

# ЭКОЛОГИЯ

промышленного  
производства



МЕЖОТРАСЛЕВОЙ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

Выпуск 2  
Москва 2022



## 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](mailto:izdanie@ntckompas.ru)



# ЭКОЛОГИЯ

## промышленного

## производства

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

Выпуск 2 (118)

Издается с 1993 г.

Москва 2022

### СОДЕРЖАНИЕ

#### ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ, УТИЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕРАБОТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

*Борисова О. Н., Тыгер Л. М.* Принципы оптимизации технологии и выбор оборудования при вовлечении ТКО в производственные процессы ..... 2

*Пикалов Е. С.* Применение стеклобоя для получения стеклокерамического материала электротехнического назначения ..... 6

*Шубов Л. Я., Доронкина И. Г., Смирнова Т. С., Голуб О. В.* Комплексное использование электронного и электротехнического лома ..... 12

#### ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДООЧИСТКА

*Ксенофонтов Б. С., Капитонова С. Н., Васильева Я. С.* Обработка воды с использованием эжектора-смесителя с тангенциальным вводом реагента ..... 19

*Масленников А. А., Демидова С. А., Кащеев А. А., Антонов В. А.* Экспериментальная оценка опасности загрязнения воды водоёмов гексахлорбензолом ..... 25

#### ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

*Тетельмин В. В.* Максимальный нагревательный потенциал антропогенных парниковых газов ..... 30

*Трофименко Ю. В., Комков В. И.* Оценка уровня негативного воздействия автомобильного транспорта в городе Челябинске на окружающую среду и здоровье населения на период до 2030 года ..... 36

#### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА

*Ерхов А. А., Королёва Е. А.* Определение производительности фильтров для обеззараживания вентилируемого воздуха резервуаров систем ВиВ ..... 43

#### ОЧИСТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ

*Овчинников Е. В., Уютов С. Ю., Чаплыгин М. Е.* Экономическая оценка экологических показателей газодизельного трактора ..... 49

#### Главный редактор

**М. В. Слипенчук**, д-р эконом. наук, проф., зав. кафедрой рационального природопользования географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова

#### Заместители главного редактора:

**В. Ф. Гракович**, д-р техн. наук, проф., Национальный фонд содействия устойчивому развитию регионов;  
**А. Г. Ишков**, д-р хим. наук, проф., ПАО «Газпром»;  
**Н. П. Кузнецов**, д-р техн. наук, проф., ИжГТУ им. М. Т. Калашникова

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

#### Редакционный совет:

**М. Ч. Залиханов**, акад. РАН, проф., РАН; **И. Н. Мешков**, акад. РАН, проф., Объединённый институт ядерных исследований; **Н. П. Тарасова**, чл.-кор. РАН, д-р хим. наук, проф., Институт проблем устойчивого развития РХТУ им. Д. И. Менделеева

#### Редакционная коллегия:

**А. М. Амирханов**, канд. биол. наук, Федеральная служба по надзору в сфере природопользования; **С. С. Бабкина**, д-р хим. наук, проф., Институт тонких химических технологий им. М. В. Ломоносова РТУ МИРЭА; **Я. И. Вайсман**, д-р мед. наук, проф., Пермский национальный исследовательский политехнический университет; **В. А. Девисиллов**, д-р тех. наук, МГТУ им. Н. Э. Баумана; **О. Д. Доронина**, д-р биол. наук, проф., Академия труда и социальных отношений; **Е. Ю. Дорохина**, д-р эконом. наук, проф. РЭУ им. Г. В. Плеханова; **М. Н. Дадашев**, д-р техн. наук, проф., РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина; **В. Г. Исаков**, д-р техн. наук, проф., ИжГТУ им. М. Т. Калашникова; **М. А. Корепанов**, д-р техн. наук, ИжГТУ им. М. Т. Калашникова; **Б. С. Ксенофонтов**, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н. Э. Баумана; **В. Н. Ложкин**, д-р тех. наук, проф., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России; **В. Ю. Мелешко**, д-р техн. наук, проф., Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН; **В. Ф. Меньшиков**, канд. техн. наук, Госкорпорация «Росатом»; **Н. Г. Рыбальский**, д-р биол. наук, проф., НИА «Природные ресурсы»; **И. Ш. Сайфуллин**, д-р хим. наук, проф., НИИ инновационного развития промышленности РЭУ им. Г. В. Плеханова; **А. А. Соловьянов**, д-р хим. наук, проф., Центр научных исследований и разработок ФГБУ «ВНИИ «Экология»; **В. А. Тененев**, д-р физ.-мат. наук, проф., ИГТУ им. М. Т. Калашникова; **В. В. Тетельмин**, д-р техн. наук, проф., Общественный совет при Минэнерго РФ; **Ю. В. Трофименко**, д-р техн. наук, проф., НИИ энергетических проблем автотранспортного комплекса при МАДИ; **Б. С. Федоров**, д-р техн. наук, проф., ООО «Концерн ЭКОМАШ»; **С. Г. Харченко**, д-р физ.-мат. наук, проф., РУДН; **С. С. Чеботарев**, д-р эконом. наук, проф., АО "ЦНИИ экономики, информатики и систем управления"



