель	Содержание ОПМ в смеси с МО, %		
	25	50	75
1. Поток плазмообразующего газа (CO ₂), кг/ч	1614	1694	1775
2. O ₂ ^{оп} , кг O ₂ на 1 т отходов	165	189	213
3. Электр. мощность 1 плазмотрона, кВт	539,9	540,3	540,7
4. Количество синтез-газа, кг/ч	2527	2913	3298
5. Степ. замещения природ. газа синтез-газом, %	15,06	18,28	21,51
6. Электроэнергия на продажу, МВт·ч/год	125398	125373	125349
7. Тепловая энергия на продажу, Гкал/год	366669	367639	368610
8. Базальтоподобный шлак на продажу, т/год	3938	2937	1936
9. Основные экономические показатели			
9.1. Затраты на строительство комплекса, млрд руб.	4,258	4,251	4,244
9.2. Простой срок окупаемости, лет	4,45	5,16	6,10
9.3. Чистая прибыль, млн руб./год	570,35	477,8	384,45
9.4. EBITDA, %	58,40	55,98	52,86
9.5. Рентабельность, %	49,27	45,86	41,50
10. Содержание компонентов в пирогазе, кг/ч			
10.1. CO	2097	2365	2634
10.2. H ₂	92	103	113
10.3. CH ₄	263	371	478
10.4. H ₂ O	675	556	437
10.5. CO ₂	1284	1232	1181

При увеличении содержания ОПМ в смеси с ТКО с 25 до 75 % (табл. 3) возрастают поток плазмообразующего газа (на 8,6 %) и оптимальное количество O_2 , требуемое для переработки 1 т отходов (на 24,1 %). Значительно возрастают количество образующегося синтез-газа (на 57,6 %) и степень замещения природного газа синтез-газом (на 73,6 %). При этом выработка электрической и тепловой энергии на продажу остается практически на одном уровне ((125360 ± 17) МВт·ч/год и (368524 ± 529) Гкал/год соответственно).

При стоимости комплекса $(4,255 \pm 0,01)$ млрд руб. с увеличением содержания ОПМ в смеси с ТКО все экономические показатели улучшаются: сокращается на два года срок окупаемости, возрастают прибыль и рентабельность. Помимо увеличения количества синтез-газа изменяется его состав: возрастает доля CO , H_2 и CH_4 и снижается доля H_2O и CO_2 . Данные табл. 3 показывают предпочтительное ведение плазменной переработки при повышенном содержании ОПМ в смеси с ТКО.

По сравнению со смесью ОПМ + ТКО проведение плазменной переработки смеси ОПМ + МО приводит в ряде случаев к лучшим показателям (табл. 4). При этом сохраняется такая же, как и для смеси ОПМ + ТКО, тенденция изменения технологических параметров при увеличении содержания ОПМ в смеси с МО с 25 до 75 %:

- возрастает поток плазмообразующего газа (на 10 %);
- возрастает оптимальное количество O_2 , требуемого для переработки 1 т отходов (на 32,7 %);
- возрастает количество образующегося синтез-газа (на 30,5 %);
- возрастает степень замещения природного газа синтез-газом (на 42,8 %);
- выработка электрической и тепловой энергии на продажу остается практически постоянной ((125373 ± 25) МВт·ч/год и (367639 ± 971) Гкал/год соответственно);
- количество производимого базальтового шлака снижается более чем в 2 раза.

Увеличение доли ОПМ в смеси с МО приводит к ухудшению экономических показателей: возрастает срок окупаемости, снижаются прибыль и рентабельность. При этом, так же как и для смеси ОПМ + ТКО, возрастает доля CO , H_2 и CH_4 и снижается доля H_2O и CO_2 . Данные табл. 4 показывают предпочтительное ведение плазменной переработки при повышенном содержании МО в смеси с ОПМ.

Влияние морфологического состава перерабатываемых отходов на состав пирогаза необходимо учитывать при дальнейшей переработке пирогаза в синтез-газ и получении углеводородных компонентов по методу Фишера—Тропша либо при выделении из пирогаза водорода.

Как уже было показано, значительное влияние морфологического состава отходов на технологические и экономические показатели процесса ставит задачу выбора состава сырья, обеспечивающего наиболее приемлемые показатели работы комплекса. С этой целью проведено специальное исследование. Полагалось, что комплекс ВТПК перерабатывает только три вида отходов: МО, ОПМ и ТКО. МО и ОПМ

имеют ограничения по объемам переработки из-за ограниченного числа источников этих отходов. ТКО таких ограничений не имеет. Расчеты проводили для суммарной годовой производительности комплекса ВТПК по отходам 25 тыс. т/год. Исследование выполняли с использованием статистических методов [7]. Расчеты проводили для технологической схемы работы комплекса ВТПК, приведенной на рис. 1. Целью исследования являлось нахождение зависимости чистой прибыли y ("функция отклика") от морфологического состава перерабатываемых отходов с использованием реализованной ранее программы и алгоритма, включающего расчеты:

- элементного состава перерабатываемых отходов;
- $O_2^{оп}$ при фиксированном значении E_n , обеспечивающем оптимальную работу плазмотрона;
- технико-экономических показателей процесса, в том числе и функции отклика.

При проведении исследования использовали ротативный центральный композиционный план второго порядка для двух независимых переменных: $x_1(X_1)$ и $x_2(X_2)$ — кодированное (натуральное) содержание (%) ОПМ и МО соответственно. Содержание ТКО в смеси ОПМ + МО + ТКО не является независимым и определяется как $TKO = 100 - (МО + ОПМ)$. Матрица этого плана и значения функции отклика $y_{оп}$ приведены в табл. 5. Обработку данных табл. 5 проводили в строгом соответствии с алгоритмом, описаны в [7]. По результатам этой обработки получено уравнение

$$y = 358,6 + 23,713 x_1 + 75,438 x_2 - 0,1 x_1 x_2$$

и определены расчетные значения величины y ($y_{рас}$; см. табл. 5).

Таблица 5

Матрица планирования

№ опыта	x_0	x_1	X_1	x_2	X_2	$y_{оп}$	$y_{рас}$
1	+1	-1	19	-1	19	259,6	259,3
2	+1	+1	47	-1	19	307,0	307,0
3	+1	-1	19	+1	47	409,9	410,4
4	+1	+1	47	+1	47	456,9	457,7
5	+1	-1,414	13	0	33	324,4	325,1
6	+1	+1,414	53	0	33	391,8	392,1
7	+1	0	33	-1,414	13	251,3	251,9
8	+1	0	33	+1,414	53	465,8	465,3
9	+1	0	33	0	33	358,6	358,6
10	+1	0	33	0	33	358,2	358,6
11	+1	0	33	0	33	359,0	358,6
12	+1	0	33	0	33	357,8	358,6
13	+1	0	33	0	33	359,3	358,6

Полученное уравнение адекватно описывает данные табл. 5 ($F_{оп} = 1,001 < F_{таб} = 4,1$). Графический вид полученной зависимости приведен на рис. 3. Он позволяет оценить прибыль комплекса при переработке отходов с различным содержанием ТКО, ОПМ и МО. Применяя аналогичный подход, можно получить зависимость и других экономических и технологических показателей от морфологического состава перерабатываемых отходов.

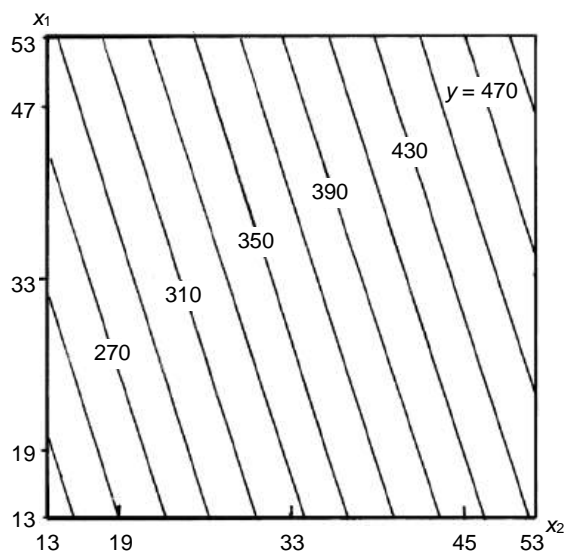


Рис. 3. Зависимость максимальной чистой прибыли функционирования комплекса (y , млн руб.) при переработке смеси ТКО + ОПМ + МО от содержания ОПМ (x_1 , %) и МО (x_2 , %)

Заключение

Проведенные расчеты показывают возможность и перспективность использования плазменных технологий для переработки смеси отходов. Основные преимущества использования плазменных технологий заключаются в следующем:

- полная переработка отходов с выработкой полезной и реализуемой продукции в виде электрической и тепловой энергии и сырья для производства базальтовых волокон (базальтоподобный шлак);
- отсутствие токсичных выбросов, включая дибензодиоксины и дибензофураны;

- окупаемость произведенных затрат;
- возможность оптимизации процесса с получением максимальной прибыли при заданном морфологическом составе перерабатываемых отходов.

Работа выполнена в рамках внутренней субсидии НИЦ "Курчатовский институт" № 1569 "Развитие гетерогенных плазменно-пучковых технологий для объемной модификации и создания новых материалов, экологически чистой энергетики и переработки отходов".

ЛИТЕРАТУРА

1. Артемов А. В., Бульба В. А., Вошинин С. А. и др. Каталитические процессы превращения газообразных продуктов плазменной переработки твердых отходов и углеводородного сырья // Российский химический журнал. 2010. Т. 54. № 6. С. 9—18.
2. Артемов А. В., Бульба В. А., Вошинин С. А. и др. Технико-экономические показатели работы высокотемпературного плазменного конвертера для утилизации отходов производства и потребления (расчетные данные и их анализ) // Российский химический журнал. 2010. Т. 54. № 6. С. 26—32.
3. Артемов А. В., Переславцев А. В., Вошинин С. А., Кулыгин В. М. Плазменная переработка нефтесодержащих отходов: технико-экономический анализ // Химическая безопасность. 2017. Т. 1. № 2. С. 184—197.
4. Артемов А. В., Вошинин С. А., Переславцев А. В. и др. Перспективные аспекты плазменной переработки стеклосодержащих отходов // Твердые бытовые отходы. 2018. № 3. С. 33—37.
5. Артемов А. В., Переславцев А. В., Вошинин С. А. и др. Плазменные технологии переработки иловых отходов // Твердые бытовые отходы. 2019. № 1. С. 18—22.
6. Артемов А. В., Переславцев А. В., Вошинин С. А. и др. Переработка отходов байкальского целлюлозно-бумажного комбината с использованием плазменных технологий: технико-экономический анализ // Вода: химия и экология. 2019. № 10—12. С. 114—119.
7. Лебедев Н. Н., Манаков М. Н., Швец В. Ф. Теория технологических процессов основного органического и нефтехимического синтеза. — М.: Химия, 1975. — 478 с.

The Treatment of Medicine, Polymeric and Solid Wastes by Using of Plasma Technologies: Technical and Economic Analysis

A. V. ARTEMOV, A. V. PERESLAVTSEV, S. A. VOSHCHININ, S. S. TRESVYATSKII, S. V. KOROBTSSEV

National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

The data on medicine, polymeric and solid wastes the using of plasma facilities technology of High-Temperature Plasma Converter (HTPC) are presented. The basic technological scheme of the HTPC facilities with producing basalt-like slag, electric and thermal energy is presented. The calculation of the basic technical and economic parameters of HTPC plasma facility is performed by the using of specially developed program and mathematic model including morphological parameters of wastes are selected.

Keywords: treatment medicine, polymeric and solid wastes, plasma facilities technology, technical and economic analysis, optimization.

Bibliography — 7 references.

Received March 16, 2021

УДК 678

DOI: 10.52190/2073-2589_2021_2_13

Влияние кирпичного боя на свойства облицовочного композиционного материала на основе вторичного полимерного связующего

А. С. УВАРОВА; И. А. ВИТКАЛОВА; Е. С. ПИКАЛОВ, канд. техн. наук;
О. Г. СЕЛИВАНОВ

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

Представлена полученная в результате экспериментальных исследований зависимость основных свойств композиционного материала строительного назначения от количества кирпичного боя, являющегося наполнителем в составе сырьевой смеси. По представленной зависимости установлено количество кирпичного боя, позволяющее получить максимально возможную для данного материала прочность.

Ключевые слова: кирпичный бой, полимерные отходы, утилизация отходов, полимерный композиционный материал, облицовочный материал, растворение полимеров, метиленхлорид.

Решение проблемы образования и накопления отходов является одной из основных задач развития современного общества и производства. Наиболее простое решение этой задачи — методы захоронения и сжигания отходов [1, 2]. Однако в результате захоронения происходит деградация территорий и сохраняется возможность контакта окружающей среды с отходами, а при сжигании образуются продукты горения различной степени токсичности и остается несгораемый остаток. Перспективным решением проблемы образования и накопления отходов является утилизация с возможностью получения вторичных ресурсов и их использования в разных производственных процессах. Утилизация отходов не только позволяет уменьшить их количество, но и обеспечивает экономию первичных ресурсов, что снижает себестоимость производственных процессов и способствует рациональному природопользованию. В связи с этим развитие существующих и разработка новых технологий утилизации отходов являются актуальной задачей [1, 3, 4].

Основными целями развития технологий утилизации являются возможность переработки больших объемов отходов, комплексная переработка раз-

родных отходов, применение отходов в качестве функциональных добавок, экологическая безопасность процессов и продуктов переработки, простота реализации и низкая энергоемкость применяемых технологий. В наибольшей степени перечисленные цели могут быть достигнуты при использовании отходов в качестве сырья для производства материалов и изделий строительного назначения [2, 5, 6].

При выборе технологий по их утилизации отходов следует учитывать крупнотоннажность отходов и темпы их образования, наличие в составе отходов ценных для производства компонентов, востребованность отходов в других производственных процессах, степень опасности отходов для окружающей среды, сложность и энергоемкость подготовки и переработки отходов, совместимость отходов с другими сырьевыми компонентами и их влияние на свойства получаемых материалов и изделий.

Авторы данной работы ранее проводили разработки по получению композиционных материалов строительного назначения, в которых в качестве наполнителей применяли различные крупнотоннажные и маловостребованные отходы, а для получения связующих использовали полимерные отходы [7–9]. В одной из работ была исследована возможность получения облицовочного материала, в котором наполнителем являлся мелкодисперсный кирпичный бой, а связующее было получено путем растворения отходов изделий из пенополистирола в метиленхлориде [10].

Цель данной работы — исследование зависимости свойств облицовочного композиционного материала от содержания кирпичного боя в составе сырьевой смеси и определение количества данного компонента, обеспечивающего высокие эксплуатационные характеристики разрабатываемого материала.

Уварова Анастасия Сергеевна, магистрант кафедры "Химия".
E-mail: astorlova@mail.ru

Виткалова Ирина Андреевна, магистрант кафедры "Химия".
E-mail: scream7687@yandex.ru

Пикалов Евгений Сергеевич, доцент кафедры "Химические технологии".
E-mail: evgeniy-pikalov@mail.ru

Селиванов Олег Григорьевич, инженер-исследователь кафедры "Биология и экология".
E-mail: selivanov6003@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18 декабря 2020 г.

© Уварова А. С., Виткалова И. А., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г., 2021

Сырьевые материалы и методы исследования

Для получения наполнителя использовали бой рядового одинарного полнотелого керамического кирпича, который получали в результате сбора кирпичных отходов из различных источников. Применение кирпичного боя, с одной стороны, обосновано большими объемами его образования в результате производства и транспортировки кирпича, строительства и ремонта зданий и сооружений из кирпича. В то же время объемы утилизации кирпичного боя в дорожно-строительных работах, в качестве дренажного материала и компонента сырьевых смесей в производстве строительных материалов значительно ниже, чем объемы его образования [10–12]. С другой стороны, кирпичный бой обеспечивает твердость, прочность, снижение усадки и горючести при хорошей адгезии с полимерными связующими [8, 10]. Перед использованием кирпичный бой измельчали с отбором фракции с размером частиц не более 0,63 мм, смешивали фракции из разных источников для усреднения состава и высушивали до постоянной массы.

Для получения связующего использовали отходы изделий из пенополистирола, в частности отработанные элементы упаковки бытовой техники, оборудования и т. п., отобранные из общей массы отходов потребления. Применение данных отходов связано с высокими темпами и объемами их накопления при их малой плотности, экономической невыгодности рекуперации из-за низкой стоимости производства данного полимера из первичного сырья, а также наличии примесей и частичной деструкции, характерных для полимерных отходов потребления и снижающих качество полимерных изделий, которые получают при их утилизации. При этом использование полистирола как связующего для получения композиционных материалов позволяет повысить их прочность и снизить водопоглощение [8, 13, 14]. Перед использованием отходы пенополистирола измельчали до размера частиц не более 6 см, усредняли по составу и высушивали до постоянной массы.

Для растворения полимерных отходов с получением раствора связующего применяли технический метиленхлорид первого сорта по ГОСТ 9968-86 с содержанием основного вещества не менее 98,8 масс. %. Выбор метиленхлорида связан с высокой проникающей способностью данного растворителя, позволяющей быстро растворять полимерные отходы, высокой летучестью, облегчающей его удаление из материала, а также низкой токсичностью (4-й класс опасности), пониженной горючестью, высокой распространенностью и низкой стоимостью по сравнению с другими растворителями. Растворение полимеров в отличие от плавления позволяет проводить холодные перемешивание и прессование, а также дает возможность исключить термодеструкцию полимера, так как температура кипения метиленхлорида (39,6 °C) значительно ниже температуры начала термодеструкции полистирола (около 200 °C).

Потери растворителя при улетучивании можно свести к минимуму за счет герметизации оборудования и конденсации образующихся паров для повторного использования [8, 9, 13].

Для получения образцов исследуемого композиционного материала подготовленные отходы пенополистирола растворяли в метиленхлориде при соотношении полимер / связующее = 1 / 1,4, которое обеспечивает быстрое растворение полимерных отходов с получением оптимальной для переработки вязкости [10]. Раствор связующего перемешивали с подготовленным наполнителем в заданных соотношениях до получения однородной сырьевой смеси, из которой одноступенчатым холодным прессованием при давлении 8 МПа формовали образцы с последующей термообработкой при температуре 45–50 °C с выдержкой в течение 45 мин для испарения растворителя. Образцы по каждому из исследуемых составов сырьевой смеси изготавливали сериями по пять образцов с последующим определением средних арифметических значений исследуемых свойств.

У полученных образцов по стандартным для материалов строительного назначения методикам определяли плотность (ρ , кг/м³), водопоглощение (B , %), общую ($P_{об}$, %), открытую ($P_{от}$, %) и закрытую ($P_{зак}$, %) пористости, прочность на сжатие ($\sigma_{сжат}$, МПа) и изгиб ($\sigma_{изг}$, МПа), морозостойкость (M , циклы) и теплопроводность (λ , Вт/(м·°C)).

Результаты экспериментов и их обсуждение

В результате проведения экспериментов установлено, что плотность и водопоглощение получаемого композиционного материала повышаются с увеличением количества кирпичного боя в составе сырьевой смеси (рис. 1).

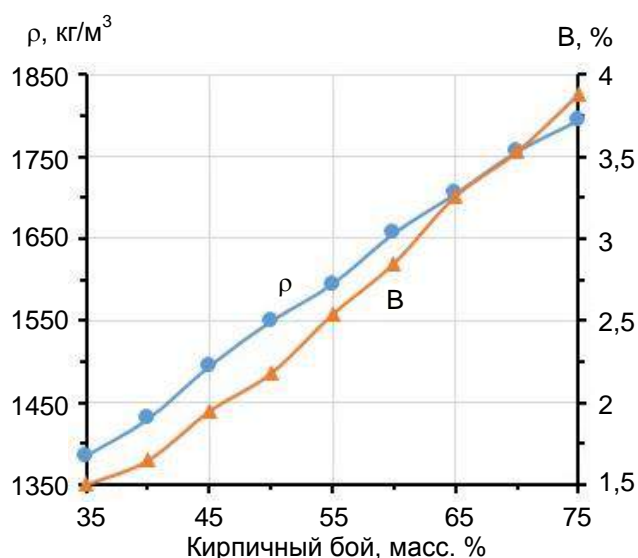


Рис. 1. Зависимость плотности и водопоглощения композиционного материала от содержания кирпичного боя в составе сырьевой смеси

Такой характер зависимости для плотности связан с тем, что средняя плотность кирпичного боя (1600—1900 кг/м³) выше средней плотности полистирола (1040—1060 кг/м³). Повышение водопоглощения материала связано с тем, что увеличение количества кирпичного боя приводит к повышению открытой пористости материала (рис. 2).