# Обезвреживание, утилизация и переработка промышленных отходов

УДК 504.064.4

DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_2\_2

EDN: EKPBLN

## Принципы оптимизации технологии и выбор оборудования при вовлечении ТКО в производственные процессы

О. Н. БОРИСОВА, канд. техн. наук; Л. М. ТЫГЕР, канд. хим. наук  
ФГБОУ ВО «Российский государственный университет туризма и сервиса»,  
пос. Черкизово, Пушкинский р-н, Московская обл., Россия

*Выбор техники для реализации процессов сортировки твердых коммунальных отходов (ТКО) базируется на анализе рынка оборудования для переработки техногенного сырья. В рамках реализации научно обоснованной стратегии управления ТКО требования технологической эффективности процессов воздействия на отходы в целях их переработки и утилизации определяются требованиями к сырью и оборудованию на входе в технологический процесс, реализуемый с применением данного оборудования (при обязательном соблюдении определенной последовательности решения технологических задач).*

**Ключевые слова:** ТКО, технологии, оборудование, технологические процессы, энергосбережение, ресурсосбережение.

Проблема твердых коммунальных отходов (ТКО) остроактуальна, поскольку ее решение связано с необходимостью обеспечения нормального функционирования населения, охраны окружающей среды и ресурсосбережения. В связи с ростом населения, повышением уровня жизни и соответствующим увеличением потребления товаров во всем мире наблюдается резкое увеличение количества коммунальных отходов [1].

Образовавшиеся в результате жизнедеятельности человека отходы производства и потребления являются, с одной стороны, главными загрязнителями окружающей среды и могут привести к сильному и даже необратимому нарушению экологической системы, а с другой, зачастую представляют собой ценные продукты, потенциально пригодные для переработки и вторичного использования.

Отходы производства связаны (через повторное использование и переработку) обратной связью с промышленной системой, где они образовались и их значительно легче вовлечь в утилизацию, чем отхо-

ды потребления. Количество отходов производства во времени может снижаться (оптимизация методов хозяйствования) [2].

Количество отходов потребления наоборот постоянно возрастает, ибо потребительский рынок насыщается все большим количеством товаров (статистические данные: поток ТКО — наиболее представительных и проблемных отходов потребления возрастает ежегодно не менее, чем на 2—3 %). Отходы потребления (ТКО, КГМ — крупногабаритные материалы, автолом, металлолом, электронный лом, отработанные аккумуляторы, отработанные ртутьсодержащие изделия, крупногабаритные резиноотходы, электрокабельный лом и др.) во многом обезличены и чаще всего их собственником является новое лицо — физическое или юридическое, а не производители и импортеры товаров, утративших в какой-то момент свои потребительские свойства. Отсюда организация рационального управления отходами потребления в данных технико-экономических условиях гораздо сложнее, чем отходов производства и во многом зависит от создания эффективной системы сбора отходов потребления [3].

Несмотря на то что количество образующихся ТКО намного меньше, чем промышленных отходов (наибольшее количество последних образуется в горно-металлургической и угольной промышленности, т. е. преимущественно в моногородах), именно

---

Борисова Оксана Николаевна, доцент.

E-mail: borisova-on@bk.ru

Тыгер Любовь Михайловна, доцент.

E-mail: lyutyger@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2021 г.

© Борисова О. Н., Тыгер Л. М., 2022

проблема ТКО требует первостепенного внимания — по многим причинам:

- проблема ТКО затрагивает все без исключения города;
- к образованию ТКО причастен каждый человек;
- ТКО требуют для своего захоронения больших площадей (по сравнению с промышленными плотность бытовых отходов многократно меньше); ресурс действующих вокруг городов объектов захоронения ТКО недолговечен, а открытие новых объектов весьма проблематично (свалочных мест начинает катастрофически не хватать);
- государство имеет больше возможностей непосредственно влиять на методы управления отходами в муниципальном секторе;
- цивилизованное решение проблемы ТКО — вотум доверия власти от населения.

Исходя из этого должны быть разработаны требования повышения технологической деятельности по обращению с ТКО в РФ [4].

ТКО представляют собой гетерогенную смесь различных по крупности, свойствам, ценности и степени опасности компонентов, что усложняет комплексное управление ТКО, в частности, выбор технологий их переработки (особенно с учетом ограничительных требований экономики и экологии) [5].

Управление ТКО — это технологический процесс, включающий системно связанные операции их сбора, удаления, обработки, переработки, утилизации, захоронения [6].

В среднем российские ТКО содержат: пищевые и растительные отходы 20—30 %, макулатурообразующие компоненты 20—25 %, пластмассы 6—10 %, стекло 3—7 %, текстиль 3—5 %, черные металлы 3—4 %, цветные металлы 0,3—0,5 %, по 1—2 % — дерево, кожа, резина, камни, керамика, кости; 10—15 % приходится на прочие компоненты и так называемый отсев — фракцию менее 20 мм переменного состава. Выход крупной фракции (более 200 мм) составляет 15—20 % [7].

Важнейшую роль в процессе управления ТКО играет технологическая операция сортировки, поскольку её можно использовать для оптимизации состава ТКО (с точки зрения гомогенизации, повышения и стабилизации теплотворной способности, извлечения полезных компонентов, снижения содержания опасных и балластных компонентов и др.).

Сортировка как подготовительная операция оптимизирует последующие производства, является важнейшим первичным мероприятием по сокращению потока ТКО на захоронение и сжигание, по уменьшению токсичных выбросов при термической переработке ТКО [8].

Применяемые в России технологические процессы плохо выполняют задачи ресурсосбережения и экологической безопасности, что является следствием низкого качества сырья на входе в процесс — система подготовки отсутствует: ни технология сжигания, ни технология биокомпостирования, ни технология извлечения из ТКО ресурсоценных компонентов с помощью ручной сортировки на конвейерных линиях не предусматривают предварительную подготовку отходов к технологическим процессам. При прямом сжигании и компостировании всей образующейся массы ТКО происходит потеря ценных

компонентов, а также снижается экономическая и экологическая эффективность процесса. При ручной сортировке "грязного мусора" большая часть ценных компонентов теряется с хвостами сортировки (выход вторсырья не превышает 8—10 % — от поступающего на ручную сортировку количества ТКО, в то время как в ведущих странах ЕС выход вторсырья находится на уровне 40—65 % — от общего количества образующихся в этих странах ТКО); кроме того, при сортировке "грязного мусора" резко снижается качество вторсырья [9].

Целевая задача повышения эффективности процессов ресурсо- и энергосбережения при обращении с ТКО — оптимизация состава сырья на входе в процесс и реализация соответствующих требований к оборудованию (имея в виду выбор наиболее эффективных устройств и аппаратов).

Основой расчета характеристик отходов на входе в тот или иной процесс являются данные по составу исходных ТКО и блок-схема их комплексного управления (рис. 1), соответствующая требованиям Федерального закона "Об отходах производства и потребления" от 29.12.2014 г. № 458 ФЗ и учитывающая опыт мировой практики управления отходами по критериям экологической безопасности, ресурсо- и энергосбережения:

- в качестве первоочередной задачи при обращении с ТКО принято вторичное использование ценных компонентов (их своевременное выделение из ТКО в качестве ВМР — вторичных материальных ресурсов) — этап ресурсосбережения;
- остаточные после выделения ВМР отходы используются в качестве ВЭР — вторичных энергоресурсов (термическая утилизация обогащенной фракции ТКО — этап энергосбережения).

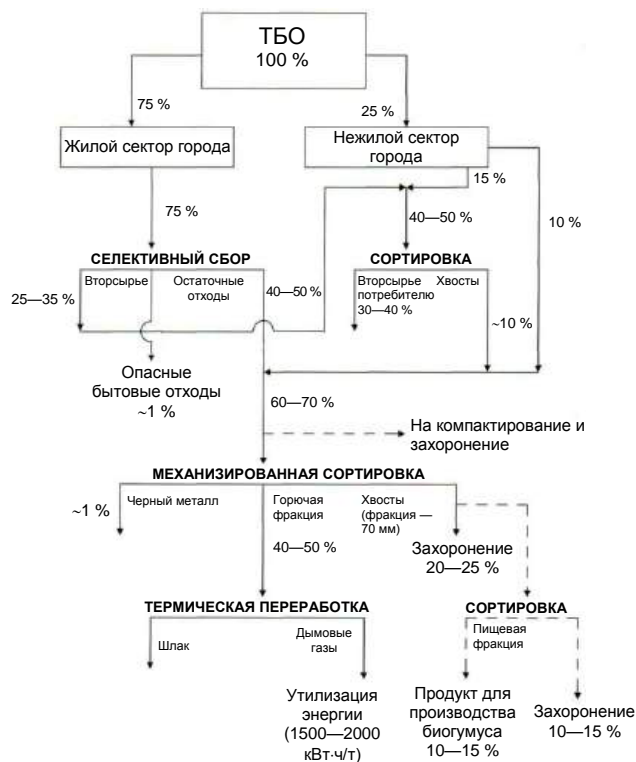


Рис. 1. Блок-схема комплексного управления ТКО по критериям экологической безопасности, ресурсо- и энергосбережения

При таком подходе к технологическим решениям, как показывает мировой опыт управления ТКО, сводятся к минимуму затраты и экологические риски [10].