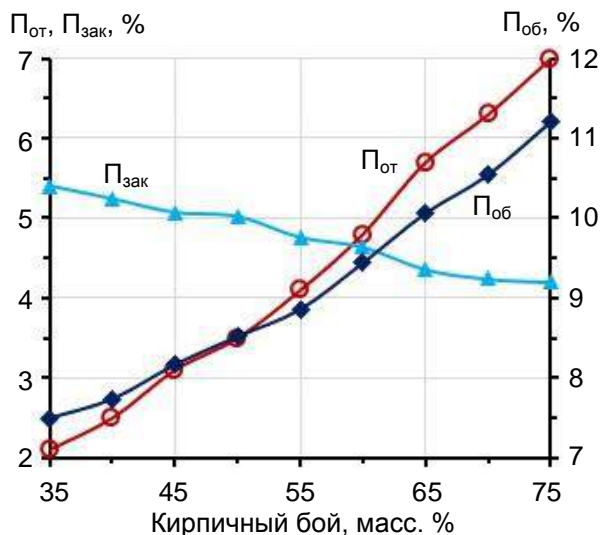


Рис. 2. Зависимость пористости композиционного материала от содержания кирпичного боя в составе сырьевой смеси

Повышение пористости можно объяснить неидеальной адгезией связующего и наполнителя, а также неправильной формой частиц наполнителя, что способствует образованию пор в местах контакта полистирола с поверхностью частиц кирпичного боя. Формированию открытой пористости также способствует процесс кипения и улетучивания растворителя. В то же время из рис. 2 видно, что повышение количества кирпичного боя в составе сырьевой смеси приводит к снижению закрытой пористости при росте общей пористости. Это объясняется уменьшением количества связующего относительно количества наполнителя, так как при достаточном содержании связующего не только заполняет часть пор в объеме материала, но и переводит открытые поры в закрытые.

Из рис. 3 видно, что содержание кирпичного боя, обеспечивающее достаточное количество связующего в объеме материала, составляет от 35 до 50 масс. % от количества сырьевой смеси. В таком случае связующего достаточно для того, чтобы соединить частицы наполнителя в прочный каркас, наличие которого проявляется в повышении прочности на сжатие и изгиб. При содержании кирпичного боя свыше 50 масс. % от количества сырьевой смеси прочность материала начинает снижаться из-за недостатка связующего, что приводит к снижению площади контакта между полистиролом и кирпичным боем, уменьшению толщины слоя связующего между частицами наполнителя. При недостатке связующего также происходит рост числа частиц, не связанных между собой, что проявляется в осыпании граней образцов.

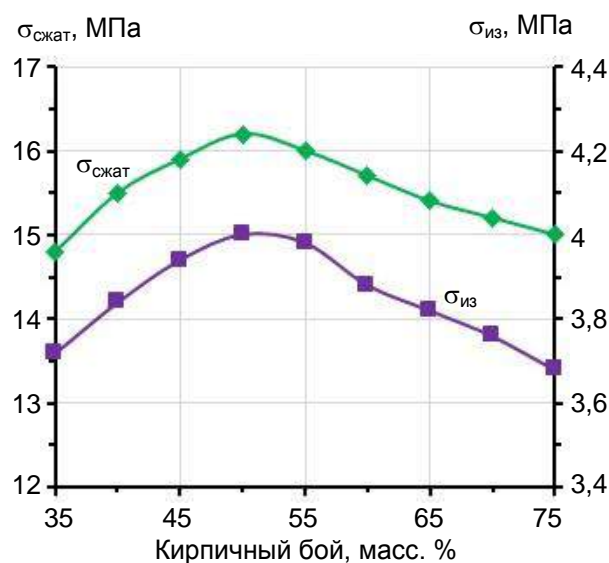


Рис. 3. Зависимость прочности на сжатие и изгиб композиционного материала от содержания кирпичного боя в составе сырьевой смеси

Из рис. 4 следует, что увеличение количества кирпичного боя в составе сырьевой смеси приводит к снижению морозостойкости и повышению теплопроводности. Снижение морозостойкости связано с тем, что увеличение содержания кирпичного боя приводит к повышению открытой и общей пористости, что, в свою очередь, повышает водопоглощение. В результате вода, проникая в поры материала в большем количестве и расширяясь во время превращения в лед при снижении температуры, вызывает более высокие напряжения, что приводит к разрушению образца при меньшем количестве циклов замораживания—оттаивания. Повышение теплопроводности можно объяснить тем, что пористость материала, которая, как известно, снижает данное свойство, повышается недостаточно и в большей степени на теплопроводность материала оказывает влияние кирпичный бой, средняя теплопроводность которого (0,66 Вт/(м·°C)) значительно превосходит среднюю теплопроводность полистирола (0,09 Вт/(м·°C)).

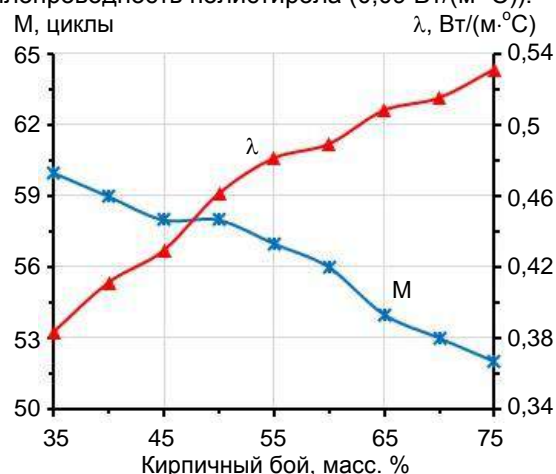


Рис. 4. Зависимость морозостойкости и теплопроводности композиционного материала от содержания кирпичного боя в составе сырьевой смеси

Из представленных данных следует, что наиболее высокие эксплуатационные свойства материала обеспечиваются при введении кирпичного боя в количестве 50 масс. % от состава сырьевой смеси. Данное значение позволяет получить самые высокие показатели прочности, тогда как другие эксплуатационные характеристики материала с повышением содержания этого компонента снижаются. Значения рассмотренных в настоящей работе свойств разрабатываемого композиционного материала при указанном содержании кирпичного боя в составе сырьевой смеси приведены в таблице.

Свойства химически
и термически стойкой керамики

Свойства	Значения
ρ , кг/м ³	1549,2
В, %	2,2
Пот, %	3,5
Пзак, %	5,0
Поб, %	8,5
$\sigma_{сжат}$, МПа	16,2
$\sigma_{из}$, МПа	4,0
М, циклы	58
λ , Вт/(м·°C)	0,461

Как видно из таблицы, разработанный композиционный материал отличается низким водопоглощением, относительно высокой морозостойкостью, средними для строительных материалов показателями по плотности, прочности и теплопроводности.

Заключение

Исследовано влияние наполнителя на основные свойства композиционного материала на основе кирпичного боя и полистирола, получаемого при растворении отходов изделий из пенополистирола в метилхлориде при соотношении полимер/растворитель = 1/1,4. Выявлено, что при введении до 50 масс. % кирпичного боя в состав сырьевой смеси прочность материала повышается. В то же время введение кирпичного боя повышает плотность, водопоглощение и теплопроводность композиционного материала, снижает его морозостойкость. В связи с этим принято решение вводить в состав сырьевой смеси 50 масс. % кирпичного боя, 19,2 масс. % отходов на основе пенополистирола и 30,8 масс. % метилхлорида, что позволит получить композиционный материал со степенью наполнения 72,3 масс. %.

Полученный керамический материал отличается низким водопоглощением и морозостойкостью, соответствующей требованиям ГОСТ 530-2012 для лице-вых изделий (не менее 50 циклов). Прочностные показатели материала сравнимы с керамическим кирпичом марки М150, для которого прочность на

сжатие составляет 15 МПа, а прочность на изгиб равна 2,8 МПа. Плотность и теплопроводность характеризуются средними для строительных материалов значениями. Следовательно, данный материал может быть рекомендован для применения при условии отсутствия высоких механических нагрузок, которые обычно не возникают при эксплуатации облицовочных материалов.

Таким образом, авторами получен состав сырьевой смеси, позволяющий расширить ассортимент и сырьевую базу для композиционных материалов строительного назначения. Данная разработка способствует комплексной переработке крупнотоннажных кирпичных и полимерных отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хизбуллин Ф. Ф., Саттаров А. Р., Хакимов Р. Т. К вопросу организации переработки твердых бытовых отходов в Российской Федерации // Техно-технологические проблемы сервиса. 2014. № 3. С. 82—87.
2. Чумаченко Н. Г., Коренькова Е. А. Промышленные отходы — перспективное сырье для производства строительных материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 3. С. 20—24.
3. Ткачева Ю. Ю., Довбыш В. Е. Обоснование мероприятий по переработке отходов строительной деятельности и управление в области обращения с отходами // Казанская наука. 2010. № 9. С. 366—369.
4. Сагитов Р. Ф., Антимонов С. В., Ганин Е. В., Иванова Ю. С., Фёдоров Е. А. Пути рационального решения проблемы переработки промышленных отходов в РФ // Изв. Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2015. № 2. С. 246—248.
5. Виткалова И. А., Торлова А. С., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Применение полимерных и стекольных отходов для получения самоглазующейся облицовочной керамики // Экология и промышленность России. 2019. № 11. С. 38—42.
6. Торлова А. С., Виткалова И. А., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Разработка энергоэффективной облицовочной керамики на основе местного сырья и стекольного боя // Экология промышленного производства. 2019. № 3. С. 22—26.
7. Колосова А. С., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Применение древесных отходов для получения теплоизоляционного композиционного материала на основе вторичного полимерного связующего // Экология промышленного производства. 2020. № 2. С. 6—10.
8. Торлова А. С., Виткалова И. А., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Утилизация керамических и полимерных отходов в производстве облицовочных композиционных материалов // Экология и промышленность России. 2019. № 7. С. 36—41.
9. Виткалова И. А., Торлова А. С., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Разработка способа получения облицовочного композиционного материала на основе полимерных и стекольных отходов // Экология промышленного производства. 2018. № 3. С. 2—6.
10. Фоменко А. И., Каптюшина А. Г., Грызлов В. С. Расширение сырьевой базы для строительной керамики // Строительные материалы. 2015. № 12. С. 25—27.
11. Муртазаев С. А. Ю., Хадисов В. Х., Хаджиев М. Р. Использование керамического кирпичного боя для получения легких керамобетонов // Экология и промышленность России. 2014. № 10. С. 22—25.
12. Торлова А. С., Виткалова И. А., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Применение кирпичного боя и полимерных отходов для получения строительного композиционного материала // Экология промышленного производства. 2019. № 4. С. 13—18.
13. Колосова А. С., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Теплоизоляционный композиционный материал на основе древесных и полимерных отходов // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 2. С. 28—33.
14. Шинский О. И., Тихонова О. А., Стрюченко А. А., Дорошенко В. С. Термокомпактирование отходов пенополистирола // Твердые бытовые отходы. 2011. № 4(58). С. 48—50.

Impact of broken brick on the properties of a cladding composite material based on a secondary polymer binder

A. S. UVAROVA, I. A. VITKALOVA, E. S. PIKALOV, O. G. SELIVANOV
Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletovs, Vladimir, Russia

This paper presents the dependences obtained as a result of experimental studies of the main properties of a composite material for construction purposes on the amount of broken brick, which is a filler in the raw material mixture. According to the presented dependencies, the number of broken brick is established, which allows to obtain the maximum possible strength for this material.

Keywords: broken brick, polymer waste, recycling of wastes, polymer composite material, cladding material, polymer dissolution, methylene chloride.

Bibliography — 14 references.

Received December 18, 2020

УДК 691.574:66.013

DOI: 10.52190/2073-2589_2021_2_18

Экономическая, экологическая и практическая целесообразность использования отходов углеобогащения ЦОФ "Абашевской" в производстве легковесного сейсмостойкого кирпича

С. Р. ШАПИРО; В. З. АБДРАХИМОВ, д-р техн. наук

Самарский государственный экономический университет, г. Самара, Россия

Получен сейсмостойкий легковесный кирпич, относящийся к классу В (плотность кирпича от 1300 до 1450 кг/м³).

Ключевые слова: легкоплавкая глина, отходы углеобогащения, легковесный сейсмостойкий кирпич, экология, технические показатели.

В XXI в. глобальной проблемой, охватывающей весь земной шар, является экологическая безопасность [1]. Народы земного шара обязаны все свои социальные и экономические притязания привести в соответствие с ограниченными ресурсными возможностями природы, не пересекать ту грань, за которой возникнут необратимые процессы исчезновения человечества.

Постановка проблемы "экология и экономика" определяет подтекст противостояния экономических целей человека и целей выживания природы [2]. Поэтому человечество уже сегодня должно сделать выводы и признать существующую угрозу, которая может уничтожить все высшие формы жизни.

Для Европейского Союза в области экологического регулирования основой нормативной базы является Директива Совета ЕС (1996 г.) "О комплексном предотвращении и контроле загрязнений (КПКЗ)". Данная директива предусматривает применение механизма расчета показателей воздействия на основе наилучших достигнутых технологий (НДТ). НДТ создают баланс между минимизацией загрязнения окружающей среды и поиском технических возможностей, а в европейских странах наряду с общим снижением уровня загрязнения окружающей среды также наблюдается ускоренное технологическое развитие. В РФ трансформация существующей системы экологического нормирования заложена в законопроекте Минприроды России "О совершенствовании системы нормирования и экономического стимулирования в области охраны окружающей среды".

Кроме того, человечество должно считаться с темпоральными экстерналиями между поколениями, так как этот тип экстерналий тесно связан с концепцией устойчивого развития. Современное поколение обязано при удовлетворении своих потребностей не уменьшать возможности следующих поколений

в удовлетворении собственных нужд [1]. Так, например, истощение в ближайшем будущем запасов нефти, газа, угля, массовая деградация плодородных земель создадут для будущих поколений энергетические и производственные проблемы. Возможны и положительные темпоральные экстерналии: высокотехнологические производства, достижения научно-технической революции, освоение дешевых технологий производства энергии (солнечная, ветровая и т. д.), которые в будущем дадут значительный экономический эффект.

Эффективная утилизация многотоннажных отходов углеобогащения — одна из актуальных экологических проблем [3—5]. Неограниченными возможностями использования многотоннажных отходов обладает отрасль, производящая строительные материалы [5—8]. Это объясняется крупными масштабами строительного комплекса, его материалоемкостью и номенклатурой изделий.

Постановка задачи. С учетом сокращения запасов традиционных отощителей и выгорающих добавок необходимо найти новые способы по их замещению различными видами отходов. Опыт передовых зарубежных стран показал техническую осуществимость этого направления и возможность применения его еще и как инструмента защиты природной среды от загрязнения.

Цель работы: получение экономически выгодного легковесного сейсмостойкого кирпича на основе легкоплавкой глины и отходов углеобогащения.

Экономическая целесообразность

Предприятия угольной промышленности в условиях рынка вынуждены постоянно искать пути сокращения издержек и создания большого разнообразия выпускаемой основной и сопутствующей продукции [9]. На современном этапе развития углеобогательного производства большой потенциал роста эффективности сопряжен с рационализацией использования отходов углеобогащения. Раскрытие этого потенциала может быть осуществлено по нескольким направлениям. Одним из них является получение дополнительного дохода за счет производства потребительных стоимостей из отходов

Шапиро Станислав Романович, студент.

E-mail: S.shapiro7@yandex.ru

Абдрахимов Владимир Закирович, профессор.

E-mail: 3375892@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9 марта 2021 г.

© Шапиро С. Р., Абдрахимов В. З., 2021

углеобогащения. Другое направление — сокращение экологических издержек за счет снижения нагрузки на окружающую природную среду от размещения и хранения таких отходов.

При ограниченном государственном финансировании геологоразведочных работ весьма важным является принятие оптимальных решений по использованию отходов углеобогащения для производства легковесного кирпича, которые дадут максимальный социально-экономический эффект.

Поскольку природные сырьевые ресурсы истощены, необходимо вовлекать в производственный оборот отходы углеобогащения для изготовления, например, легковесного кирпича. При этом исключаются затраты на геологоразведочные работы, строительство и эксплуатацию карьеров, освобождаются от воздействия негативных антропогенных факторов значительные земельные участки.

Стоимость сырья для производства керамического строительного материала, как известно, иногда достигает 40—45 % его общей стоимости [10]. Поэтому проблема снижения цены сырьевых материалов в производстве керамических строительных изделий приобретает особую актуальность. Наиболее эффективным решением этой проблемы является использование в качестве сырьевой базы для производства строительных керамических материалов промышленных отходов [10].

В теплоснабжении России около третьей части составляют потери. В России на отопление жилой площади расходуется в 2—3 раза больше энергии, чем в странах Европы. Так, на индивидуальные дома в России идет от 600 до 800 кВт/(м²·год), в Германии — 250 кВт/(м²·год), в Швеции — 139 кВт/(м²·год) [11].

Одним из наиболее эффективных путей решения данной проблемы является сокращение потерь тепловой энергии через ограждающие конструкции зданий, сооружений, промышленного оборудования и тепловых сетей за счет использования эффективных теплоизоляционных материалов. К теплоизоляционным керамическим материалам относятся пористые заполнители и легковесный кирпич.

Одной из актуальных задач промышленности теплоизоляционных материалов является производство изделий с высокой эффективностью, теплопроводность которых не превышает 0,25 Вт/(м·°C). Производство и потребление таких теплоизоляционных материалов в России гораздо меньше, чем в странах Европы и Северной Америке, несмотря на то, что климат во многих из этих стран гораздо мягче.

Для получения легковесного кирпича необходимо использовать выгорающие добавки. К группе выгорающих добавок относятся различные виды твердого топлива, в частности антрацит и коксовая мелочь. Их вводят в состав шихты до 5 % по объему, т. е. до 50—70 % от общей потребности топлива на обжиг изделий. Назначение их — создавать пористость в керамических материалах и интенсифицировать процесс обжига внутри изделий.

Для производства легковесного кирпича в качестве выгорающей добавки целесообразно использо-

вать отходы углеобогащения, содержащие углерод (C_a — содержание несгоревших органических остатков) в количестве более 7 %, с теплотворной способностью θ_p^H более 1500 ккал/кг [12].

Сейсмостойкий кирпич

Российская Федерация по отношению к другим странам, расположенным на сейсмоактивных территориях, может характеризоваться как территория с умеренной сейсмичностью. Вместе с тем в некоторых районах РФ наблюдается и высокая сейсмоактивность. Высокой сейсмичностью характеризуются территории:

- Кавказа (Ингушетия, Северная Осетия, Чечня и Дагестан);
- Сибири (Забайкалье, Байкал, Саяны и Алтай);
- Дальнего Востока (Курило-Камчатский регион и о. Сахалин).

В Уральском федеральном округе за последние 300 лет выявлено от 41 до 43 землетрясений с магнитудой от 3,5 до 6,5 баллов. При этом последние исследования дали неутешительные прогнозы, а именно подземные толчки могут быть с магнитудой до 7 баллов.

Утром 23 июля 2020 г. подземные толчки с магнитудой 3,5 балла были зафиксированы в 6 км к востоку от села Отказное Ставропольского края. Их эпицентр находился на глубине 10 км от поверхности земли.

В Краснодарском крае наблюдались подземные толчки в городах побережья Черного моря (от Анапы до Сочи — с магнитудой 4 балла, в Новороссийске — от 5 до 8 баллов). Землетрясения возникали и в Крыму (например, крымское землетрясение 1927 г. с магнитудой толчков 6 баллов).

Впервые за последние 13—15 лет зоной сейсмической активности стало Поволжье. Например, территории Самарской области могут стать сейсмоактивными из-за варварской человеческой деятельности при добыче полезных ископаемых.

Для возведения самонесущих и несущих стен согласно п. 6.14.4 СП 14.13330.2014 "Строительство в сейсмических районах" необходимо использовать керамические камни и кирпич не ниже марки М125, если сейсмичность строительной площадки выше 5 баллов [13—17].