Реализация этапа ресурсосбережения требует оптимизации системы сбора ТКО и базируется на применении технологической операции сортировки в двух точках:

- в источниках образования (на стадии селективного пофракционного сбора вторсырья применяется принцип "делим на два": вторсырье собирают в одну емкость, остаточные отходы — в другую);
- на сортировочных комплексах (на стадии доводки вторсырья — сортировка по видам и сортам, подготовка рассортированного вторсырья к переработке).

Оборудование для селективного пофракционного сбора вторсырья — спецконтейнеры (подлежат конструированию и изготовлению) [11].

Требования к сырью на входе в процесс сортировки на сортировочном комплексе, % (целевое

назначение операции сортировки — извлечение ресурсноценных компонентов ТКО для последующей переработки): макулатура — 50...60; металлы — 2...10; текстиль — 2...5; стекло — 5...10; ПЭТФ — 5...15; полимерная пленка — 3...5; прочее — 5...10.

Такой состав сырьевой смеси ценных компонентов в питании операции сортировки обеспечивает выход вторсырья на практически легко осуществимом уровне 30 %, обеспечивающем выгоду сортировки (на практике этот уровень во времени будет повышаться и составит 40, а возможно, и 50 %). Таким образом, на стадии ресурсосбережения количество захораниваемых отходов, снижается по массе на 30—40 % [12].

Остаточные (после выделения вторсырья и опасных компонентов) отходы и хвосты сортировки вторсырья подлежат механизированной сортировке (рис. 2) в целях подготовки ТКО к термической переработке (в частности, к процессу газификации) [13—15].

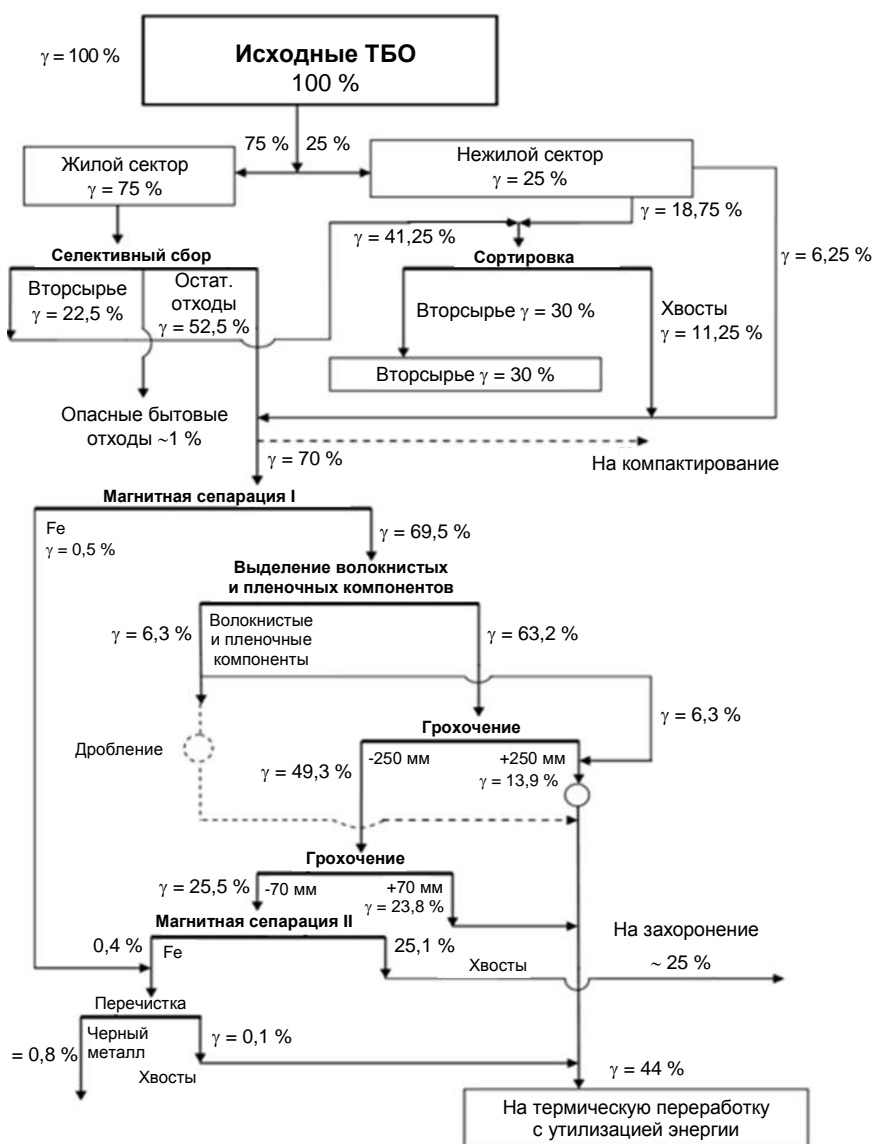


Рис. 2. Технологическая схема сортировки и переработки ТКО, отвечающая приоритетам обращения с отходами (γ — выход продуктов сортировки в % от общего количества городских ТКО)

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

Выбор типоразмера оборудования определяется видом сортировки, производительностью технологической линии и опытом мировой практики.

Следует отметить, что значительная часть ТКО, поступающих в контейнеры для их сбора, затарена в мешки (чаще всего в полиэтиленовые пакеты), поэтому в технологиях сортировки должна быть предусмотрена операция вскрытия пакетов (по возможности без дробления содержимого пакетов).

В последующих работах будет представлен анализ рынка оборудования, применяемого для сортировки и переработки техногенного сырья.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Борисова О. Н. Сравнительный анализ технологий по сортировке отходов компании "BENLI RECYCLING GROUP" и регионального оператора "ТБО "ЭКОСЕРВИС" // Экология промышленного производства. 2021. № 1(113). С. 8—11.
2. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Оптимизация системы комплексного управления ТБО в Российской Федерации (обосновывающие материалы и стратегия) // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. 2018. № 1. С. 2.
3. Борисова О. Н. Предпосылки для рационального ресурсосбережения — создание экотехнопарков // Славянский форум. 2018. № 2(20). С. 124—129.
4. Шубов Л. Я., Борисова О. Н. Об оптимизации управления твердыми бытовыми отходами в системе ЖКХ // ЖКХ. 2013. № 11. С. 20—29.
5. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Юдин А. Г., Грешишкин В. С. Принципы Zero Waste: современное прочтение // Твердые бытовые отходы. 2013. № 5(83). С. 8—11.
6. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Юдин А. Г., Грешишкин В. С. Принципы Zero Waste: современное прочтение // Твердые бытовые отходы. 2013. № 6(84). С. 8—13.
7. Шубов Л. Я., Борисова О. Н. Исследование территории заблуждений // Твердые бытовые отходы. 2013. № 7(85). С. 42—47.
8. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Технологии обращения с отходами: преимущества и недостатки, мифы и реалии // Твердые бытовые отходы. 2011. № 10(64). С. 10—15.
9. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Ситуация с отходами в московском регионе: планы и реалии (продолжение) // Твердые бытовые отходы. 2010. № 2(44). С. 27—35.
10. Шубов Л. Я., Борисова О. Н. Повышение комплексного использования твердых коммунальных отходов: в сб.: Современные проблемы туризма и сервиса. Материалы всероссийской научной конференции аспирантов и молодых ученых, 16 апреля 2009 г. Федеральное агентство по образованию, Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Российский гос. ун-т туризма и сервиса"; [редсовет: Федюлин А. А. — пред. и др.]. Москва, 2009. С. 6—11.
11. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Стратегия оптимизации комплексного управления твердыми бытовыми отходами в Российской Федерации // Экология промышленного производства. 2017. № 4(100). С. 16—25.
12. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Введение в стратегию оптимизации комплексного управления ТБО // ЖКХ. 2017. № 1. С. 47—52.
13. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Коротко и популярно о ТКО: сигнал SOS // Твердые бытовые отходы. 2017. № 2(128). С. 45—47.
14. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Оптимизация комплексного управления ТКО в РФ // Твердые бытовые отходы. 2017. № 9(135). С. 8—11.
15. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Средства массовой информации о твердых бытовых отходах: корректировка мнений (многоаспектные аспекты проблемы твердых бытовых отходов) // Экологические системы и приборы. 2016. № 11. С. 40—46.

## Principles of technology optimization and equipment selection when involving municipal solid waste in production processes

O. N. BORISOVA, L. M. TYGER

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

*The choice of equipment for the implementation of municipal waste sorting processes is based on the analysis of the market of equipment for processing technogenic raw materials. As part of the implementation of a scientifically based strategy for municipal waste management, the requirements for the technological efficiency of the processes of exposure to waste for the purpose of their processing and disposal are determined by the requirements for raw materials and equipment at the entrance to the technological process implemented using this equipment (with mandatory compliance with a certain sequence of solving technological problems).*

**Keywords:** municipal waste, technologies, equipment, technological processes, energy saving, resource saving.

**Bibliography** — 15 references.

*Received December 24, 2021*

УДК 666

DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_2\_6

EDN: EPODAK

## Применение стеклобоя для получения стеклокерамического материала электротехнического назначения

Е. С. ПИКАЛОВ, канд. техн. наук

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

*Представлены результаты исследований возможности использования наиболее распространенных видов стеклобоя совместно с кварцевым песком для получения стеклокерамического материала электроизоляционного назначения. Для пластификации шихты и в качестве временной технологической связки в состав шихты дополнительно вводили водный раствор поливинилового спирта. Приведены зависимости основных свойств получаемого материала от количества стеклобоя и его химического состава. Полученный материал отличается достаточно высокими для материала электротехнического назначения величинами физико-механических и диэлектрических характеристик. Термический коэффициент линейного расширения в интервале от 20 до 500 °С позволяет получать с помощью разработанного материала согласованные спай с молибденом, вольфрамом, коваром и их сплавами. Применение разработанного состава может расширить возможности утилизации стеклобоя, в том числе отходов потребления, с получением изделий электротехнического назначения.*

**Ключевые слова:** стеклобой, утилизация отходов, кварцевый песок, стеклокерамика, электроизоляционный материал, согласованный спай.