Сырьевые материалы

Для получения легковесного кирпича использовали легкоплавкую (бейделлитовую) глину в качестве связующего и отходы углеобогащения в качестве отощителя (для снижения усадки и сокращения времени сушки) и выгорающей добавки. Химические составы компонентов представлены в табл. 1 (оксидный), табл. 2 (поэлементный); табл. 3 (фракционный) и табл. 4 (технологический), а минералогические составы — на рис. 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых компонентов

Компонент	Содержание оксидов, масс. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	п.п.п.
Отходы углеобогащения ЦОФ "Абашевская"	46,45	13,14	5,6	11,13	2,31	4,48	16,89
Бейделлитовая глина Образцовского месторождения	57,13	19,25	8,52	2,0	1,2	1,5	10,62

Таблица 2

Позлементный химический состав компонентов

Компонент	Элементы									
	C	O	Na	Mg	Al + Ti	Si	S	K	Ca	Fe
Отходы углеобогащения ЦОФ "Абашевская"	8,20	50,12	1,24	0,20	11,58	19,50	0,10	1,71	4,50	2,85
Бейделлитовая глина Образцовского месторождения	4,04	51,92	0,53	0,54	14,70	21,19	1,2	0,73	0,58	4,57

Таблица 3

Фракционный (гранулометрический) состав компонентов

Компонент	Содержание фракций, %; размер частиц, мм				
	>0,063	0,063—0,01	0,01—0,005	0,005—0,001	<0,0001
Отходы углеобогащения ЦОФ "Абашевская"	32,8	27,1	11,2	14,3	14,6
Бейделлитовая глина Образцовского месторождения	7	8	11	19	55

Таблица 4

Технологические показатели сырьевых материалов

Компонент	Теплотворная способность, ккал/кг	Огнеупорность, °C		
		Начало деформации	Размягчение	Жидкоплавкое состояние
Отходы углеобогащения ЦОФ "Абашевская"	1800	1320	1350	1380
Бейделлитовая глина Образцовского месторождения	450	1280	1300	1350

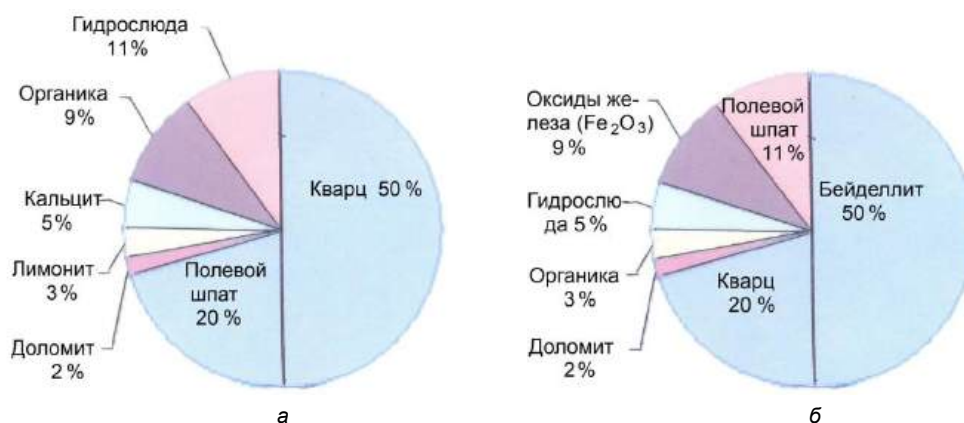


Рис. 1. Минералогический состав сырьевых компонентов:

а — отходы углеобогащения ЦОФ "Абашевская"; б — бейделлитовая глина Образцовского месторождения

Отходы углеобогащения ЦОФ "Абашевская". Отходы углеобогащения ЦОФ "Абашевская" (г. Новокузнецк) представлены в основном кварцем, полевым шпатом, гидрослюдой и органикой (рис. 1). Они принадлежат ОАО "Центральная обогатительная фабрика "Абашевская".

Компания ОАО "ЦОФ "Абашевская" осуществляет следующие виды деятельности:

- добыча каменного угля, бурого угля и торфа;
- добыча, обогащение и агломерация каменного угля;
- обогащение и агломерация каменного угля;

- обогащение каменного угля (основной вид деятельности).

Растущие потребности народного хозяйства в топливно-энергетическом сырье выдвигают на первый план задачу его комплексного использования и широкого вовлечения в хозяйственный оборот образующихся отходов (вторичных ресурсов). Использование вторичных ресурсов на базе современных технологий отвечает также общегосударственным интересам по защите окружающей среды. С этой точки зрения комплексная утилизация отходов угледобывающей промышленности приобретает все

большее значение. Разрабатываются технические решения по созданию безотходных углеобогачительных фабрик с полной утилизацией отходов либо со складированием отходов и последующей рекультивацией земель.

Легкоплавкая бейделлитовая глина. В качестве основного глинистого сырья для производства керамического кирпича на Тольяттинских кирпичных заводах используется глина Образцовского месторождения, характеризующаяся как среднedisперсная, преимущественно с низким содержанием мелких и средних включений, представленных кварцем, железистыми минералами, гипсом и карбонатными включениями [18—21]. Основным породообразующим минералом образцовской глины является бейделлит, названный по местности Бейделл штата Колорадо (США) и относящийся к минералам группы монтмориллонита [18—21].

Глина Образцовского месторождения по гранулометрическому составу относится к группе среднedisперсного сырья, высокочувствительна к сушке, характеризуется высокой усадкой образцов. По пластичности ее можно идентифицировать как среднeпластичную (число пластичности 15—24). Огнеупорность глины 1300—1320 °С (легкоплавкая), число пластичности 18—20 (среднeпластичная), содержание тонкодисперсных фракций размером менее 1 мкм 40—60 % (дисперсная).

На рис. 2 представлен кирпич из образцовской глины без добавок обожженный на кирпичном заводе города Тольятти в туннельной печи при температуре обжига 1000 °С [22].

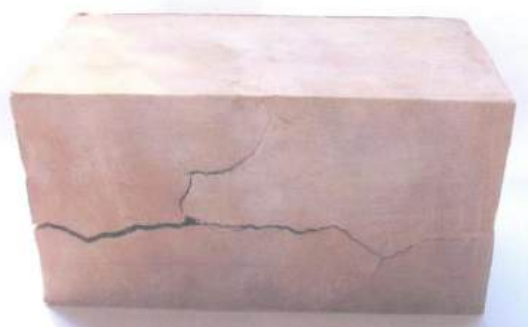


Рис. 2. Полнотелый кирпич из образцовской глины, обожженный при температуре 1000 °С

Как видно из рис. 2, обожженный кирпич из образцовской глины имеет глубокую трещину и сильно деформирован. Плотная структура бейделлитовой глины и повышенное количество потерь при прокаливании (п.п.п. более 10 %; табл. 1) способствуют вспучиванию при обжиге изделий.

Технология получения сейсмостойкого кирпича

Сырьевые материалы высушивали до влажности не более 5 % и измельчали до прохождения сквозь сито 1,0 мм. Высушенные сырьевые материалы тщательно перемешивали. Керамическую массу готовили пластическим способом при влажности 20—24 %

(в зависимости от содержания глинистого компонента). Затем из нее формовали кирпич. Кирпич-сырец высушивали до влажности не более 8 % и обжигали при температуре 1050 °С. Изотермическая выдержка при конечной температуре составляла 60 мин. В табл. 5 приведены составы керамических масс, а в табл. 6 — физико-механические показатели кирпича.

Таблица 5

Составы керамических масс

Компонент	Состав		
	1	2	3
Бейделлитовая глина Образцовского месторождения, %	80	70	60
Отходы углеобогащения ЦОФ "Абашевская", %	20	30	40

Таблица 6

Физико-механические показатели кирпича

Показатель	Составы		
	1	2	3
<i>Шихта и кирпич-сырец</i>			
Пластичность шихты	18	15,4	12
Время сушки кирпича, ч	65	58	48
Усадка высушенного кирпича, %	5,8	5,3	4,8
<i>Обожженный кирпич</i>			
Плотность, кг/м ³	1440	1400	1380
Морозостойкость, циклы	48	45	42
Механическая прочность на сжатие, МПа	15,8	15,2	14,7
Механическая прочность при изгибе, МПа	3,5	3,3	2,8
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,24	0,22	0,20
Общая усадка, %	6,2	5,7	5,2

Строительный легковесный кирпич подразделяют в зависимости от плотности на три класса: А — от 700 до 1000 кг/м³; Б — от 1000 до 1300 кг/м³; В — от 1300 до 1450 кг/м³. Как видно из табл. 6, полученные из составов № 1—3 кирпичи относятся к классу В. Кирпичи из составов № 1 и 2 имеют марку М150, а кирпич из состава № 3 — марку М125. Таким образом, кирпичи из составов № 1—3 относятся к сейсмостойким.

Согласно требованиям ГОСТ 530-2007 "Кирпич и камень керамические. Общие условия" теплотехнические характеристики изделий оцениваются по коэффициенту теплопроводности в сухом состоянии λ Вт/(м·°С): до 0,20 — группа высокой эффективности; от 0,20 до 0,24 — группа повышенной эффективности; от 0,24 до 0,36 — группа эффективности; от 0,36 до 0,46 — группа условной эффективности; свыше 0,46 — группа малой эффективности (обычные).

Как видно из табл. 6, полученные легковесные кирпичи (теплоизоляционные материалы) относятся к группе повышенной эффективности.

Повышенное содержание углерода в отходах углеобогащения (см. табл. 2) повышает температуру внутри кирпича, снижает расход топлива, повышает пористость и уменьшает вес готовых изделий. При выгорании органической добавки выделяется не-

большое количество сопутствующих газов, что приводит к уплотнению стенок вокруг каждой частички и в итоге повышает прочность всего изделия.

На рис. 3 представлена эффективная технология производства легковесного сейсмостойкого кирпича.



Рис. 3. Технология получения керамического кирпича

Выводы

Использование отходов углеобогащения в производстве легковесного сейсмостойкого кирпича на основе бейделлитовой глины позволяет получать теплоизоляционные сейсмостойкие материалы: легковесный кирпич с теплопроводностью и плотностью менее 0,250 Вт/(м·°C) и 1450 кг/м³ соответственно.

Получение керамических материалов с применением отходов производств способствует утилизации промышленных отходов, охране окружающей среды и расширению сырьевой базы для строительных материалов.

Безусловным достоинством использования много-тоннажных отходов топливно-энергетического комплекса является разгрузка экологической обстановки. Использование отходов способствует:

- утилизации промышленных отходов и техногенных отложений и тем самым охране окружающей среды;
- вовлечению техногенных образований в производственный оборот для производства строительных материалов;
- освобождению значительных земельных участков от воздействия негативных антропогенных факторов и рациональному использованию ингредиентов промышленных отходов на объектах стройиндустрии;
- снижению стоимости строительных материалов;

• рациональному природопользованию за счет вовлечения отходов в производство керамических материалов;

• исключению затрат на геологоразведочные работы, строительство и эксплуатацию карьеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдрахимов В. З., Кайракбаев А. К. Экологический менеджмент. — Актобе: Актобинский ун-тет им. акад. С. Баишева, 2019. — 240 с.
2. Абдрахимов В. З. Концепция современного естествознания. — Самара: Самарский гос. эконом. ун-тет, 2015. — 340 с.
3. Кайракбаев А. К., Абдрахимова Е. С. Рециклинг отходов топливно-энергетического комплекса, цветной металлургии и нефтехимической промышленности в производстве безобжиговых жаростойких бетонов // Экология промышленного производства. 2020. № 3. С. 5—12.
4. 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.
5. Абдрахимов В. З. Рециклинг отходов топливно-энергетического комплекса в производстве легковесного кирпича на основе глинистых материалов различного минерального состава // Экология промышленного производства. 2020. № 1. С. 10—16.
6. Абдрахимов В. З. Использование флотационного углеобогащения в производстве пористого заполнителя на основе жидкого стекла // Экология промышленного производства. 2019. № 4. С. 25—29.
7. Абдрахимов В. З. Экологические и технологические аспекты использования отходов горючих сланцев в производстве различных теплоизоляционных материалов // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 5. С. 24—29.
8. Абдрахимов В. З., Пичуров С. Н., Абдрахимова Е. С., Абдрахимова И. Д. Снижение нанесения экологического ущерба биосфере в целом за счет использования отходов энергетики и цветной металлургии в производстве керамического кирпича // Экология промышленного производства. 2017. № 1. С. 3—6.
9. Ефремов В. И., Никулин И. Б., Рыбак В. Л. Использование отходов углеобогащения и оптимизация ресурсов по экологическому фактору // Изв. ТулГУ. Наука о земле. 2014. № 1. С. 85—95.
10. Шевандо В. В., Абдрахимов А. В., Вдовина Е. В., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Использование золошлакового материала на основе бейделлитовой глины в производстве керамического кирпича // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 10. С. 46—47.
11. Абдрахимова Е. С., Рошупкина И. Ю., Абдрахимов В. З., Колпаков А. В. Влияние топливосодержащих отходов на структуру пористости теплоизоляционного материала // Строительство и реконструкция. 2018. № 2. С. 113—120.
12. Абдрахимов В. З. Экономические и практические аспекты использования отходов горючих сланцев в производстве легковесного кирпича // Экономика строительства. 2020. № 1. С. 64—73.
13. Абдрахимов В. З. Использование обожженного солевого шлака для получения высокопрочного сейсмостойкого кирпича // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. № 5. С. 45—50.
14. Абдрахимов В. З. Влияние нанотехногенного сырья на сушильные свойства и физико-механические показатели керамического кирпича // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2020. № 1. С. 29—34.
15. Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З. Использование отходов цветной металлургии и топливно-энергетического комплекса в производстве сейсмостойкого кирпича снижает экологический ущерб водоемам и водостокам Самарской области // Эксперт: теория и практика. 2021. № 1. С. 25—37.
DOI: 10.51608/26867818_2021_1_25
16. Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Фазовый состав и физико-механические свойства при различных температурах обжига керамического сейсмостойкого кирпича с использованием ферропеллы // Стекло и керамика. 2020. № 12. С. 45—50.
17. Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Использование алюмосодержащего техногенного сырья для получения высокопрочного сейсмостойкого кирпича на основе легкоплавкой глины Актобинской области // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 11. С. 14—18.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. Абдрахимов В. З. Дилатометрические исследования и влияние ориентации глинистых частиц на обжиговые свойства легкоплавких глин различного минералогического состава // Изв. вузов. Строительство. 2020. № 6. С. 24—31. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-738-6-24-32

Economic, environmental and practical expediency of the use of coal-rich waste from the Abashevskaya coal Processing Plant in the production of lightweight earthquake-resistant bricks

S. R. SHAPIRO, V. Z. ABDRAKHIMOV

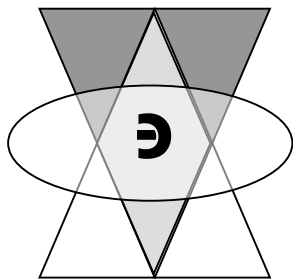
Samara State University of Economics, Samara, Russia

An earthquake-resistant lightweight brick is obtained, which belongs to class B (brick density from 1300 to 1450 kg/m³).

Keywords: low-melting clay, coal-enrichment waste, lightweight earthquake-resistant brick, ecology, technical indicators.

Bibliography — 22 references.

Received March 9, 2021



Водоподготовка и водоочистка

УДК 621.454.3

DOI: 10.52190/2073-2589_2021_2_24

Эколого-токсикологическая оценка опасности загрязнения воды водоёмов основной свинцово-никелевой солью фталевой кислоты

А. А. МАСЛЕННИКОВ, д-р биол. наук; С. А. ДЕМИДОВА, канд. биол. наук; Л. Ю. БОЧАРОВА; В. В. КЛАУЧЕК, д-р мед. наук; В. А. АНТОНОВ, д-р мед. наук
ФГУП «Научно-исследовательский институт гигиены, токсикологии и профпатологии»
Федерального медико-биологического агентства, г. Волгоград, Россия

Впервые проведена комплексная экспериментальная оценка опасности содержания нового компонента твердых ракетных топлив в воде водоемов. Установлено, что токсикант вызывает изменения органолептических и общесанитарных свойств воды. В опытах на лабораторных животных выявлено, что однократное внутрижелудочное введение ксенобиотика приводит к изменению ряда гематологических показателей. Полученные данные учтены при обосновании ПДК основной свинцово-никелевой соли фталевой кислоты в данной экосистеме.

Ключевые слова: вода, основная свинцово-никелевая соль фталевой кислоты, органолептический и санитарный режим водоёмов, порог острого общетоксического действия.

В процессе производства, применения и хранения новых компонентов твёрдых ракетных топлив (ТРТ) не исключено их попадание в основные объекты окружающей среды, включая воду водоёмов, что представляет опасность для здоровья контактирующих.

Для обеспечения санитарно-эпидемиологического контроля за содержанием компонентов ТРТ в воде необходимо обязательное проведение эколого-токси-

кологических исследований с последующей разработкой соответствующих гигиенических нормативов.

Опасность загрязнения данной биосреды одним из компонентов ТРТ [1] изучена, однако для основной свинцово-никелевой соли фталевой кислоты, применяемой в качестве катализатора скорости горения топлив баллистического типа [2], аналогичные работы не проводили. Цель настоящих исследований заключалась в экспериментальной оценке опасности содержания основной свинцово-никелевой соли фталевой кислоты в воде водоёмов.

Масленников Александр Александрович, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией "Экологическая токсикология".

E-mail: maslennikov@rihtop.ru

Демидова Светлана Александровна, старший научный сотрудник лаборатории "Экологическая токсикология".

E-mail: demidova@rihtop.ru

Бочарова Людмила Юрьевна, научный сотрудник лаборатории "Лекарственная безопасность".

E-mail: maslennikov@rihtop.ru

Клаучек Валентина Васильевна, старший научный сотрудник, заместитель директора по научной работе.

Антонов Валерий Алексеевич, профессор, исполняющий обязанности директора.

E-mail: antonov@rihtop.ru

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2021 г.

© Масленников А. А., Демидова С. А., Бочарова Л. Ю., Клаучек В. В., Антонов В. А., 2021

Материалы и методы исследований

В качестве объекта исследований использовали основную свинцово-никелевую соль фталевой кислоты (свинец(II)—никель(II) гидроксидфталат, ФНС), которая представляет собой водную пасту зелёного цвета с молекулярной массой 685,46 и плотностью 3,25 г/см³. Массовая доля (в пересчёте на сухой продукт) свинца 28—32 %, никеля 24—27 %. Точка плавления 274 °С. Растворимость в воде 0,015 г. В жирах и органических растворителях не растворима. При нормальных условиях стабильна, не претерпевает изменений в объектах окружающей среды [2].

Исследование влияния соединения на органолептические свойства воды и её общесанитарный режим выполняли в соответствии с требованиями действующих методических указаний [3] и положениями соответствующих монографий [4, 5]. При этом анализ качества воды проводили по следующим показателям: прозрачность, цветность, наличие пены и запаха.

В ходе оценки воды на прозрачность визуально различали шрифт на белом фоне через водяной столб тестируемых проб высотой 30 см и более, а при меньшей высоте столба результат принимали за достоверное отклонение от контроля [4, 5]. Установление предельного значения цветности воды выполняли в градусах по графику. Критериально значимой считали величину, превышающую 20° [4, 5]. Для определения запаха воды применяли стандартный балльный метод. Критериально значимым установлен запах в 2 балла [3–5]. При характеристике пенистости использовали метод цилиндров. Проба считалась негативной, если пена сохранялась более 1 мин [3–5].

Воздействие токсиканта на общесанитарный режим воды оценивали по состоянию основных процессов её самоочищения: биохимическое потребление кислорода за 5 сут (БПК₅), процессы нитрификации, развитие и отмирание сапрофитной микрофлоры. Достоверными принимали отклонения показателей в опыте, выходящие за пределы отличий соответствующих контрольных значений: 15 % — угнетение; 20 % — стимуляция [3].

Содержание растворённого кислорода (РК) при анализе БПК₅ в пробах определяли распространённым методом йодометрического титрования по Винклеру [4–6]. Тестирование водных образцов выполняли в следующие сроки: в день загрязнения — 0-е сутки (определение РК), на 1-е, 3-и и 5-е сутки.

Характеристику влияния ФНС на нитрифицирующие процессы в воде проводили по комплексу основных показателей: азот аммонийный, азот нитритов, азот нитратов. Анализ проб осуществляли через 1 ч после внесения вещества в воду (0-е сутки) и далее до 33 суток [3, 7–10].

Жизнеспособность сапрофитной микрофлоры оценивали в 14-суточном эксперименте [3, 7].

В ходе определения порога острого общетоксического действия соединения в качестве биомодели использовали 24 белых беспородных крыс-самцов с массой тела 200–240 г [3]. Статистическая группа составляла 8 особей. Опыты были проведены с учетом принципов гуманного обращения с экспериментальными грызунами [11].