В связи с широкой распространенностью стекла и изделий из него ежегодно образуется большое количество стекольных отходов производства и потребления, называемых стекольным боем или стеклобоем. За рубежом технологии по переработке стеклобоя достаточно широко распространены и активно развиваются, в то время как в России стекольные отходы производства практически полностью перерабатываются стекольными предприятиями, а стекольные отходы потребления в достаточно большом количестве (до 8—10 % от общей массы бытовых отходов [1, 2]) накапливаются на свалках. Это связано с недостаточной эффективной системой селективного сбора и сортировки отходов, а также с малым количеством предприятий, занимающихся утилизацией стекольных отходов потребления. В то же время переработка стекольных отходов потребления на стекольных предприятиях ограничена наличием примесей и различием в химических составах, а следовательно, в цвете и свойствах не только стекол для разного назначения, но и для стекол разных предприятий, выпускающих схожую продукцию [3]. Учитывая долговечность и стойкость стекла к внешним воздействиям, разработка технологий по утилизации бытового стеклобоя является актуальной задачей.

Стеклобой применяют для производства стекловолокна и изделий из него, силикатного клея, пеностекла, сигра, стеклокристаллита, стеклошариков, строительных изделий в виде стеклоплитки, стеклочерепицы или смальты [4—6], в качестве связующего, наполнителя или функциональной добавки при производстве керамики, бетонов и др. строительных материалов, в дорожном строительстве и др. [1, 7, 8]. Одной из перспективных областей применения стеклобоя является электротехника, где стекло во многом сравнимо, а по ряду показателей превосходит полимеры, керамику и др. электроизоляционные материалы. Это связано с высокими диэлектрическими характеристиками стекла, а также с высокими значениями по смачиваемости и адгезии данного материала по отношению к большинству других материалов, в том числе металлов и их сплавов, которые широко используют в электротехнике в качестве проводников. В сочетании с высокими показателями химической стойкости и термостойкости это позволяет использовать стекло и материалы на его основе, такие как эмали, стеклокерамика и стекломатричные композиционные материалы, для получения вакуумплотных электроизоляционных соединений, называемых спаями, с металлами и сплавами, а также для нанесения на металлы, сплавы покрытий для электроизоляции, защиты от окисления и коррозии при обычной и повышенной температурах [9—11]. Кроме того, стекло и материалы на его основе можно применять для изготовления электрических изоляторов.

Автором ранее был разработан стеклокерамический материал, для получения которого в качестве

Пикалов Евгений Сергеевич, доцент кафедры "Химические технологии".

E-mail: evgeniy-pikalov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 3 марта 2022 г.

© Пикалов Е. С., 2022



связующего можно применять бой листового оконного стекла или бой тарного зеленого стекла, а в качестве наполнителя использовать кварцевый песок [9]. Данный материал отличается высокой прочностью на изгиб, низким водопоглощением и термическим коэффициентом линейного расширения, согласующимся с термическим расширением молибдена.

Цель работы — исследование возможности применения наиболее распространенных видов стекольного боя для получения стеклокерамического материала электротехнического назначения на основе кварцевого песка, определение зависимости основных эксплуатационных свойств получаемого материала от количества и химического состава стекольного боя.

### Сырьевые материалы и методы исследования

Для проведения исследований из общей массы отходов потребления были отобраны бой листового оконного, сортового и тарного стекла, являющихся наиболее распространенными видами стекольных отходов. В результате анализа состава было установлено, что в соответствии с ГОСТ 34382-2017 к отобранному тарному стеклобою относятся бой бесцветного стекла марки БТ-1, полубелого стекла марки ПТ, зеленого стекла марки ЗТ-1 и коричневого стекла марки КТ. Усредненный химический состав отобранных видов стекольного боя представлен в табл. 1.

В качестве наполнителя в данной работе применялся кварцевый песок с содержанием  $\text{SiO}_2$  не менее 98,5 масс. %, соответствующий марке С-070-1 по ГОСТ 22551-2019. Для пластификации шихты и в качестве временной технологической связки в состав шихты дополнительно вводили 10 масс. % водного

раствора, содержащего 6 масс. % поливинилового спирта марки 6/1 первого сорта по ГОСТ 10779-78.