Из-за физико-химических свойств, не позволяющих применять нативную форму, тестируемое вещество вводили в желудок подопытным особям в виде взвеси в 2,5%-м растворе водного крахмала при помощи зонда из расчёта 1 мл на 100 г массы тела. Особи контрольной группы получали адекватные объёмы водно-крахмального раствора.

Общезерообитивное действие ФНС оценивали по клинической картине отравления, а также с помощью комплекса физиологических, поведенческих и гематологических методов. При этом определяли динамику массы тела животных, частоту дыхательных движений и сердечных сокращений, порог реакции на

тепловое воздействие, поведение (в установке "открытое поле") [12]. Показатели периферической крови крыс-самцов регистрировали на автоматическом гематологическом анализаторе PCE-210 (ERMA, Япония).

Статистическую обработку данных осуществляли с применением критерия Стьюдента–Фишера [13], используя пакет Primer of Biostatistics 4.03.

Результаты и обсуждение.

В ходе выполнения исследований установлено, что вода, содержащая ФНС в концентрациях 250, 50 и 10 мг/л, не имеет запаха и пены.

В то же время вещество вызвало появление цветности и изменение прозрачности оцениваемой экосистемы в концентрации 50 мг/л и более (табл. 1, 2). При снижении уровней токсиканта до 10 мг/л критериально значимых отличий от контроля не выявлено (табл. 1, 2).

Таблица 1

Оценка цветности воды, содержащей ФНС

Концентрация вещества в воде, мг/л	Описание цветности воды	Показатель цветности, град.
Контроль	Отсутствует	20,0
250	Бледно-голубая	430,0
50	Светло-серая	47,5
10	Отсутствует	20,0

Таблица 2

Оценка прозрачности воды, содержащей ФНС

Концентрация вещества в воде, мг/л	Описание прозрачности воды	Высота водяного столба h, см
Контроль	Прозрачная	30,0 и более
250	Мутная	19,5 и менее
50	Мутная	27,0 и менее
10	Прозрачная	30,0 и более

В табл. 1 и 2 полужирным шрифтом указано достоверное отклонение величины от контроля. Таким образом, пороговый уровень ФНС по воздействию на органолептические свойства воды составил 50 мг/л, а максимально недействующий — 10 мг/л.

При определении санитарных характеристик воды соединение вносили в искусственные водоёмы в количестве от 3,6 до 0,4 мг/л. Исследования возможности хиагента проявлять негативное влияние на процессы БПК в воде водоёмов были выполнены в трёх независимых сериях экспериментов.

Установлено достоверное изменение реакции биохимического окисления экотоксиканта на максимальном уровне относительно контроля на 1-е и 3-и сутки эксперимента (табл. 3). В табл. 3–5 в скобках полужирным шрифтом указано достоверное отклонение величины (в %) и направленность эффекта (стрелки). Однако при продолжении опыта до 5 суток, а также снижении содержания вещества в данной среде до 1,2 мг/л и ниже значимых отличий от контрольных проб не отмечено. Поэтому для ФНС по данному общесанитарному показателю в качестве

пороговой и максимально недействующей концентраций приняты величины 3,6 и 1,2 мг/л соответственно.

Воздействие соединения на триаду азота проводили при его содержании в воде в концентрациях 1,0 и 0,4 мг/л.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что ФНС на уровнях 1,0 и 0,4 мг/л не оказывает отрицательного действия на начальную стадию (I этап) процесса нитрификации — аммонификацию.

Однако при содержании вещества в концентрации 1,0 мг/л установлено ингибирование II стадии окислительных процессов (азот нитритов) в воде до 30,08 % с 23-х по 33-и сутки эксперимента (табл. 4).

Кроме того, химагент в этой концентрации способствовал стимуляции до 45,16 % реакции восстановления нитритов до нитратов (III этап) с 0-х по 14-е, 23-и и 27-е сутки исследований (табл. 4), что харак-

теризует её как действующую. В концентрации 0,4 мг/л токсикант не приводил к достоверному изменению процессов нитрификации аквасистемы (табл. 4).

Таким образом, концентрация ФНС 1,0 мг/л определена в качестве пороговой, а 0,4 мг/л — максимально недействующей на триаду азота воды.

Исследования кинетики жизнеспособности сапрофитной микрофлоры воды, содержащей ФНС, проведены по стандартной схеме. Соединение испытывали в следующих концентрациях: 3,6, 1,2 и 0,4 мг/л.

Установлено, что присутствие вещества в воде искусственных водоёмов на максимальном уровне способствовало ингибированию роста оцениваемой микрофлоры от 15,20 до 75,75 % с начала эксперимента и до 10-х суток. Снижение содержания токсиканта до 1,2 мг/л и ниже не вызвало значимых изменений числа сапрофитов (табл. 5).

Таблица 3

Достоверные изменения процессов БПК₅ воды (мг О₂/л), загрязненной ФНС

Период проведения исследований, сут	Концентрация ФНС в воде, мг/л			Контроль
	3,6	1,2	0,4	
I серия				
1	0,93 (21,85↓)	1,22 (2,52)	1,24 (4,20)	1,19
II серия				
1	0,59 (43,81↓)	0,97 (7,62)	1,01 (3,81)	1,05
3	1,57 (25,94↓)	2,03 (4,25)	2,29 (8,02)	2,12
III серия				
1	0,54 (35,71↓)	0,78 (7,14)	0,88 (4,76)	0,84

Таблица 4

Достоверные изменения показателей, характеризующих процессы нитрификации в воде, содержащей ФНС

Показатели и единицы измерения	Порядковый номер суток наблюдения	Концентрация ФНС в воде, мг/л		Контроль
		1,0	0,4	
Азот нитритов (по NO ₂ ⁻), мг/л	23	33,00 (30,08↓)	42,95 (9,00)	47,20
	27	41,86 (21,02↓)	49,95 (5,75)	53,00
	30	43,21 (24,92↓)	51,53 (10,46)	57,55
	33	51,67 (20,98↓)	60,00 (8,24)	65,39
Азот нитратов (по NO ₃ ⁻), мг/л	0	0,60 (22,45↑)	0,51 (4,08)	0,49
	1	0,65 (22,64↑)	0,57 (7,55)	0,53
	3	0,64 (23,08↑)	0,56 (7,69)	0,52
	7	0,72 (26,32↑)	0,61 (7,02)	0,57
	10	0,92 (26,03↑)	0,77 (5,48)	0,73
	14	0,67 (22,99↑)	0,84 (3,45)	0,87
	23	1,35 (45,16↑)	1,03 (10,75)	0,93
	27	1,15 (35,29↑)	0,92 (8,24)	0,85

Таблица 5

Достоверные изменения численности сапрофитной микрофлоры воды, загрязнённой ФНС (количество колоний / 1,0 мл)

Период посева	Концентрация ФНС в воде, мг/л			Контроль
	3,6	1,2	0,4	
Через 1 ч	38200 (31,79↓)	55650 (0,63)	47900 (3,39)	56000
Через 3 ч	70097 (26,78↓)	85900 (10,28)	95960 (0,23)	95737
1-е сутки	63050 (62,10↓)	147610 (11,27)	137200 (5,50)	166350
2-е сутки	3250 (75,75↓)	14100 (5,22)	12200 (8,96)	13400
3-и сутки	4350 (46,95↓)	7000 (14,63)	7500 (8,54)	8200
4-е сутки	2800 (28,21↓)	3700 (5,13)	4150 (6,41)	3900
8-е сутки	435 (23,68↓)	625 (9,65)	565 (0,88)	570
10-е сутки	212 (15,20↓)	253 (1,20)	231 (7,60)	250

Величина ФНС 3,6 мг/л, оказывающая минимальное вредное воздействие на жизнеспособность исследуемых микроорганизмов воды, признана в качестве пороговой. Концентрация соединения 1,2 мг/л является максимально недействующей.

В процессе определения порога острого общетоксического действия влияние вещества на организм лабораторных животных оценивали при его внутрижелудочном поступлении в дозах 450 мг/кг (1-я опытная группа) и 90 мг/кг (2-я опытная группа). Обследование крыс проводили через 1 сут после введения водно-крахмальных растворов химагента. При этом анализ состояния самцов не выявил изменений физиологических и поведенческих параметров. Однако при характеристике гематологических показателей у особей, получивших токсикант в большей дозе, установлено статистически значимое снижение количества гемоглобина, гематокрита и эритроцитов (последнее значение вышло за пределы бисигмальных отклонений параллельного контроля). Наряду с этим при оценке белой крови у данных животных отмечена лимфоцитопения (на 20 %). При пятикратном понижении уровня воздействия токсиканта у подопытных особей выявлена только эритропения (на 12 %) и тенденция к достоверному снижению уровня гемоглобина (табл. 6).

Таблица 6

Достоверные изменения, установленные после однократного перорального воздействия основной свинцово-никелевой соли фталевой кислоты

Показатели и единицы измерений	Дозы вещества, мг/кг		Контроль
	450	90	
Эритроциты, $10^{12}/л$	5,93 ± 0,24**	6,07 ± 0,25*	6,92 ± 0,15 (6,06 ± 7,78)
Гемоглобин, г/л	122,8 ± 4,5*	126,4 ± 4,2	136,0 ± 2,4
Гематокрит, %	36,5 ± 1,6*	38,74 ± 1,27	40,40 ± 0,73
Лимфоциты, $10^9/л$	4,69 ± 0,3*	4,63 ± 0,69	5,87 ± 0,47

Примечание. Звездочкой обозначены статистически значимые различия при $P \leq 0,05$, находящиеся в пределах $M \pm 2\sigma$ показателей контрольной группы животных, двойной звездочкой — статистически значимые различия при $P \leq 0,05$, выходящие за эти пределы.

С учетом изложенного доза ФНС 450 мг/кг признана явно действующей, а уровень 90 мг/кг — близким к порогу острого общетоксического действия.

Обобщенный анализ результатов впервые поставленных экспериментов по однократному загрязнению воды водоёмов основной свинцово-никелевой солью фталевой кислоты (исходный компонент ТРТ) позволил установить следующее: тестируемое соединение вызывает негативное изменение органолептических характеристик и общесанитарных свойств воды, кроме того, в условиях острого опыта вещество при внутрижелудочном поступлении оказывает токсическое воздействие на организм лабораторных животных.

Таким образом, можно констатировать, что попадание данного соединения в воду представляет эколого-токсикологическую опасность, зарегистрированную по всем трём базовым признакам вредности, что обязательно нужно принимать во внимание при об-

ращении с рассмотренным веществом.

Полученные данные учтены при обосновании ПДК основной свинцово-никелевой соли фталевой кислоты в воде водоёмов.

Выводы

Основная свинцово-никелевая соль фталевой кислоты вызывает изменение цветности и прозрачности исследуемой экосистемы. Концентрация 50 мг/л определена как пороговая по органолептическому признаку вредности.

По влиянию на процессы биохимического потребления кислорода и жизнеспособность сапрофитной микрофлоры пороговая концентрация соединения составила 3,6 мг/л, по воздействию на триаду азота — 1 мг/л.

Уровень токсиканта 90 мг/кг признан в качестве порога однократного общетоксического действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Масленников А. А., Демидова С. А. Влияние компонента твёрдых ракетных топлив на общесанитарные характеристики воды: мат. науч.-практ. конф., посвященной 100-летию ФГКУ "985 Центр государственного санитарно-эпидемиологического надзора" Министерства обороны РФ "Актуальные вопросы государственного санитарно-эпидемиологического надзора в Вооружённых Силах РФ". 20—21 ноября 2018 г. — СПб., 2018. С. 81.
2. Кусиканова А. М., Чашухина А. А., Сироткин Л. Б., Якубов О. А., Владыкин В. И., Охрименко Э. Ф. Способ получения основного фталата никеля(II)—свинца(II). Патент РФ 2462470. Заявка 2011138901/04. Заявл. 22.09.2011. Оpubл. 27.09.2012. Бюл. № 27.
3. МУ 2.1.5.720-98. Обоснование гигиенических нормативов химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. — М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава РФ, 1999. — 55 с.
4. Унифицированные методы анализа вод / под ред. Лурье Ю. Ю. — М.: Химия, 1971. — 448 с.
5. Муравьев А. Г. Руководство по определению показателей качества воды полевыми методами. — СПб.: Крисмас+, 2004. — 477 с.
6. ПНДФ 14.1:2.4.123-97 КХА вод. МВИ биохимической потребности в кислороде после n -дней инкубации (БПК_{полн}) в поверхностных пресных, подземных (грунтовых), питьевых, сточных и очищенных сточных водах. — М.: Гос. комитет РФ по охране окружающей среды, 2004. — 18 с.
7. Цыганок В. М. Определение влияния исследуемых веществ на процессы естественного самоочищения при гигиеническом нормировании в области санитарной охраны водоёмов: Сб. науч. трудов НИИ гигиены им. Ф. Ф. Эрисмана. — М., 1974. С. 55—58.
8. ПНДФ 14.1:2.1-95 Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов аммония в очищенных сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера. — М.: Гос. комитет РФ по охране окружающей среды, 2004. — 13 с.
9. ПНДФ 14.1:2.3-95 Методика выполнения измерений массовой концентрации нитрит-ионов в природных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Грисса. — М.: Гос. комитет РФ по охране окружающей среды, 2004. — 13 с.
10. ПНДФ 14.1:2.4-95 Методика выполнения измерений массовой концентрации нитрат-ионов в природных и сточных водах фотометрическим методом с салициловой кислотой. — М.: Гос. комитет РФ по охране окружающей среды, 2004. — 13 с.
11. ГОСТ 33044-2014 Принципы надлежащей лабораторной практики. — М.: Стандартинформ, 2014. — 18 с.
12. МР № 2166-80 Методические рекомендации по использованию поведенческих реакций животных в токсикологических исследованиях для целей гигиенического нормирования / под общ. ред. Буркацкой Е. Н., Витер В. Ф., Тимофеевской Л. А., Балынина Е. С., Веселовской К. А., Шашкиной Л. Ф., Голубевой М. И. — Киев, 1980. — 46 с.
13. Лакин Г. Ф. Биометрия. — М.: Высшая школа, 1990. — 350 с.

Ecological and toxicological assessment of the water reservoirs contamination risk by the basic lead-nickel salt of phthalic acid

A. A. MASLENNIKOV, S. A. DEMIDOVA, L. YU. BOCHAROVA, V. V. KLAUCHEK,
V. A. ANTONOV

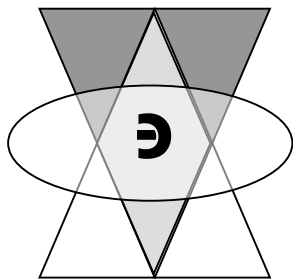
Federal State Unitary Enterprise "Research Institute of Hygiene,
Toxicology and Occupational Pathology" at Federal Medical and Biological Agency,
Volgograd, Russia

For the first time, the comprehensive experimental assessment of the hazard of the solid rocket fuel new component in the water of reservoirs has been carried out. It was found that the toxicant caused changes in the organoleptic and general sanitary properties of water. In experiments on laboratory animals, it was revealed that the single intragastric injection of the xenobiotic led to the change in the number of hematological parameters. The data obtained were taken into account when justifying the MPC for the basic lead-nickel salt of phthalic acid in this ecosystem.

Keywords: water, basic lead-nickel salt of phthalic acid, organoleptic and sanitary regime of water reservoirs, threshold of acute general toxicity.

Bibliography — 13 references.

Received February 10, 2021



Чрезвычайные ситуации, экологическая оценка их последствий

УДК 504.064.47:628.475.3

DOI: 10.52190/2073-2589_2021_2_29

Оценка эколого-экономических показателей плазменной технологии переработки медицинских отходов

Е. В. АЛМАЗОВ; М. И. МОРОЗЕНКО, канд. техн. наук

Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»,
г. Калуга, Россия

Произведен расчет показателей экономической эффективности плазменной переработки медицинских отходов. Полученные показатели предотвращенного экологического ущерба и срока окупаемости капитальных вложений свидетельствуют об экономических преимуществах плазменной технологии переработки медицинских отходов.

Ключевые слова: медицинские отходы, плазменный метод утилизации, переработка отходов, обеззараживание отходов, плазменный пиролиз, токсичные вещества, синтез-газ.

Переработка медицинских отходов приобретает особую значимость во всем мире. Увеличиваются номенклатура применяемых препаратов, объемы и степень опасности отходов, образуемых в результате деятельности медицинских учреждений. В связи с этим возрастает опасность эпидемий.

Широко практикуется сжигание отходов. Однако неправильное сжигание или сжигание несоответствующих материалов приводит к выбросу в атмосферу загрязняющих веществ и образованию зольных остатков. Сжигаемые материалы, содержащие хлор или обработанные хлором, могут образовывать диоксины и фураны, которые являются канцерогенами для организма человека и связаны с целым рядом неблагоприятных последствий для здоровья [1, 2].

В медицинских организациях общего профиля доля отходов классов Б и В в общем количестве отходов составляет не более 20 %.

Большую часть (от 70 %) медицинских отходов составляют отходы класса А. На отходы классов Г и Д приходится 5–10 % в зависимости от профиля медицинской организации.

Данные значения варьируются в зависимости от многих факторов, однако для медицинских организаций схожей структуры и направленности их соотношение остается практически неизменным.

Ориентировочные нормативы образования отходов в лечебно-профилактических учреждениях изменяются в зависимости от ряда факторов:

- профиля медицинского учреждения (в инфекционных и противотуберкулезных и микологических лечебно-профилактических учреждениях реальный объем отходов существенно превышает ориентировочный норматив для стационаров общего профиля);
- структуры медицинского учреждения (при наличии в составе лечебно-профилактических учреждений некоторых специализированных подразделений отмечается увеличение объема отдельных фракций отходов; например, отходы отделения гемодиализа, станции переливания крови и экстракорпоральной гемокоррекции характеризуются исключительно высоким содержанием полимерных материалов);
- технических и финансовых возможностей медицинского учреждения;
- благоустройства здания медицинского учреждения.

Из пяти классов отходов (А, Б, В, Г, Д) наиболее опасные отходы классов Б (опасные) и В (чрезвычайно опасные) необходимо обеззараживать.

Отходы класса Г токсичны. Их утилизация является наиболее сложной и должна проводиться в строгом соответствии с правилами.

Алмазов Евгений Вячеславович, магистрант кафедры "Экология и промышленная безопасность".

E-mail: szenek97@mail.ru

Морозенко Мария Ивановна, доцент кафедры "Экология и промышленная безопасность".

E-mail: szenek97@mail.ru

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2021 г.

© Алмазов Е. В., Морозенко М. И., 2021

Отходы класса Д — это радиоактивные вещества, уничтожить которые невозможно. Они чрезвычайно опасны. Их обезвреживание осуществляется по методикам, используемым в атомной промышленности.

Мусор классов Б и В предварительно дезинфицируют и помещают в одноразовую тару. Она должна быть герметичной. При сборе таких отходов запрещается заполнение пакета более чем на три четверти [3].

Выбор методов безопасного обеззараживания отходов класса Б зависит от мощности и профиля медицинской организации, наличия установок по обезвреживанию отходов, способа уничтожения отходов, принятого на административной территории (сжигание, вывоз на полигоны, утилизация).

Обеззараживание отходов класса Б может осуществляться централизованным или децентрализованным способом.

Отходы класса В обеззараживаются только децентрализованным способом. Хранение и транспортирование необеззараженных отходов класса В не допускаются.

Термическое уничтожение медицинских отходов классов Б и В можно осуществлять децентрализованным способом (инсинераторы или другие установки термического обезвреживания, предназначенные к применению в этих целях). Термическое уничтожение обеззараженных медицинских отходов классов Б и В можно осуществлять централизованным способом (мусоросжигательный завод). Термическое уничтожение необеззараженных отходов класса Б можно осуществлять централизованным способом, в том числе на отдельном участке мусоросжигательного завода.

Существует масса различных методов утилизации медицинских отходов. Все эти методы условно можно разделить на термические и альтернативные.

Инсинерация — это контролируемый процесс сжигания медицинских отходов в специальной печи (инсинераторе). Преимуществами инсинераторов являются возможность обрабатывать практически любые отходы (включая значимые количества биомассы), что недоступно другим видам утилизаторов, и почти полное уничтожение отходов (зольный остаток, как правило, не превышает 5 % от исходного объема).

Существенный недостаток инсинерации — рискованная экологичность установок такого рода. Несмотря на заверения производителей в исключительной безопасности выходящих газов, по данным из различных источников, сохраняется опасность выделения, например, диоксинов, которые в несколько десятков раз токсичнее цианистого калия. Современные производители принимают всевозможные меры для снижения токсичности установок, но пока ни один из них не представил убедительных доказательств их полной безопасности, все ограничивается теоретическими выкладками. Зола из инсинераторов также крайне токсична, но очень часто на нее не обращают должного внимания.

Несмотря на то что сжигатели пока являются наиболее распространенными устройствами для обработки медицинских отходов, их количество во всем мире неуклонно снижается.

Также к недостаткам данного рода установок можно отнести высокую стоимость оборудования (современные мусоросжигательные технологии являются наиболее дорогим подходом в системе управления отходами: стоимость строительства современной мусоросжигательной установки может составлять несколько миллионов долларов США).

Альтернативой инсинераторам являются аппараты, которые также можно отнести к термическим уничтожителям, — установки плазменного пиролиза. Существенное их отличие от инсинераторов состоит в том, что сжигание в камере такой установки происходит без доступа кислорода (процесс пиролиза), в результате чего исключается образование в процессе термического разложения отходов токсических веществ, которые, по сути, являются продуктами окисления входящих в состав медицинских отходов галогеновых соединений. Кроме того, образующиеся в результате пиролиза горючие газы можно использовать для генерации энергии [4].

Так как образование токсинов в пиролизных установках сведено к несущественному минимуму (что подтверждается европейскими сертификатами безопасности), отпадает необходимость в громоздких дорогостоящих системах очистки и фильтрации. В подавляющем большинстве случаев достаточно установить простой скруббер для улавливания пыли.

Необходимо отметить, что установки пиролиза могут работать в прерывистом режиме, т. е. их можно запускать по мере накопления достаточного количества отходов.

Материалы и методы

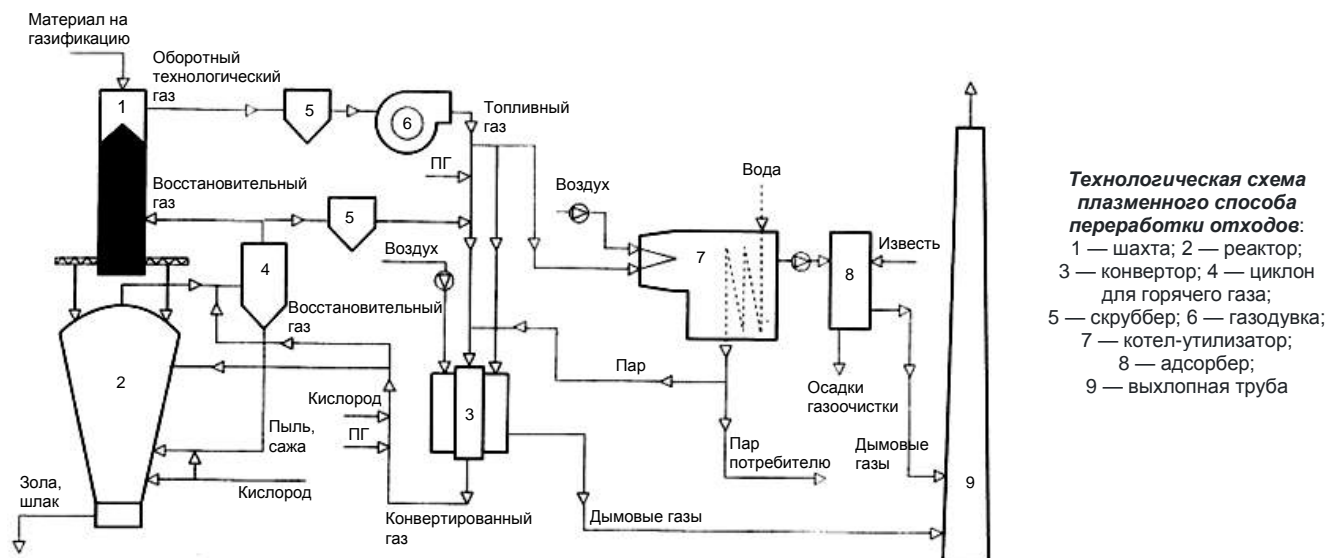
Для оценки выбрана схема, которая относится к способу переработки отходов перерабатывающих, коммунальных, промышленных и других производств, содержащих органику, а также медицинских отходов классов Б и В.

Технологическая схема плазменного способа переработки отходов представлена на рисунке.

Отходы, проходя предварительную сепарацию с отделением стекол, керамики и металлов, в виде материала на газификацию поступают во влажном состоянии в шахту 1. В шахте под действием восстановительного газа, перемещающегося противоположно отходам, они сушатся и частично осуществляется пиролиз органики. Затем шнеком отходы направляются в реактор 2 с последующим перемешиванием, что улучшает процесс пиролиза под действием газифицирующих компонентов восстановительного газа, полученных ранее методом парокислотной или кислородной конверсии метана.

Отходящие из реактора 2 газы поступают в циклон для горячего газа 4 и после шахтной печи 1 и скруббера 5 в качестве компонента смеси направляются в конвертор 3 и котел-утилизатор 7.

Перемешиваемая реакционная масса в нижней части реактора 2 подвергается термическому удару, возникающему за счет поступления пыли, сажи и кислорода. Адсорбированные на частицы основные количества диоксинов, фуранов и других экологически вредных компонентов во всей массе при контакте с кислородом мгновенно выгорают. Зола и шлак становятся экологически безопасными.



Газы, отходящие из шахтной печи 1, образуют оборотный технологический газ, который для очистки посредством газодувки 6 направляется в скруббер 5, а после газодувки 6 разделяется на два потока. Первый поток с частичным добавлением как кислорода и природного газа, так и пыли и газа из циклона 4 направляется в конвертор 3, куда одновременно поступают атмосферный воздух и топливный газ для отопления конвертора 3. Второй поток оборотного технологического газа в виде "топливного газа" частично направляется в конвертор 3, а частично — в котел-утилизатор 7, где, смешиваясь с воздухом, сгорает, образуя пар, который используется как для конверсии углеводорода в конверторе 3, так и поступает к потребителям на бытовые и производственные нужды или в качестве синтез-газа направляется в процесс производства метанола, диметилэфира, моторного топлива и т. д. [5, 6].

Отходящие газы из котла-утилизатора 7 поступают в адсорбер 8, где контактируют с мелкозернистой известью, в результате чего улавливаются остатки диоксинов и фуранов. Дымовые газы после очистки в адсорбере 8, а также после конвертора поступают в выхлопную трубу 9, а затем в экологически безопасном состоянии выбрасываются в атмосферу.

Способ переработки бытовых и промышленных отходов включает в себя их загрузку с предварительной сепарацией путем отделения стекла, бетона, керамики и металла, сушку с частичным пиролизом органики в шахтной печи и перемешивание перерабатываемой массы отходов с дальнейшим их пиролизом. Последний отличается воздействием восстановительных плазмохимических компонентов, получаемых путем парокислородной конверсии метана с увеличенным расходом пара и подаваемых противотоком перемещающимся отходам. Оборотный технологический газ, который отходит из шахтной печи, очищается в скрубберах. Из него выделяется топливный газ, подаваемый как в конвертор метана, так и в котел-утилизатор. Восстановительный газ получается с частичным добавлением природного газа и кислорода. Отходящие газы из котла-

утилизатора очищаются в адсорбере путем контакта с мелкозернистой известью. Часть образующихся восстановительных газов расходуется в нижней части реактора во время мгновенного теплового удара, осуществляемого путем сжигания сажепылевых частиц, поступающих из циклона для горячего газа, с осажденными на них диоксинами, фуранами и другими вредными компонентами в атмосфере кислорода. При этом образующиеся восстановительные газы могут направляться также в качестве синтез-газа в производство метанола, диметилэфира, моторного топлива и других продуктов.

Результаты и их обсуждение

Расчет показателей экономической эффективности проведен по методике [7]. Производительность завода по переработке отходов составляла 10 т/ч. В табл. 1 приведены затраты на оборудование и монтаж очистных сооружений.

По результатам расчетов составлена табл. 2.

Таким образом, единовременные капитальные затраты составляют 13 671 385,6 руб.

Результаты расчетов платы за выброс загрязняющих веществ в атмосферу приведены в табл. 3 и 4.

Плата за выбросы загрязняющих веществ:

$$P_{\text{НС}} = 53,6 + 3\,828\,780,73 = 3\,828\,834,33 \text{ руб.}$$

Предотвращенный экологический ущерб рассчитывается как разность плат за выбросы при сжигании отходов и при плазменном методе утилизации отходов:

$$P_{\text{ущ}} = 3\,828\,834,33 - 53,60 = 3\,828\,780,73 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости капитальных вложений

$$T = \frac{13\,671\,385,6}{3\,828\,780,73} = 3,8 \text{ г.}$$

Итак, согласно проведенным расчетам срок окупаемости рассмотренной разработки составит 3,8 г.

Таблица 1

Стоимость оборудования и затраты на его монтаж

Наименование оборудования	Стоимость, руб.	Затраты на монтаж, руб.	Общая цена, руб.
Шахта	55 000	5 500	60 500
Плазменный газификатор	5 200 000	520 000	5 720 000
Конвертор	60 000	6 000	66 000
Циклон	287 000	2 870	289 870
Скруббер	720 000	7 200	727 200
Газодувка	320 000	32 000	352 000
Котел-утилизатор	235 000	23 500	258 500
Адсорбер	285 000	28 500	313 500
Выхлопная труба	105 000	10 500	115 500
Итого	7 267 000	636 070	7 903 070

Таблица 2

Капитальные затраты

Элементы затрат	Условные обозначения	Расход, руб.
Цена объекта	Ц	8 535 315,6
Затраты на монтаж	З _{тр}	636 070
Стоимость производственного помещения	К _{п.пом.}	4 500 000
Итого	К	13 671 385,6

Таблица 3

Плата за выброс загрязняющих веществ при сжигании отходов [8]

Вещества	Концентрация веществ, мг/л		Плата за выброс загрязняющих веществ, руб.		Ставки платы, руб.
	В пределах лимитов	Сверх лимитов	В пределах лимитов	Сверх лимитов	
Оксид азота	0,04	0,36	5,552	1249,200	138,8
Диоксид серы	0,05	0,85	2,270	964,750	45,4
Свинец	0,001	0,399	18,244	181984,897	18244,1
Кадмий	0,0003	0,5997	4,428	221278,805	14759,3
Ртуть	0,0003	0,0697	5,473	31790,3444	18244,1
Мышьяк	0,0003	0,0397	0,547	1809,923	1823,6
Хром	0,0015	0,1985	5,470	18099,230	3647,2
Медь	0,001	0,079	5,473	10810,162	5473,5
Никель	0,001	0,079	5,473	10810,162	5473,5
ПХДД/Ф	$0,5 \cdot 10^{-10}$	$9,99 \cdot 10^{-6}$	0,67	3349983	$1,34 \cdot 10^{10}$
Итого			53,60	3828780,73	-

Таблица 4

Плата за выброс загрязняющих веществ при плазменном методе утилизации отходов [8]

Вещества	Концентрация веществ, мг/л		Плата за выброс загрязняющих веществ, руб.		Ставки платы, руб
	В пределах лимитов	Сверх лимитов	В пределах лимитов	Сверх лимитов	
Оксид азота	0,04	—	5,552	—	138,8
Диоксид серы	0,05	—	2,270	—	45,4
Свинец	0,001	—	18,244	—	18244,1
Кадмий	0,0003	—	4,428	—	14759,3
Ртуть	0,0003	—	5,473	—	18244,1
Мышьяк	0,0003	—	0,547	—	1823,6
Хром	0,0015	—	5,470	—	3647,2
Медь	0,001	—	5,473	—	5473,5
Никель	0,001	—	5,473	—	5473,5
ПХДД/Ф	$0,5 \cdot 10^{-10}$	—	0,67	—	$1,34 \cdot 10^{10}$
Итого			53,60	—	-

Выводы

Обозначены затратные направления реализации рассматриваемой технологии плазменной переработки медицинских отходов.

Основные технико-экономические показатели, отражающие инвестиционную привлекательность, имеют следующие значения:

- единовременные капитальные затраты 13 671 385,6 руб.;
- предотвращенный экологический ущерб 3 828 780,73 руб.;
- срок окупаемости капитальных вложений 3,8 г.

Полученные результаты позволяют считать исследуемую технологию переработки медицинских отходов экономически эффективной как с точки зрения инвестора, так и с точки зрения общества. Утилизация опасных медицинских отходов с применением технологии плазменной переработки обеспечит:

- получение значительного эколого-экономического эффекта;
- снижение экологического ущерба;
- производство, работающее на энергии, получаемой от выброса мусора;
- минимальную численность обслуживающего персонала;
- предотвращение выделения токсичных веществ и получение из отходов вторичного синтез-газа,

используемого для генерации тепловой и электрической энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голубев Д. А., Селезнев В. Г., Мироненко О. В. Практическое пособие по обращению с отходами лечебно-профилактических учреждений — СПб., 2001. С. 182—184.
2. Котова В. А., Коробейникова Е. С. Проблемы утилизации медицинских отходов // Вестник Башкирского государственного медицинского университета. 2014. С.
3. Челноков А. А., Ющенко Л. Ф., Жмыхов И. Н., Юрачик К. К. Обращение с отходами: учеб. пособие. — Минск: Вышэйшая школа, 2018. С. 356—361.
4. Морозенко М. И., Кусачева С. А., Черняев С. И. Оценка технико-экономических показателей технологии пароплазменной газификации твердых коммунальных отходов, а также отходов производства и потребления // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 6—1. С. 60—64.
5. Моссэ А. Л., Горбунов А. В., Савчин В. В. Электродуговые плазменные устройства для переработки и уничтожения токсичных отходов: сб. трудов IV Междунар. симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии. 13—18 мая 2005 г., Иваново. С. 650—652.
6. Падалко О. В. Плазменная газификация отходов — правильный выбор // Твердые бытовые отходы. 2009. № 5. С. 70—77.
7. Мамбетшаев С. В. Методические указания по выполнению организационно-экономической части дипломного проекта специальности "Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов". — Калуга: КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. С. 12—19.
8. Постановление Правительства РФ от 13.09.2016 № 913 (ред. от 24.01.2020) "О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах".

Estimation of environmental and economic indicators of plasma technology of medical waste recycling

E. V. ALMAZOV, M. I. MOROZENKO

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Bauman Moscow State Technical University" (Kaluga Branch), Kaluga, Russia

The paper calculates the indicators of the economic efficiency of plasma recycling of medical waste. The indicators of prevented environmental damage and the payback period of capital investments indicate the economic advantages of plasma technology of medical waste recycling.

Keywords: medical waste, plasma disposal method, waste recycling, waste disinfection, plasma pyrolysis, toxic substances, synthesis gas.

Bibliography — 8 references.

Received April 1, 2021

УДК 632.152

DOI: 10.52190/2073-2589_2021_2_34

Оценка экологического состояния снежного покрова в 30-километровой зоне Новолипецкого металлургического комбината

Д. Н. КУРБАКОВ; В. К. КУЗНЕЦОВ, д-р биол. наук; Е. В. СИДОРОВА; Н. В. АНДРЕЕВА;
А. В. САРУХАНОВ; Н. В. НОВИКОВА; Е. О. КРЕЧЕТНИКОВА
ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии, г. Обнинск, Калужская обл., Россия

Проведен анализ уровня загрязнения снежного покрова в 30-километровой зоне крупнейшего металлургического завода РФ ПАО "Новолипецкий металлургический комбинат" (г. Липецк). Определен полиэлементный состав твердой фракции, пылевая нагрузка, приток тяжелых металлов, коэффициенты концентрирования и суммарные показатели загрязнения тяжелыми металлами, а также катионный и анионный составы талых вод. Дана оценка воздействия металлургического завода на снежный покров. Показана зависимость состава выбросов от типа производства, направления и расстояния от источника загрязнения.

Ключевые слова: мониторинг, промышленная агломерация, тяжелые металлы, снежный покров, черная металлургия, гидрохимия.

Интенсивное развитие промышленности ведет к загрязнению окружающей среды, в том числе и сельскохозяйственных угодий, химическими веществами. Липецкая область по объему выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников находится на первом месте в центральном федеральном округе [1]. В 2018 г. предприятиями города Липецка выброшено 286 тыс. т загрязняющих веществ, из которых 96,5 % приходится на ПАО "Новолипецкий металлургический комбинат" [2]. При этом тяжелые металлы (ТМ) являются одним из основных видов химического загрязнения агроэкосистем. Доля их поступления от техногенных источников составляет от 70 до 95 % [3].

Наиболее крупными источниками загрязнения в Липецкой промышленной агломерации (ЛПА) являются ПАО "Новолипецкий металлургический комбинат" (НЛМК), ОАО "Липецкий металлургический завод "Свободный сокол", ОАО "Липецкий тракторный завод" (ЛТЗ), ЗАО "Липецкий цементный завод" [4].

Курбаков Дмитрий Николаевич, научный сотрудник.

E-mail: kurbakov007@gmail.com

Кузнецов Владимир Константинович, заведующий лабораторией.

E-mail: vkuzn@yandex.ru

Сидорова Елена Валентиновна, научный сотрудник.

E-mail: sidelena@yandex.ru

Андреева Наталья Викторовна, научный сотрудник.

E-mail: NVA2803@yandex.ru

Саруханов Артем Владимирович, младший научный сотрудник.

E-mail: mrrino2008@mail.ru

Новикова Наталья Васильевна, младший научный сотрудник.

E-mail: kurbakov007@gmail.com

Кречетникова Евгения Олеговна, младший научный сотрудник.

E-mail: kurbakov007@gmail.com

Статья поступила в редакцию 16 марта 2021 г.

© Курбаков Д. Н., Кузнецов В. К., Сидорова Е. В., Андреева Н. В., Саруханов А. В., Новикова Н. В., Кречетникова Е. О., 2021

Из множества различных методов оценки состояния атмосферного воздуха один из самых простых и доступных — мониторинг снежного покрова [5, 6]. Этот метод является относительно дешевым и информативным индикатором загрязнения выбросов промышленных предприятий автотранспорта в зимний период. Снег обладает высокой сорбционной способностью, не активен ни в химическом, ни в биологическом отношении и является носителем не только влажных, но и сухих выпадений, поэтому он дает объективную оценку всех атмосферных загрязнений за зимний период [6, 7].

Концентрация загрязняющих веществ в снежном покрове на 2—3 порядка выше, чем в атмосферном воздухе [8]. При этом снежный покров и почва отражают различные временные характеристики загрязнения атмосферного воздуха, связанные с изменениями технологического процесса, эффективностью пылегазоулавливания, влиянием метеорологических и других факторов [9].

Изучение распределения металлов в снежном покрове и почве позволяет выявить источники загрязнения, дифференцировать зоны их появления по интенсивности воздействия и дальности распространения выбросов.

Цель исследования — оценка особенностей загрязнения снежного покрова в различных зонах воздействия предприятий Липецкой промышленной агломерации в зависимости от направления и расстояния от основных источников загрязнения, а также проведение анализа полиэлементного состава загрязнения выбросов промышленных предприятий.

Задачи исследования входили:

- определение характера загрязнения и полиэлементного состава твердой и жидкой фракций снежного покрова;
- оценка степени воздействия выбросов промышленных предприятий на подстилающую поверх-

ность в зимний период времени на разных расстояниях и в разных направлениях от источника загрязнения;

- оценка пылевой нагрузки и показателей суммарного загрязнения снежного покрова;
- общая санитарно-гигиеническая оценка загрязнения снежного покрова.

Методы исследования

Объектом исследований являлся снежный покров наземных экосистем, входящих в 30-километровую зону воздействия металлургического комбината ПАО "НЛМК" как основного источника загрязнения атмосферного воздуха.

В мониторинге загрязнения атмосферного воздуха использовали так называемые природные планшеты, к которым относится снежный покров в качестве депонирующей среды техногенных загрязнений [10].

Пробоотбор проводили по нерегулярной сети отбора по стандартной методике при температуре от 0 до +1 °С. Снежный покров сохранялся целостным, таяние снега только начиналось].

Согласно архиву погоды сайта gr5.ru снежный покров начал формироваться с 30 ноября 2018 г. [12]. Отбор проб был проведен 4–5 марта 2019 г. при температуре от 0 до +1 °С. Общий период времени от начала снегостава до дня отбора составил 102 сут. Пробы были отобраны с 11 площадок на разном удалении и в разных направлениях от предполагаемого факела выброса (рис. 1). Были охвачены основные функциональные зоны города: промышленная, парковая, сельскохозяйственная.