Для получения образцов исследуемого материала стеклобой и кварцевый песок предварительно высушивали до постоянной массы и измельчали с отбором фракции с размером частиц не более 0,08 мм. После этого стеклобой и кварцевый песок перемешивали в начале в сухом состоянии, а затем с добавлением 10 масс. % водного раствора поливинилового спирта до получения однородной массы, из которой при давлении 30 МПа получали образцы материала с последующим обжигом при температуре 1000 °С [9]. Для каждого исследуемого состава шихты изготавливали серии по пять образцов с последующим определением средних арифметических значений исследуемых свойств.

У серий образцов по стандартным для силикатных материалов методикам определяли прочность на изгиб ( $\sigma_{\text{изг}}$ , МПа), водопоглощение (В, %), плотность ( $\rho$ ,  $\text{кг/м}^3$ ), термический коэффициент линейного расширения в интервале от 20 до 500 °С ( $\alpha_L$ ,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), диэлектрическую проницаемость при частоте  $10^6$  Гц ( $\epsilon$ ), удельное объемное сопротивление при 20 и 300 °С ( $\lg \rho_v$ , Ом·м), а также температуру, при которой удельное объемное сопротивление составит  $10^8$  Ом·м ( $\text{TK}_{100}$ , °С).

### Результаты экспериментов и их обсуждение

В результате проведенных исследований было установлено, что зависимость прочности на изгиб разрабатываемого стеклокерамического материала от количества всех видов применяемого стеклобоя носит аналогичный характер и рассматриваемое свойство достигает своего максимума при 35 масс. % стеклобоя в составе шихты (см. рис. 1).

Химический состав стеклобоя, масс. %

Таблица 1

Стекло	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$
Оконное	73,5	0,9	—	7,4	1,9	11,1	5,2	—
Сортовое	73,5	1,5	—	6,5	2	11,5	1,5	—
Тарное:								
БТ-1	72,5	2,5	0,1	6,2	4,2	14,0	0,5	—
ПТ	72,1	2,8	0,5	6,2	4,2	14,2	—	—
ЗТ-1	71,4	2,7	0,8	6,2	4,2	14,5	—	0,2
КТ	71,7	2,9	0,5	6,2	4,2	14,5	—	—

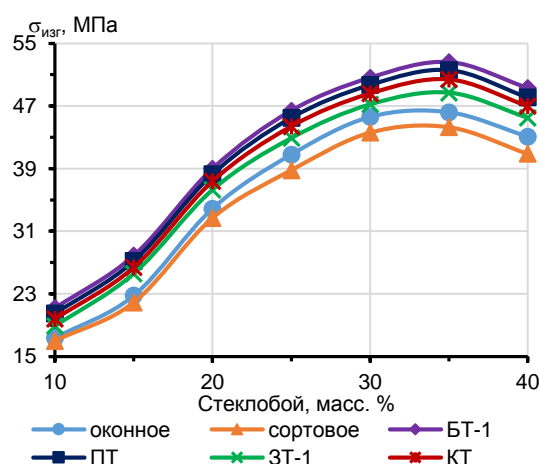


Рис. 1. Зависимость прочности на изгиб стеклокерамического материала от вида и содержания стеклобоя

Подобный характер зависимости стеклокерамического материала можно объяснить тем, что стекlobой в процессе обжига образует стеклофазу, заполняющую пустоты между частицами кварцевого песка, а после обжига выступает в качестве связующего и образует прочный каркас из частиц кварцевого песка, соединенных через слои стеклофазы. При этом процесс образования каркаса сопровождается уплотнением материала и повышением его прочности. При содержании стекlobоя менее 10 масс. % стеклофазы недостаточно для получения прочных образцов, в которых все частицы кварцевого песка связываются стеклофазой, а при содержании стекlobоя свыше 35 масс. % наблюдается избыток стеклофазы. При содержании стекlobоя в количестве 35—40 масс. % избыток стеклофазы приводит к повышению толщины слоев стеклофазы и увеличению расстояния между частицами кварцевого песка до такой степени, что на прочность материала начинает влиять прочность стеклофазы, которая меньше, чем прочность стеклокерамического материала. При содержании стекlobоя в количестве более 40 масс. % стеклофазы становится настолько много, что это проявляется в деформации образца при обжиге в результате оплавления.

Различия в величинах прочности образцов, полученных с использованием разных видов стекlobоя, можно объяснить разностью прочности стеклофазы, а, следовательно, разностью прочности ее слоев в составе каркаса в объеме образцов. Прочность стеклофазы зависит от ее химического состава — повышается с увеличением количества оксидов кремния, алюминия, кальция и магния, а снижается с увеличением количества оксидов натрия и калия [12—14]. В связи с этим наименьшей прочностью обладают материалы, полученные с использованием боя листового оконного и сортового стекол, которые содержат меньше оксидов кальция и магния при большем содержании оксидов натрия и калия. Наибольшей прочностью обладает материал, полу-

ченный с использованием полубелого тарного стекла марки БТ-1, что объясняется наибольшим содержанием суммы оксидов кремния и алюминия в его составе.