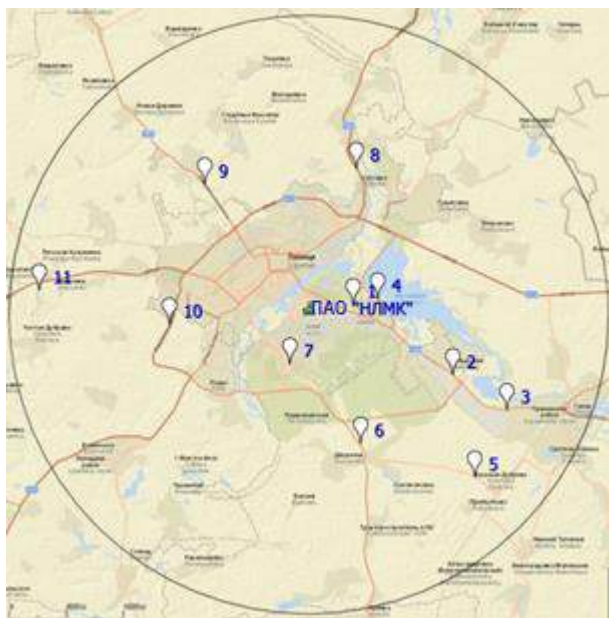


Рис. 1. Схема отбора проб снежного покрова в 30-километровой зоне воздействия ПАО "НЛМК"

Для отбора фоновых проб был выбран участок, расположенный на расстоянии 33,5 км от основного источника загрязнения.

Отбор проб снега проводили методом шурфа в полиэтиленовые мешки емкостью 30 л на всю мощ-

ность снежного покрова за исключением 5-сантиметрового слоя над почвой со стороны 50×50 см при глубине шурфа от 35 до 45 см. Вес пробы составлял 15–25 кг, что позволяло получить при оттаивании 8–20 л воды. Для прогнозирования загрязнения почвы и сточных вод были созданы условия медленного таяния без подогрева проб при комнатной температуре. Твердую и жидкую фракции разделяли фильтрованием через беззольные фильтры с диаметром пор 2 мкм. Анализ твердого осадка, который состоит из атмосферной пыли, осаждаемой на поверхность снегового покрова, рассчитывали по разнице в массе фильтра до и после фильтрования.

Определение элементов проводили методом атомной спектроскопии в индуктивно-связанной плазме (ICP-OES). Для оценки содержания ТМ (Cd, Pb, Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Mn, Fe) в растворимой фракции и твердом осадке снега использовали коэффициенты техногенной концентрации по сравнению с фоном [6]:

$$K_c = C_i / C_{K1}, \quad (1)$$

где K_c — коэффициент концентрации;

C_i — концентрация элемента в твердом осадке снега, отобранного на пробных площадках;

C_{K1} — концентрация элемента в твердом осадке снега фоновой территории ($K1$).

Для определения степени полиэлементного загрязнения снежного покрова рассчитывали суммарный показатель загрязнения [6]:

$$Z_c = \sum K_{ci} - (n - 1), \quad (2)$$

где Z_c — показатель суммарного загрязнения;

K_{ci} — коэффициенты концентрации элементов;

n — число определяемых ТМ.

На основе экспериментальных данных проводили расчет величины пылевой нагрузки:

$$P_{\text{пыл}} = P_{\text{ос}} / (St), \quad (3)$$

где $P_{\text{пыл}}$ — пылевая нагрузка, мг/(м²·сут);

$P_{\text{ос}}$ — вес твердого снегового осадка, мг;

S — площадь снегового шурфа, м²;

t — количество суток от начала снегостава до дня отбора проб.

Расчет среднесуточного притока ТМ с пылевыми взвешенными частицами в атмосферном воздухе на снежный покров осуществляли следующим образом:

$$P_{\text{об}} = CP_{\text{пыл}} \quad (4)$$

где $P_{\text{об}}$ — приток ТМ, мг/(км²·сут);

C — содержание элемента в твердом осадке снега, мг/кг;

$P_{\text{пыл}}$ — пылевая нагрузка, кг/(км²·сут).

Для сопоставления полученных данных с характеристикой пылевых выпадений на фоновой терри-

тории рассчитывали коэффициент относительной пылевой нагрузки элемента:

$$K_p = P_{об} / P_{ф}, \quad (5)$$

при $P_{ф} = C_{ф} P_{п.ф}$,

где $P_{ф}$ — нагрузка элемента в составе твердых выпадений на фоновой территории;

$C_{ф}$ — фоновое содержание исследуемого элемента;

$P_{п.ф}$ — пылевая фоновая нагрузка.

Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов ТМ по их содержанию в снежном покрове и почве устанавливают различные уровни загрязнения почв и снежного покрова металлами и пылью (табл. 1).

Таблица 1

Нормативные уровни загрязнения почв и снежного покрова металлами и пылью [6]

Уровень	Суммарный показатель загрязнения почв	Суммарный показатель загрязнения снежного покрова Z_c	Выпадение пыли $P_{пыл}$, кг/(км ² ·сут)	Выпадение металлов, мг/(км ² ·сут)
Низкий	8—16	32—64	100—250	1000
Средний	16—32	64—128	250—450	1000—5000
Высокий	32—128	128—256	450—850	5000—10000
Очень высокий	>128	>256	>850	>10000

Статистическую обработку данных проводили с использованием программных пакетов Microsoft Excel и Statistica 10.0. Парагенетические ассоциации элементов с общими областями накопления и выноса выделяли с помощью кластерного анализа (алгоритм Single Linkage).

Основная часть

Исследования снежного покрова показали, что основным компонентом твердых пылевидных выпадений является железо, количество которого достигает 75,3 %. Содержание Al, Mn, Zn, Pb, Cr и Ni составляет 12,5; 6,5; 3,3; 0,53; 0,54 и 0,33 %, соответственно. Основная доля ТМ, выпадающих с зимними осадками, содержится в форме труднорастворимых соединений, которые являются потенциально опасными для почв и растений после воздействия почвенной кислотности и различных микроорганизмов.

Содержание водорастворимой фракции ТМ в снежном покрове зоны воздействия ПАО "НЛМК" находится в микроконцентрациях, однако в ближней 4—6-километровой зоне их содержание в 2—10 раз выше по сравнению с фоном, что говорит о слабой растворимости твердой фракции выпадений, с одной стороны, и повышенной техногенной нагрузке на снежный покров ближней зоны, с другой стороны (табл. 2).

Таблица 2

Содержание тяжелых металлов в твердой и жидкой фракциях снежного покрова зоны воздействия ПАО "НЛМК"

№	Направление, расстояние, км	Содержание тяжелых металлов в фильтрате снежного покрова, мг/кг								
		Cd	Co	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Mn	Fe
1	С-В, 4	<u>13,6*</u> 0,0006**	<u>5,7</u> 0,0018	<u>70,6</u> 0,005	<u>3084</u> 0,0896	<u>255</u> 0,0353	<u>92</u> 0,0053	<u>384</u> 0,0035	<u>2519</u> 0,0184	<u>150180</u> 0,072
2	В, 13,5	<u>10,9</u> 0,0003	<u>4,2</u> 0,0004	<u>43,7</u> 0,0024	<u>121</u> 90,0185	<u>139</u> 0,0139	<u>22</u> 0,0030	<u>58</u> 0,0020	<u>1712</u> 0,0051	<u>66875</u> 0,039
3	В, 19	<u>9,87</u> 0,0003	<u>2,9</u> 0,0005	<u>26,7</u> 0,0026	<u>993</u> 0,0114	<u>120</u> 0,0095	<u>18</u> 0,0012	<u>39</u> 0,0022	<u>1326</u> 0,0028	<u>35969</u> 0,022
4	С-В, 5,7	<u>13,2</u> 0,0006	<u>5,3</u> 0,0010	<u>39,9</u> 0,0030	<u>956</u> 0,0623	<u>122</u> 0,0110	<u>65</u> 0,0049	<u>150</u> 0,0043	<u>3550</u> 0,0231	<u>118326</u> 0,068
5	Ю-В, 20	<u>3,35</u> 0,0005	<u>2,6</u> 0,0007	<u>16,2</u> 0,0012	<u>486</u> 0,0083	<u>45</u> 0,0071	<u>20</u> 0,0006	<u>45</u> 0,0012	<u>1284</u> 0,0048	<u>31008</u> 0,022
6	Ю-В, 12	<u>8,15</u> 0,0001	<u>3,7</u> 0,0004	<u>17,4</u> 0,0016	<u>545</u> 0,0128	<u>80</u> 0,0024	<u>24</u> 0,0007	<u>64</u> 0,0008	<u>1896</u> 0,0023	<u>41205</u> 0,018
7	Ю-З, 4,5	<u>9,74</u> 0,0006	<u>5,6</u> 0,0014	<u>26,8</u> 0,0039	<u>1507</u> 0,0289	<u>90</u> 0,0273	<u>76</u> 0,0044	<u>154</u> 0,0047	<u>2364</u> 0,0113	<u>123824</u> 0,042
8	С-В, 13,5	<u>4,44</u> 0,0003	<u>3,0</u> 0,0004	<u>14,6</u> 0,0015	<u>566</u> 0,0151	<u>72</u> 0,0030	<u>23</u> 0,0004	<u>18</u> 0,0011	<u>1446</u> 0,0055	<u>37053</u> 0,026
9	С-З, 14,5	<u>5,94</u> 0,0003	<u>4,6</u> 0,0006	<u>22,7</u> 0,0010	<u>543</u> 0,0141	<u>71</u> 0,0030	<u>26</u> 0,0008	<u>23</u> 0,0015	<u>1457</u> 0,0045	<u>33740</u> 0,025
10	З, 12	<u>9,88</u> 0,0003	<u>5,7</u> 0,0004	0,0019	<u>562</u> 0,0139	<u>73</u> 0,0034	<u>234</u> 0,0005	<u>24</u> 0,0015	<u>1432</u> 0,0034	<u>31238</u> 0,017
11	С-З, 33,5	<u>1,74</u> 0,0003	<u>1,3</u> 0,0004	<u>6,8</u> 0,0012	<u>207</u> 0,0103	<u>15</u> 0,0036	<u>12</u> 0,0005	<u>25</u> 0,0012	<u>435</u> 0,0039	<u>10090</u> 0,019

Примечание: * — твердая фракция; ** — жидкая фракция.

По степени превышения концентраций в снежном покрове над фоном тяжелые металлы составляют последовательность: $Pb > Fe > Cr > Zn > Cu > Ni > Co > Cd > Mn$. При этом основная часть выпадений происходит в ближней 4—6-километровой зоне, где наблюдается высокая степень пылевой нагрузки (рис. 2). С увеличением расстояния от источника загрязнения до 10—12 км она переходит в среднюю. Далее фиксируется низкая степень пылевой нагрузки.

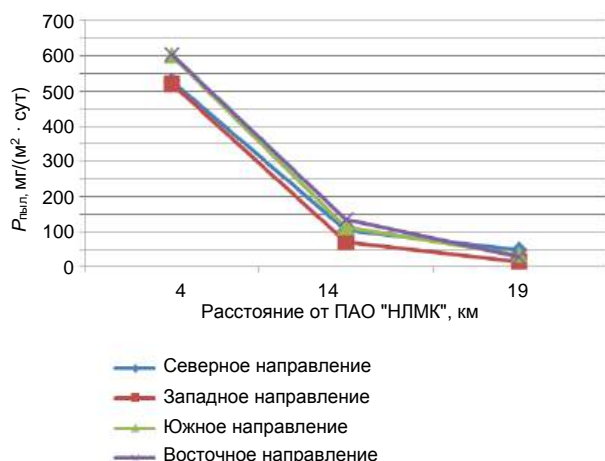


Рис. 2. Пылевая нагрузка на снежный покров в зависимости от расстояния и направления от ПАО "НЛМК"

Следует отметить, что ТМ имеют различную мобильность и из факела выброса промышленных предприятий распространяются на неодинаковое расстояние. Согласно расчетам М. Е. Берлянда [5] при высоких дымовых трубах наибольшая концентрация выбросов создается в приземном слое атмосферы на расстоянии, кратном 10—40 высотам трубы. С учетом высоты трубы ПАО "НЛМК" 250 м максимальное количество выбросов выявлено на дистанции 4—7 км.

В условиях полиэлементного состава загрязнителей в твердом осадке снега для выявления разных зон загрязнения использовали коэффициенты техногенной концентрации, которые в зависимости от вида металла, расстояния и направления от источников загрязнения варьируют в диапазоне 1—16-кратных значений относительно фона (табл. 3). При этом присутствие разных видов тяжелых металлов в твердой фракции снежного покрова определяется технологическими особенностями металлургических предприятий.

Коэффициенты концентрации железа в твердой фракции снежного покрова, до 15 раз превышающие фон, обуславливаются его главенствующей ролью в составе производимых стали и чугуна. Наличие никеля в сплавах придает им разнообразные ценные свойства, удовлетворяющие самым высоким требованиям современной техники, но способствует превышению загрязнения снежного покрова над фоном в 2—8 раз. Использование хрома и цинка в качестве присадок при производстве различных марок стали также способствует их наличию в твердых выпадениях различных площадок в количестве, до 15 раз превышающем фон.

Превышение содержания меди над фоном составило от 2 до 10 раз, что, вероятно, связано с работой доменных печей и переработкой руды. Также наблюдались превышения фоновых значений кадмия (от 2 до 8 раз) и свинца (от 3 до 16 раз).

Оценку уровня химического загрязнения снежного покрова проводили по показателям, разработанным при сопряженных геохимических и гигиенических исследованиях окружающей среды. К таким показателям относится суммарный показатель загрязнения Z_c , который определяется кратностью накопления загрязнителей относительно фоновых значений. Проведенные расчеты показали, что в ближней зоне воздействия ПАО "НЛМК" (4—6 км) имеют место средние значения суммарных показателей (Z_c 64—128), а за пределами 16 км — низкие значения (Z_c 32—64) (табл. 4).

Таблица 3

Коэффициенты техногенной концентрации ТМ в снежном покрове относительно фона

№	Направление, расстояние, км	Cd	Co	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Mn	Fe	Zc
1	С-В, 4	7,82	4,24	10,38	14,90	16,69	7,90	15,31	5,79	14,88	96,91
2	В, 13,5	6,26	3,12	6,43	5,90	9,08	1,88	2,32	3,94	6,60	45,53
3	В, 19	5,67	2,16	3,93	4,80	7,86	1,54	1,57	3,05	3,56	33,14
4	С-В, 5,7	7,59	3,96	5,87	4,62	7,97	5,59	5,98	8,16	11,72	60,46
5	Ю-В, 20	1,93	1,97	2,38	2,35	2,96	1,73	1,80	2,95	3,07	20,14
6	Ю-В, 12	4,68	2,77	2,56	2,63	5,24	2,10	2,54	4,36	4,08	29,96
7	Ю-З, 4,5	5,60	4,19	3,94	7,29	5,85	6,52	6,12	5,43	12,27	56,21
8	С-В, 13,5	2,55	2,25	2,15	2,74	4,71	1,99	0,72	3,32	3,67	23,10
9	С-З, 14,5	3,41	3,46	3,34	2,63	4,65	2,24	0,91	3,35	3,34	26,73
10	З, 12	5,68	4,28	5,54	2,72	4,78	2,04	0,95	3,29	3,10	31,38
Ср.		5,12	3,24	4,65	5,06	6,98	3,35	3,82	4,36	6,63	42,35

Таблица 4

Суммарное загрязнение тяжелыми металлами снежного покрова в зоне воздействия ПАО "НЛМК"

ТМ	Концентрация тяжелых металлов, мг/кг*		$K_c = C/C_{\Phi}$	Z_c
	Обследуемый участок	Фоновый участок		
Cd	$\frac{3,4-13,6}{8,4}$	1,74	$\frac{1,93-7,82}{5,19}$	$\frac{20,1-96,9}{42,4}$
Co	$\frac{1,3-5,7}{4,3}$	1,34	$\frac{1,97-4,28}{3,24}$	
Cu	$\frac{16,2-70,6}{31,6}$	6,8	$\frac{2,15-10,38}{4,65}$	
Zn	$\frac{486,0-3084,0}{1046}$	206,7	$\frac{2,35-14,90}{5,06}$	
Pb	$\frac{45,3-255,3}{106,7}$	15,3	$\frac{2,96-16,69}{6,98}$	
Ni	$\frac{21,9-91,9}{39,0}$	11,63	$\frac{1,54-7,90}{3,35}$	
Cr	$\frac{18,0-384,2}{95,9}$	25,1	$\frac{0,72-15,31}{3,82}$	
Mn	$\frac{1284,0-3550,0}{1898,6}$	835,0	$\frac{2,95-5,79}{4,36}$	
Fe	$\frac{31238-150180}{66942}$	10090,0	$\frac{3,07-14,88}{6,63}$	
Суммарный показатель загрязнения снежного покрова Z_c			Низкий	32—64
			Средний	64—128
			Высокий	128—256
			Очень высокий	256

* — в знаменателе стоит среднее значение.

Отмечен высокий уровень притока ТМ с пылевыми взвешенными частицами в ближней 8-километровой зоне (5000—10000 мг/(км²·сут)). Во всей остальной зоне обследования, кроме фоновых территорий, наблюдался средний уровень (1000—5000 мг/(км²·сут)) притока ТМ (преимущественно железа), что говорит о достаточно высокой степени техногенной нагрузки на снежный и почвенный покровы (табл. 5).

В результате исследований определен катионный и анионный состав талых вод снежного покрова (табл. 6). ПДК для оценки талых вод не разработан. В связи с этим ориентировались на ПДК питьевой воды (мг/л): магний 5—30; кальций 20—80; натрий 70—100; калий 1—10; хлориды 70—100; сульфаты 5—30; гидрокарбонаты 140—300. Установлено, что полученные значения не превышают ПДК для питьевой воды.

Таблица 5

Приток ТМ с пылевыми взвешенными частицами в зоне воздействия ПАО "НЛМК", мг/(км²·сут)

№	Cd	Co	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Mn	Fe	Уровень притока
1	7,6	3,2	39,4	1722,3	142,6	51,3	215	1407	83870	Высокий
2	0,3	0,1	1,1	30,0	3,4	0,5	1,4	42	1646	Средний
3	0,3	0,1	0,8	29,0	3,5	0,5	1,2	39	1051	Средний
4	8,0	3,2	24,1	576,2	73,6	39,2	91	2141	71360	Высокий
5	0,1	0,1	0,7	21,7	2,0	0,9	2,0	57	1383	Средний
6	0,9	0,4	2,0	61,2	9,0	2,7	7,2	213	4628	Средний
7	6,2	3,6	17,1	959,7	57,0	48,3	98	1506	78866	Высокий
8	0,5	0,3	1,5	60,1	7,7	2,5	1,9	154	3933	Средний
9	0,3	0,2	1,1	26,7	3,5	1,3	1,1	72	1661	Средний
10	0,7	0,4	2,7	40,6	5,3	1,7	1,7	104	2259	Средний
11	0,1	0,0	0,1	4,5	0,2	0,2	0,4	12	179	Низкий

Таблица 6

Катионный и анионный состав жидкой фракции снега в зоне воздействия ПАО "НЛМК", мг/дм³

№	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ⁴⁻	NO ³⁻	NO ²⁻	NH ⁴⁺	Cl ⁻
1	19,7	1,5	0,6	0,4	6,9	16,6	0,07	0,15	8,9
2	4,5	1,5	0,6	0,2	5,6	3,5	0,02	0,06	1,8
3	2,2	0,3	0,4	0,2	4,9	1,4	0,02	0,3	1,8
4	21,0	0,3	1,8	1,2	16,7	5,3	0,02	0,07	3,5
5	4,9	0,7	1,0	0,2	5,2	2,3	0,01	0,32	2,3
6	6,9	0,9	0,7	0,3	7,1	2,1	0	0,08	0,9
7	17,1	2,5	1,3	0,6	10,6	2,0	0,38	0,05	3,45
8	9,6	0,7	1,1	0,3	10,8	3,2	0	0,05	2,3
9	3,4	0,2	0,5	0,2	14,9	2,4	0	0,06	1,2
10	6,5	0,5	2,1	0,3	8,4	6,2	0,08	0,56	7,42
11	2,4	0,2	0,3	0,2	8,0	2,2	0	0,12	1,12

Закключение

Исследование снежного покрова, проведенное в 30-километровой зоне воздействия Липецкой промышленной агломерации с использованием разработанных в России методических документов, показало, что интенсивность загрязнения снежного покрова зависит от направления и расстояния от источников загрязнения, объемов выбросов, используемых технологий, вида производимой промышленной продукции, погодных условий и характера подстилающей поверхности.

Установлено, что максимальные концентрации поллютантов и пылевая нагрузка на снежный покров проявляются в ближней зоне воздействия на расстоянии 4–6 км от источников загрязнения в преобладающих по розе ветров направлениях. С увеличением расстояния от источника загрязнения выбросов до 10–12 км пылевая нагрузка переходит в среднюю. Далее фиксируется низкая степень пылевой нагрузки. Вместе с тем в ближней 4–6-километровой зоне воздействия ПАО "НЛМК" превышение содержания ТМ по отношению к фоновым показателям может достигать 16 раз. Основное количество ТМ содержится в форме труднорастворимых соединений, а содержание водорастворимой фракции ТМ в снежном покрове находится в микроконцентрациях.

Установлен высокий ежесуточный приток ТМ в ближней зоне воздействия ПАО "НЛМК" и средний на остальной части обследуемой территории. При этом суммарный показатель загрязнения снежного покрова Z_c достигает 96,9, что соответствует средней степени загрязнения снежного покрова.

Катионный и анионный состав талых вод во всех случаях не превышает предельно допустимых значений, установленных для питьевой воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гос. доклад "О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году". — М.: Минприроды России; НПП "Кадастр", 2019. — 844 с.
2. Доклад "Состояние и охрана окружающей среды Липецкой области в 2018 году". Управление экологии и природных ресурсов Липецкой области. — Липецк: Веда социум, 2019. — 224 с.
3. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. — М.: ИМГРЭ, 1990. — 9 с.
4. Прохорова Т. В., Кузнецов В. К., Санжаров А. И. Мониторинг загрязнения агроэкосистем в зоне воздействия Липецкой промышленной агломерации // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. — 4 с.
5. Методические указания "Полевое обследование и картографирование уровня загрязнения почвенного покрова техногенными выбросами через атмосферу". — М.: ВАСХНИЛ, Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева, 1980. — 25 с.
6. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. Утв. Главным государственным санитарным врачом СССР 15 мая 1990 г., № 5174-90, Главное санитарно-профилактическое управление МЗ СССР. — 16 с.
7. ГОСТ 17.1.5.05-85 Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков. Утв. постановлением Гос. комитета СССР по стандартам от 25 марта 1985 г., № 774. Дата введения установлена с 01.07.86.
8. Коковкин В. В., Рапута В. Ф., Романов А. Н., Морозов С. В. Исследование процессов регионального загрязнения снежного покрова городами юга Западной Сибири // Ползуновский вестник. 2011. № 4-2. С. 89–93.
9. Артемов В. М., Парцев Д. П., Сает Ю. Е. и др. Анализ состояния загрязнения снежного покрова для проектирования сети станций АНКОВ-А // Тр. ИМГРЭ. 1982. Вып. 48. С. 144–149.
10. Бояркина А. П., Бойковский В. В., Васильева Н. В. и др. Аэрозоли в природных планшетах Сибири. — Томск, 1993. — 157 с.
11. Информационно-аналитическая система [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rp5.ru/>

Assessment of the ecological state of the snow cover in the 30 km zone of the Novolipetsk Metallurgical Plant

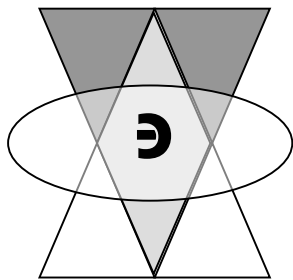
D. N. KURBAKOV, V. K. KUZNETSOV, E. V. SIDOROVA, N. V. ANDREEVA,
A. V. SARUKHANOV, N. V. NOVIKOVA, E. O. KRECHETNIKOVA
Russian Institute of Radiology and Agroecology, Oznobkino, Kaluga region, Russia

The analysis of the level of pollution of the snow cover in the 30 km zone of the largest metallurgical plant of the Russian Federation PJSC "NLMK" in Lipetsk was carried out. The polyelement composition of the solid fraction, dust load, influx of heavy metals, concentration factors and total indicators of pollution with heavy metals, as well as the cationic and anionic composition of melt water have been determined. An assessment of the impact of a metallurgical plant on snow cover is given and the dependence of the composition of emissions on the type of production, direction and distance from the source of pollution is shown.

Keywords: monitoring, industrial agglomeration, heavy metals, snow cover, ferrous metallurgy, hydrochemistry.

Bibliography — 11 references.

Received March 16, 2021



Очистка промышленных газовых выбросов

УДК 551.510

DOI: 10.52190/2073-2589_2021_2_41

Управление процессом горения топлива и токсичностью дымовых газов, выбрасываемых из нефтезаводских печей, методами многокритериальной оптимизации

^{1,2} В. Д. КАТИН, д-р техн. наук; ³ В. Ю. КОСЫГИН, д-р геол.-минер. наук;
¹ М. П. КВАСНИКОВ

¹ Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

² Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

³ Вычислительный центр Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия

Рассмотрен и обоснован метод многокритериальной оптимизации процесса горения топлива в нефтезаводских трубчатых печах. В качестве математической модели предложены система уравнений, описывающих равновесную многокомпонентную гетерогенную реагирующую систему, и обобщенный критерий оптимальности, зависящий от целого ряда частных критериев, характеризующих не только экономичность процесса горения, но и токсичность продуктов сгорания и другие факторы. Алгоритм решения задачи реализован на ЭВМ для условий сжигания мазута в нефтезаводских печах. Показано, что с увеличением содержания кислорода в сбросных газах и переходам к горению мазута в воздухе текущее значение потерь теплоты с химическим недожогом не превышает допустимых значений.

Ключевые слова: управление процессом горения, нефтезаводские печи, сжигание топлива, многокритериальная оптимизация, критерии оптимальности, продукты сгорания, алгоритм решения, токсичность, коррозионная агрессивность, дымовые газы.

В Федеральном законе "Об охране окружающей среды" приоритетным направлением является сокращение выбросов вредных веществ в атмосферу с дымовыми газами из топливосжигающих устройств, включая трубчатые технологические печи нефте-

переработки [1]. Особого внимания заслуживают вопросы уменьшения токсичности и коррозионной агрессивности продуктов сгорания, выбрасываемых из печных агрегатов. Распространенные системы регулирования экономичности процессов горения, воздействующие на соотношение топливо—воздух с коррекцией по содержанию кислорода или продуктов недожога в уходящих газах, недостаточно эффективны с точки зрения уменьшения всех отрицательных факторов, сопутствующих горению, так как не затрагивают задачи снижения коррозионной активности и токсичности дымовых газов [2—4].

Тесная связь всех проблем, возникающих при сжигании топлива, с режимами горения позволяет объединить их при решении задачи оптимизации процесса, используя методы многокритериальной оптимизации [5].

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

E-mail: katinvd@mail.ru

Косыгин Владимир Юрьевич, ведущий научный сотрудник отдела математического моделирования.

E-mail: kosyginv@inbox.ru

Квасников Марк Пенхасович, доцент кафедры "Техносферная безопасность".

E-mail: kvasnikov_mp@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2021 г.

© Катин В. Д., Косыгин В. Ю., Квасников М. П., 2021

Методика исследования

Задача управления процессом горения формализуется следующим образом:

$$I(I_{\text{эк}}, I_{\text{кор}}, I_{\text{ток}}, \mathbf{x}, \mathbf{u}) \rightarrow \min_{\mathbf{x} \in X, \mathbf{u} \in U} \quad (1)$$

где $I_{\text{эк}}, I_{\text{кор}}, I_{\text{ток}}$ — частные критерии оптимальности, выраженные через концентрации компонентов дымовых газов, характеризующих экономичность процесса горения ($\text{O}_2, \text{CO}, \text{H}_2$), коррозионную активность ($\text{SO}_3, \text{H}_2\text{S}$ и т. д.) и токсичность ($\text{CO}, \text{SO}_2, \text{NO}$ и т. д.) продуктов сгорания [4];

\mathbf{x}, \mathbf{u} — векторы возмущающих и управляющих воздействий;

X, U — области допустимых значений возмущающих и управляющих воздействий.

Анализ возможных вариантов реализации компромисса между частными критериями $I_{\text{эк}}, I_{\text{кор}}, I_{\text{ток}}$ позволяет выбрать обобщенный критерий оптимальности:

$$I = \left[\frac{(I_{\text{эк}} - I_{\text{эк.оп}})^2 + (I_{\text{кор}} - I_{\text{кор.оп}})^2 + (I_{\text{ток}} - I_{\text{ток.оп}})^2}{3} \right]^{0.5}, \quad (2)$$

где $I_{\text{эк.оп}}, I_{\text{кор.оп}}, I_{\text{ток.оп}}$ — оптимальные значения соответствующих критериев. Критерий (2) достаточно чувствителен к изменениям режимов горения, а решение задачи оптимизации процесса горения, формализованной на его основе, всегда единственно. Кроме того, частные критерии $I_{\text{эк}}, I_{\text{кор}}, I_{\text{ток}}$ и обобщенный критерий (2) унимодальны, что позволяет при решении задачи их минимизации использовать алгоритмы, основанные только на необходимых условиях оптимальности.

Для формирования частных критериев оптимальности необходима информация о подробном составе продуктов сгорания, в следствие этого идеальная система регулирования экономичности процесса горения должна включать автоматические газоанализаторы на кислород, водород и оксид углерода. Автоматические газоанализаторы для измерения содержания в дымовых газах продуктов недожога и кислорода выпускаются серийно. Поэтому возможна реализация системы регулирования экономичности процесса горения на основе управления по модели с использованием сигналов от автоматических газоанализаторов по содержанию кислорода, водорода и оксида углерода для учета ограничения на потери теплоты с химической неполнотой горения топлива (недожогом).

При использовании в качестве математической модели системы уравнений, описывающей равновесную многокомпонентную гетерогенную реагирующую

систему, задача оптимизации процесса горения в смысле минимизации критерия (2) записывается как

$$I = \left[(I_{\text{эк}} - I_{\text{эк.оп}})^2 + (I_{\text{кор}} - I_{\text{кор.оп}})^2 + (I_{\text{ток}} - I_{\text{ток.оп}})^2 \right]^{0.5} \rightarrow \min_{\alpha} \quad (3)$$

при условии

$$\prod_{i=1}^d p_i^{v_{ji}} = K_j, \quad j = 1, \dots, D;$$

$$\sum_{i=1}^d a_{i\sigma} p_i = M_{\text{топ}} (b_{\sigma}^{\text{ок}} + \alpha \chi b_{\sigma}^{\text{топ}}), \quad \sigma = 1, \dots, q; \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{q+f} p_i = P$$

и ограничении

$$q_3 \leq q_3^{\text{доп}}, \quad (5)$$

где v_{ji} — элемент стехиометрической матрицы $\|v\|$;

p_i — парциальное давление i -го вещества;

D — число реакций между d веществами;

K_j — константа равновесия j -й реакции;

$a_{i\sigma}$ — элемент молекулярной матрицы $\|a\|$, показывающей число частиц σ -го элемента в i -м веществе;

$b_{\sigma}^{\text{топ}}, b_{\sigma}^{\text{ок}}$ — число молей σ -го элемента в топливе и окислителе соответственно;

$M_{\text{топ}}$ — число молей исходного вещества;

χ — мольный стехиометрический коэффициент;

α — коэффициент избытка воздуха;

q — число химических элементов в составе вещества;

f — число веществ в молекулярном состоянии;

P — давление системы;

q_3 — текущее значение потерь теплоты с химическим недожогом;

$q_3^{\text{доп}}$ — допустимое значение потерь теплоты с химическим недожогом.

Алгоритм решения задачи (3)–(5) может быть положен в основу управления процессом горения. Процедура отыскания оптимального по α режима горения состоит из двух этапов:

- определение координат "оптимальной" точки $I_{\text{оп}}, I_{\text{эк.оп}}, I_{\text{кор.оп}}, I_{\text{ток.оп}}$ в пространстве частных критериев;
- решение задачи минимизации обобщенного критерия (3)–(5).

Первый этап сводится к решению трех задач математического программирования, первая из которых записывается как

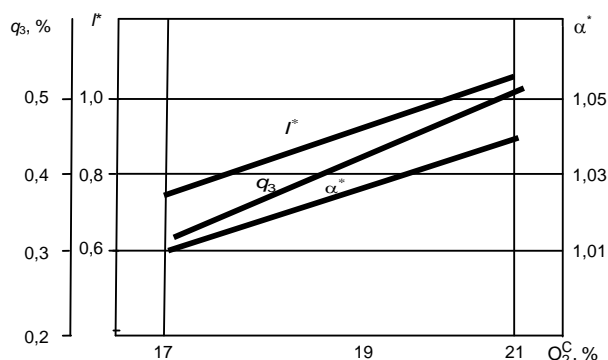
$$I_{\text{эк}} \rightarrow \min_{\alpha} \quad (6)$$

при условии (4), но без ограничения (5). Аналогично формулируются две другие задачи, в которых вместо критерия $I_{\text{эк}}$ вводятся критерии $I_{\text{кор}}$ и $I_{\text{ток}}$.

После нахождения минимальных значений частных критериев, позволяющих сформировать критерий в форме (2), можно перейти к решению задачи (3)—(5).

Результаты исследования

Реализация на ЭВМ алгоритма решения задач (6) и (3)—(5) для условий сжигания мазута в нефтезаводских печах показывает, что с увеличением содержания кислорода в сбросных газах, являющихся дутьем для мазута, и переходом к горению мазута в воздухе решение задачи (3)—(5) α^* и значение I^* увеличиваются (рисунок).



Зависимость решения задачи оптимизации процесса горения от содержания кислорода в дутьевом воздухе

При переходе к горению в воздухе решение задачи соответствует ограничению $q_3 \leq q_3^{\text{доп}}$ ($q_3^{\text{доп}} = 0,5\%$).

Возрастают также концентрации компонентов дымовых газов, по которым определяют состояние процесса горения (O_2 , CO , H_2 и другие).

Заключение

Методами многокритериальной оптимизации разработана система регулирования процессов горения топлива в нефтезаводских печах, воздействующая на соотношение топливо—воздух и на снижение коррозионной активности и токсичности дымовых газов. Реализация на ЭВМ алгоритма решения задачи управления процессом горения для условий сжигания мазута в нефтезаводских печах показала, что с увеличением содержания кислорода в сбросных газах, являющихся дутьем для мазута, и переходом к горению мазута в воздухе коэффициент избытка воздуха и текущее значение потерь теплоты с химическим недожогом не превышают допустимых пределов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон Российской Федерации от 10.01.2002 № 7 "Об охране окружающей среды".
2. Жидков А. Б. Трубчатые нагревательные печи нефтепереработки и нефтехимии. — СПб.: Артпроект, 2015. — 104 с.
3. Катин В. Д., Дьяченко С. Н. К проблеме комплексного контроля горения топлива и токсичности дымовых газов нефтезаводских печей: сб. трудов Международного экологического конгресса. — СПб., 2010. С. 161—163.
4. Катин В. Д., Елисеев Г. Г. Повышение экологичности печей и котлов при управлении сжиганием топлива и снижении вредных выбросов. — Хабаровск: ТОГУ, 2018. С. 161—163.
5. Соболев И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. — М.: Дрофа, 2006. — 175 с.

Management of process of burning of fuel and toxicity of the smoke gases, which are thrown out from petrofactory furnaces by methods of multicriterion optimisation

^{1,2} V. D. KATIN, ³ V. Yu. KOSYGIN, ¹ M. P. KVASNIKOV

¹ Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

² Pacific State University, Khabarovsk, Russia

³ Computing Center of the Far-Eastern Branch of the RAS, Khabarovsk, Russia

In article the method of multicriterion optimisation of process of burning of fuel in petrofactory tubular furnaces is considered and proved. As mathematical model the system of the equations describing equilibrium multicomponent heterogeneous reacting system, and the generalised criterion of an optimality depending on variety of private criteria, characterising not only profitability of process of burning, but also toxicity of products of combustion and other factors is offered. The algorithm of the decision of this problem is realised on the computer for conditions of burning of black oil in petrofactory furnaces. It is shown, that with increase in the maintenance of oxygen in waste gases and black oil transition to burning in air current value of losses of warmth with chemical incompleteness of burning of fuel does not exceed their admissible values.

Keywords: management of burning process, petrofactory furnaces, fuel burning, multicriterion optimisation, criteria of an optimality, combustion products, algorithm of the decision, toxicity, corrosion aggression, smoke gases.

Bibliography — 5 references.

Received April 2, 2021

УДК 621.433; 621.486

DOI: 10.52190/2073-2589_2021_2_44

Комбинированная силовая установка с улучшенными экологическими показателями

Е. В. ОВЧИННИКОВ; Р. С. ФЕДОТКИН, канд. техн. наук;

С. Ю. УЮТОВ; В. А. КРЮЧКОВ, канд. техн. наук

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

Рассмотрен пример объединения двух типов двигателей (двигателя внутреннего сгорания и двигателя Стирлинга), для повышения эффективности силовой установки и уменьшения количества вредных выбросов в отработавших газах.

Ключевые слова: вредные выбросы, дизельный двигатель внутреннего сгорания, двигатель Стирлинга, отработавшие газы, каталитическая нейтрализация.

Потребление энергии автомобилями в количественном выражении составляет 52 % всей энергии, используемой транспортом. Менее 35 % энергии, заключенной в литре бензина, достигает колес обычного автомобиля. Оставшееся тепло отводится в окружающую среду через выхлопные газы и системы охлаждения двигателя [1]. Тепловые потери составляют примерно 60 %, а 33 % мощности выводится с выхлопными газами. Поскольку основная часть энергии, потребляемой двигателем внутреннего сгорания (ДВС), тратится впустую, улавливание значительной части этой потерянной энергии может обеспечить большие мощность и эффективность, а также снизить негативное воздействие на окружающую среду. К повышению экологических норм для силовых установок, установленных на автотранспорте, автотракторной технике и т. д., предъявляют все более жесткие требования. Для повышения их эффективности и экологических показателей используют различные технические средства, к примеру каталитические нейтрализаторы и химические реагенты, впрыскиваемые в отработавшие газы [2, 3]. Многие исследователи проводят эксперименты по использованию тепловой энергии отработавших газов ДВС [4, 5]. Ведется изучение того, как использовать эту потерянную энергию. При этом применяют различные методы, такие, как термоэлектрическая, пьезоэлектрическая, термоэлектронная, термофотоэлектрическая генерация и т. д. [6]. Необходимо отметить, что за рубежом уже начато производство двигателей Стирлинга, технические характеристики которых превосходят ДВС и газотурбинные установки

(ГТУ). Так, двигатели Стирлинга фирм "Philips", "STM Inc.", "Daimler Benz", "Solo", "United Stirling" мощностью от 5 до 1200 кВт имеют КПД более 42 %, рабочий ресурс более 40 тыс. ч и удельную массу от 1,2 до 3,8 кг/кВт [7, 8].

Материалы и методы

Рассматриваются варианты использования различных исполнений двигателя Стирлинга. Конструкция исполнения "Альфа" имеет два отдельных рабочих поршня. Каждый поршень расположен в отдельном цилиндре. Холодный цилиндр находится в теплообменнике, а "горячий" нагревается. Конструкция исполнения "Бета" содержит цилиндр с поршнем, который охлаждается с одной стороны и нагревается с другой. В цилиндре перемещаются силовой поршень и вытеснитель, служащие для уменьшения и увеличения объема рабочего газа. Регенератор выполняет обратное перемещение остывшего газа в нагретое пространство двигателя. Конструкция исполнения "Гамма" состоит из двух цилиндров. Первый цилиндр целиком холодный, в нем перемещается рабочий поршень. Второй цилиндр с одной стороны нагрет, с другой — холодный. Он предназначен для передвижения вытеснителя. Регенератор для перекачки охлажденного газа может быть либо общим для двух цилиндров, либо включенным в устройство вытеснителя [9]. Каждый из вариантов имеет свои преимущества и недостатки. Авторами рассмотрен вариант конструкции исполнения "Альфа".

Для реализации силовой установки использовали ДВС, работающий на любом виде топлива, и двигатель Стирлинга. При работе ДВС отработавшие газы поступают в отводную трубу (рис. 1), попадают в накопительную камеру с "горячим" цилиндром двигателя Стирлинга и нагревают теплообменные ребра с нанесенным на них каталитическим покрытием, которое вступает в реакцию с отработавшими газами и частично нейтрализует вредные выбросы. Часть охлажденного воздуха от интеркулера идет по воздушной магистрали к "холодному" цилиндру и охлаждает теплообменные ребра.

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

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

Федоткин Роман Сергеевич, ведущий научный сотрудник.

E-mail: frs89@bk.ru

Уютов Сергей Юрьевич, младший научный сотрудник.

E-mail: s_ujutov@mail.ru

Крючков Виталий Алексеевич, ведущий научный сотрудник.

E-mail: kryuchkov.vitaliy@gmail.com

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2021 г.

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

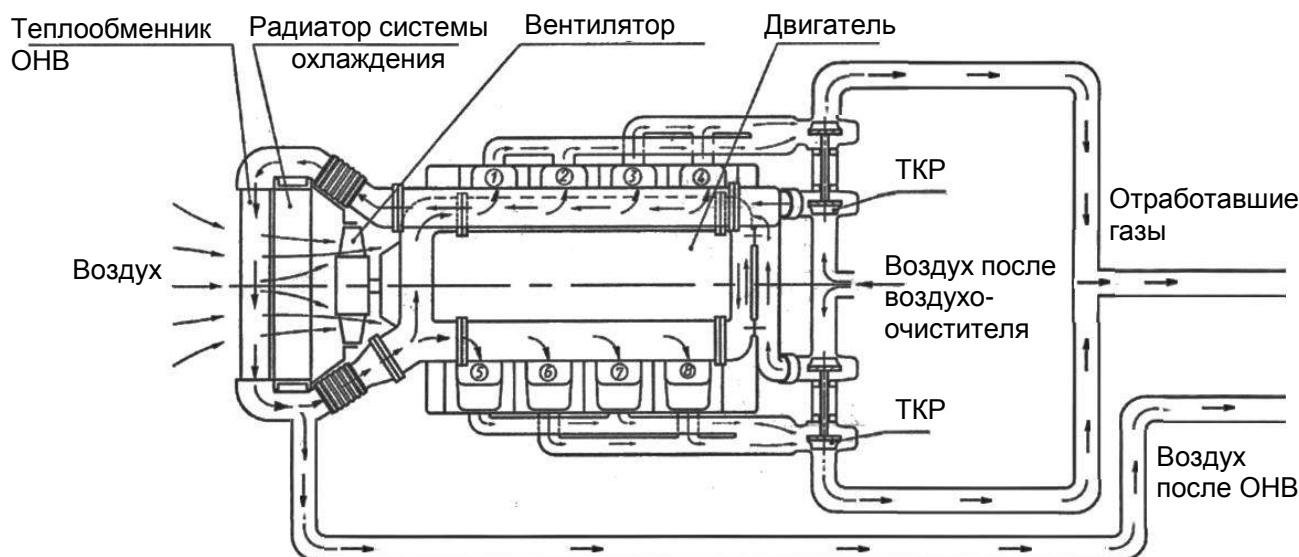


Рис. 1. Схема отвода отработавших газов от двигателя и холодного воздуха от интеркулера

Накопительная камера и расположенный в ней цилиндр выполнены таким образом, чтобы не оказывать сопротивления проходу отработавших газов, тем самым не снижать мощности ДВС. Для более эффективного отвода выхлопных газов после накопительной камеры установлена выхлопная труба большего диаметра — диффузор. Выхлопные газы постоянно греют "горячий" цилиндр. За счет расширения газа находящийся в замкнутом объеме пор-

шень начинает движение вниз. При этом шатун раскручивает коленчатый вал, на котором также закреплен другой шатун с поршнем из "холодного" цилиндра. На коленчатом валу установлен маховик, служащий для сохранения кинетической энергии и более плавного вращения. Через муфту от маховика присоединен электрический генератор, который вырабатывает электроэнергию. Интегральная схема применения двигателя Стирлинга показана на рис. 2.

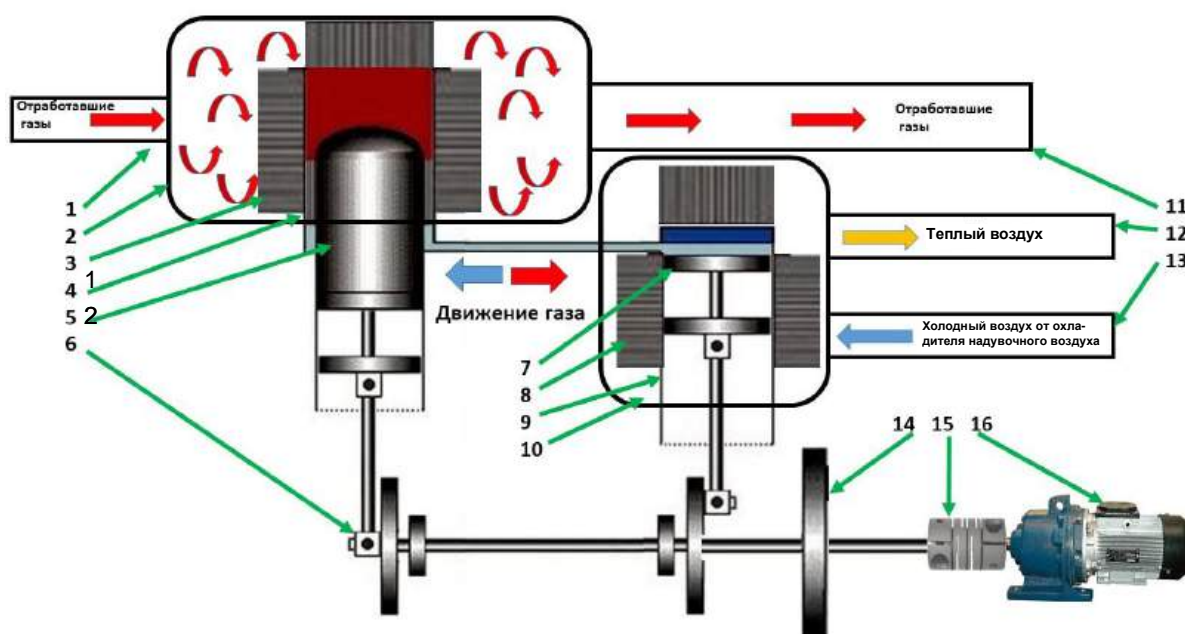


Рис. 2. Интегральная схема двигателя Стирлинга (конструкция исполнения "Альфа") с системой выпуска дизельного ДВС:

- 1 — выпускная система ДВС; 2 — накопительная камера для отработавших газов; 3 — ребра цилиндра для повышенного теплообмена с нанесенным на них покрытием для частичной нейтрализации вредных выбросов; 4 — "горячий" цилиндр; 5 — поршень "горячего" цилиндра; 6 — коленчатый вал; 7 — поршень "холодного" цилиндра; 8 — ребра для повышенного теплообмена "холодного" цилиндра; 9 — "холодный" цилиндр; 10 — накопительная камера для холодного воздуха; 11 — отводная труба отработавших газов; 12 — отводная труба воздуха после накопительной камеры; 13 — подводная труба холодного воздуха от интеркулера; 14 — маховик; 15 — муфта; 16 — электрогенератор с редуктором

Количество отработанного тепла, содержащегося в выхлопном газе, зависит как от температуры, так и от массового расхода выхлопного газа:

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T,$$

где Q — теплопотери, кДж/с;

\dot{m} — массовый расход выхлопных газов, кг/с;

C_p — удельная теплоемкость выхлопных газов, кДж/(кг·К);

ΔT — градиент температуры, К.

Массовый расход выхлопных газов можно рассчитать по формуле

$$\dot{m} = \dot{m}_{\text{воз}} + \dot{m}_{\text{топ}},$$

где $\dot{m}_{\text{воз}}$ — массовый расход воздуха, кг/с;

$\dot{m}_{\text{топ}}$ — массовый расход топлива, кг/с.

Массовый расход воздуха можно определить по формуле

$$\dot{m}_{\text{воз}} = \mu \rho v S,$$

где μ — объемный КПД;

ρ — плотность вещества, кг/м³;

v — средняя скорость потока, м/с;

S — площадь сечения потока, м².

Объемный КПД μ находится в диапазоне от 0,8 до 0,9.

Выходную мощность можно оценить с помощью различных методов, которые принимают во внимание множество факторов, таких, как разница температур, рабочая скорость и давление, объемы пространства расширения и сжатия, эффективность регенератора. Для определения мощности двигателя Стирлинга используют числа Била и Уэста.

В машиностроении число Била является параметром, характеризующим производительность двигателей Стирлинга, его часто используют для оценки выходной мощности двигателя Стирлинга. Для двигателей, работающих с большим перепадом температур, типичные значения числа Била находятся в диапазоне 0,11—0,15, где большее число указывает на лучшую производительность.

Число Била можно определить в терминах рабочих параметров двигателя Стирлинга:

$$B_n = \frac{W_0}{P V F},$$

где B_n — число Била;

W_0 — выходная мощность двигателя, Вт;

P — среднее давление газа, МПа;

V — рабочий объем силового поршня, см³;

F — частота цикла двигателя, Гц.

Для оценки выходной мощности двигателя принимают номинальные значения числа Била, давления, рабочего объема и частоты. Мощность рассчитывают как произведение этих параметров:

$$W_0 = B_n P V F.$$

Число Уэста — эмпирический параметр, используемый для характеристик двигателей Стирлинга и других систем Стирлинга. Оно очень похоже на число Била: большее значение указывает на более высокую производительность. Число Уэста включает температурную компенсацию. Для приблизительного определения выходной мощности двигателя Стирлинга часто используют число Уэста. Его среднее значение составляет 0,25 для широкого спектра двигателей, хотя оно может достигать 0,35 [10], особенно для двигателей, работающих с большим перепадом температур.

Число Уэста W_n можно определить как

$$W_n = \frac{W_0}{P V F} \frac{T_{\text{наг}} + T_{\text{ох}}}{T_{\text{наг}} - T_{\text{ох}}} = B_n \frac{T_{\text{наг}} + T_{\text{ох}}}{T_{\text{наг}} - T_{\text{ох}}},$$

где W_0 — выходная мощность двигателя, Вт;

P — среднее давление газа, МПа;

V — рабочий объем расширительного пространства, см³;

F — циклическая частота двигателя, Гц;

$T_{\text{наг}}$ — абсолютная температура пространства расширения (или нагревателя), К;

$T_{\text{ох}}$ — абсолютная температура пространства сжатия (или охладителя), К;

B_n — число Била для двигателя, работающего между температурами $T_{\text{наг}}$ и $T_{\text{ох}}$.

Для расчета производительности двигателя Стирлинга необходимо выбрать конкретную модель ДВС, так как исходя из его технических характеристик, таких, как объем двигателя, количество оборотов в минуту, используемый тип топлива и т. д., можно определить температуру и объем выхлопных газов в единицу времени, а также габаритные размеры двигателя Стирлинга. В результате при затрате одного и того же количества топлива количество производимой энергии увеличится, а за счет нейтрализующего покрытия на поверхности "горячего" цилиндра снизится количество вредных выбросов в отработавших газах ДВС. Полученную дополнительную электроэнергию можно направить на электропривод вспомогательного оборудования.

Заключение

Проведенный анализ данных литературных источников однозначно показывает актуальность применения двигателей Стирлинга в качестве силовой установки для снижения вредных выбросов. Рассмотренная комбинированная силовая установка позволяет снизить удельный расход топлива всей установки, получить дополнительную электроэнергию, повысить экологические показатели всей силовой установки. Подобные решения однозначно можно использовать как на транспорте, так и в стационарных энергетических блоках. Производительность двигателя Стирлинга в не рассчитывалась, так как для ее определения необходимо знать конкретную модель двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Halderman J.** Automotive Technology, Prentice Hall, 4th edition, 2011. 1652 p.
2. **Wittka T., Holderbaum B., Dittmann P. et al.** Experimental Investigation of Combined LNT + SCR Diesel Exhaust Aftertreatment. Emiss // Control Sci. Technol. 2015. № 1. P. 167—182. <https://doi.org/10.1007/s40825-015-0012-0>
3. **Kulandaivel D., Rahamathullah I. G., Sathiyagnanam A. P. et al.** Effect of retarded injection timing and EGR on performance, combustion and emission characteristics of a CRDi diesel engine fueled with WHDPE oil/diesel blends // Fuel Volume 278, 15 October 2020, 118304. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118304>
4. **Poerner M., Rimpel A.** Waste heat recovery. Fundamentals and Applications of Supercritical Carbon Dioxide (sCO₂) Based Power Cycles. Book 2017. P. 255—267.
5. **Nolan C., O'shaughnessy R., Douglas R., Rouaud C.** Waste heat recovery utilising engine coolant on a hybrid bus, Vehicle Thermal Management Systems Conference Proceedings (VTMS11). Woodhead Publishing, 2013. P. 139—148. <https://doi.org/10.1533/9780857094735.3.139>.
6. **Jadhao J., Thombare D.** Review on exhaust gas heat recovery for I.C. engine // International J. Engineering and Innovative Technology. 2013. V. 2. № 12. P. 93—100.
7. **Stirling R.** Stirling engine. English patent № 4081 1819.
8. <https://www.eprussia.ru/epr/54/3515.htm>
9. <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/jelektropitanie/dvigatel-stirlinga/>
10. <http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/academic/simple/simplee.htm>

Combined power plant with improved environmental performance

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

This article considers an example of combining two types of engines (an internal combustion engine, a Stirling engine), to improve the efficiency of the power plant and reduce the amount of harmful emissions in the exhaust gases.

Keywords: harmful emissions, diesel internal combustion engine, Stirling engine, exhaust gases.

Bibliography — 10 references.

Received February 11, 2021

Экология промышленного производства: Межотр. науч.-практ. журнал / ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2021. Вып. 2. С. 1—52.

Редактор *О. А. Константинова*

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

Подписано в печать 24.05.2021.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 6,0. Уч.-изд. л. 6,2.

Тираж 250 экз. Заказ 1973.

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.



**ВСЕМ ПУБЛИКАЦИЯМ ВСЕХ НАШИХ
НАУЧНЫХ ИЗДАНИЙ БУДЕТ
ПРИСВАИВАТЬСЯ КОД DOI!**

**Издательство ФГУП «НТЦ оборонного
комплекса «Компас» заключило с Научной
электронной библиотекой договор на оказание
услуг по обслуживанию кодов DOI всех
научных изданий, начиная
с первых выпусков 2021 г.**

DOI (Digital Object Identifier) – это уникальный код публикации, указывающий на ее электронное местонахождение, используемый в качестве международного стандарта предоставления информации в сети Интернет. DOI разработан компанией International DOI Foundation (IDF), основанной на членстве регистрационных агентств, предоставляющих конечным пользователям услуги по присвоению префиксов DOI.

Регистрационные агентства назначаются IDF и предоставляют услуги владельцам префиксов DOI: они распределяют префиксы DOI, регистрируют DOI для объектов и предоставляют необходимую инфраструктуру, позволяющую владельцам объектов присваивать DOI и передавать метаданные объектов. CrossRef — это международное регистрирующее агентство, предоставляющее DOI для научных публикаций (книги, журнальные статьи, материалы конференций и т. д.). Научная электронная библиотека с декабря 2019 года является официальным представителем компании CrossRef.

Разработанный компанией Научная электронная библиотека Сервис DOI позволяет без непосредственного участия представителей издательств осуществлять передачу метаданных публикаций в базу данных Crossref. eLIBRARY.RU берет на себя все функции, связанные с проверкой данных, формированием XML-файлов для загрузки в CrossRef, контролем и исправлением возможных ошибок в процессе загрузки. Подавляющее большинство российских научных издательств на регулярной основе размещает информацию в РИНЦ. Эта информация проходит проверку, нормализуется, структурируется и преобразуется в формат, поддерживаемый системой CrossRef. По мере поступления новых публикаций в РИНЦ они автоматически отправляются в CrossRef на регистрацию. Таким образом, подключение к сервису DOI на eLIBRARY.RU избавляет издательства от дополнительных хлопот, связанных с поддержкой DOI в своих изданиях.

В результате оказания услуги **статьям выпусков издательства ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас» будет присваиваться уникальный идентификационный номер (DOI), начиная с первых выпусков 2021 года**, с помощью которого можно определить метаданные опубликованных научных статей, их местонахождение в сети Интернет (URL), и иные данные путем обращения к поисковой системе Международного фонда DOI.

Приглашаем к публикации результатов научных разработок и исследований всех тружеников науки: руководителей научных организаций, ведущих научных сотрудников, разработчиков, аспирантов, докторантов в наших научных изданиях!

По материалам сайта: <https://www.elibrary.ru>

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

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

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

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

.....
(название журнала)

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

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

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

Статья должна быть подписана всеми авторами. В случае нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией. Рукопись статьи направляется на адрес редакции журнала: 125424, Москва, Волоколамское ш., д. 77, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», Редакция журнала.

Дополнительная информация может быть получена в редакции при обращении по телефону: 8 (495) 491-43-17 или по E-mail: izdanie@ntckompas.ru.

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

Комплектование статьи (обзора)

Статья должна быть представлена в редакцию в следующем комплекте:

- сопроводительное письмо, подписанное руководством организации;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати и распространения в

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

- лицензионный договор по приведенному образцу;
- рукопись статьи — объем статьи (без рисунков) не должен превышать 10 страниц формата А4 при 1,5 межстрочных интервалах, а объем статьи обзорного характера — 20 страниц. Рекомендуемая гарнитура — New Times Roman. Размер шрифта — 12;
- Материал статьи представляется в редакцию в печатном виде (на бумажном носителе) и в электронном варианте на CD/DVD-диске с текстом в формате Word.

Оформление статьи:

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

- после названия — список авторов, инициалы авторов предшествуют их фамилиям;
- с отступлением в 2 строки представляется аннотация статьи;
- далее приводится список ключевых слов для данной статьи (не более десяти);
- страницы текста нумеруются без пропусков и добавлений литературных обозначений (типа 1а, 2б и т. п.), причем в сквозную нумерацию должны быть включены все элементы статьи;
- внизу первой страницы текста помещается отдельный абзац (с полужирным шрифтом), содержащий контактную информацию об авторе (или авторах) в следующем виде: фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, почтовый адрес предприятия, телефон, E-mail;
- основной текст статьи должен начинаться с четкой постановкой цели и задач работы, сопровождаемой аргументами в пользу ее выполнения на фоне существующего состояния затронутой в статье проблемы. Дальнейший текст статьи также должен иметь смысловые рубрикаторы (разделы и подразделы) без их нумерации. Заканчиваться статья должна отдельным разделом «Заключение» с перечислением основных результатов, следующих из них выводов и, по возможности, предложений по развитию исследований и использованию их результатов.
- после основного текста — список использованных источников "Литература" (не менее 5 источников); Список использованной литературы должен соответствовать всем ссылкам на внешние источники в тексте статьи. Ссылки оформляются в квадратных скобках, например, [1—6], [7, 8]. Внутренние ссылки, т. е. ссылки на формулы, рисунки и таблицы статьи оформляются с использованием круглых скобок, например, формула (1), уравнение (4), (рис. 3), (табл. 2). Любые ссылки в подписях к рисункам и в самих рисунках не рекомендуются;
- далее размещается подробная англоязычная информация о статье: название статьи, фамилия и инициалы авторов (английская транслитерация), предприятие, аннотация, ключевые слова (Keywords).

Оформление рисунков:

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

белом фоне. Вспомогательные сетки на площади графика не допускаются;

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

Оформление формул:

- простые формулы вводить в текст в формате используемого текстового редактора, более сложные формулы — с использованием редактора формул MathType;
- стандартные математические обозначения (например, \max , \log , \sin , \exp и т. д.) должны быть набраны прямо. То же относится к цифрам и числам;
- для символьного обозначения не векторных физических (технических) величин использовать только латинский и греческий алфавиты, при этом в тексте для греческих букв использовать прямой шрифт, для латинских букв — наклонный шрифт (курсив);
- векторы и матрицы обозначать полужирным прямым шрифтом;
- для нижних и верхних индексов применять арабские цифры, латинские или греческие буквы. Если индекс представляет собой сокращенную форму русского слова — характеристики, то допустимо использовать в его обозначении русские буквы (прямой шрифт), например $U_{\text{вх}}$, $I_{\text{вых}}$, $v_{\text{гр}}$ и т. п.
- размерность физических величин обозначается всегда только по-русски прямым шрифтом.

Оформление таблицы:

- содержание таблицы не должно дублировать данные, приводимые на графиках или в тексте;
- графы должны иметь название без сокращения отдельных слов.

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

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

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

**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».