При исследовании водопоглощения разрабатываемого стеклокерамического материала было установлено, что с увеличением количества стекlobоя в составе шихты наблюдается снижение рассматриваемого свойства (см. рис. 2). Это связано с тем, что стеклофаза при обжиге заполняет пустоты в объеме материала, следовательно, чем больше стекlobоя в составе шихты, тем большее количество пустот будет заполнено стеклофазой. При этом наибольшее снижение водопоглощения наблюдается при введении 10—25 масс. % стекlobоя, что связано с эффективным заполнением пустот стеклофазой, при более высоких содержаниях стекlobоя незаполненными остаются пустоты, в которые стеклофаза не может проникнуть из-за своей вязкости, и снижение водопоглощения связано с увеличением доли стеклофазы в объеме материала.

Отличие в значениях водопоглощения материала при использовании разных видов стекlobоя связано с разницей в вязкости стеклофазы, которая образуется при обжиге. Вязкость стеклофазы снижают оксиды кальция, магния, натрия и калия, а повышают — оксиды кремния и алюминия [12—14]. При этом чем ниже вязкость стеклофазы, тем более мелкие пустоты она может заполнить, что приводит к дополнительному снижению водопоглощения. Этим объясняется наименьшее водопоглощение образцов, полученных при использовании боя оконного и сортового стекол, в составе которых выше сумма оксидов, снижающих вязкость, в первую очередь оксидов натрия и калия. В тоже время наибольшим водопоглощением отличается материал, полученный с использованием боя тарного зеленого стекла марки ЗТ-1, в составе которого сумма оксидов, снижающих вязкость, минимальна по сравнению с другими видами рассматриваемых видов стекlobоя.

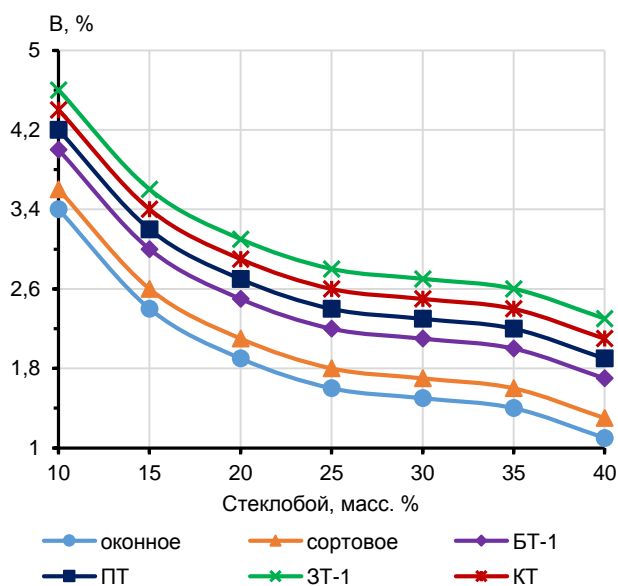


Рис. 2. Зависимость водопоглощения стеклокерамического материала от вида и содержания стекlobоя

В результате экспериментов по определению термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) было установлено, что данный показатель практически линейно повышается с увеличением количества стеклобоя в составе шихты (см. рис. 3). Это связано с тем, что оксид кремния, который в количестве не менее 98,5 масс. % содержится в применяемом кварцевом песке, отличается очень низким ТКЛР, равным  $5 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  [13, 15], что значительно меньше, чем ТКЛР стекол, бой которых рассматривается в данной работе.

Как и в случае с другими свойствами, различия в значениях ТКЛР при использовании разных видов стеклобоя связаны с ТКЛР стекол, которые зависят от их химических составов. Существенно повышают ТКЛР стекла оксиды калия и натрия, оксиды кальция и магния также способствуют повышению ТКЛР, а оксиды кремния и алюминия снижают данное свойство [12, 13, 15]. Это является причиной наименьшей величины ТКЛР у материала, полученного с использованием боя тарного полубелого стекла, которое в наименьшей степени содержит суммарное количество оксидов, повышающих рассматриваемое свойство. В тоже время в составе листового оконного стекла оксиды, повышающие ТКЛР, содержатся в наибольшей степени, поэтому при использовании боя данного стекла стеклокерамический материал отличается более высокими значениями исследуемого свойства.

При исследовании диэлектрической проницаемости образцов разрабатываемого материала было установлено, что данное свойство повышается с увеличением количества стеклобоя в составе шихты (см. рис. 4). Как и в случае с ТКЛР это объясняется тем, что у оксида кремния, из которого преимущественно состоит кварцевый песок, диэлектрическая

проницаемость равна 3,8 [13, 15], что значительно меньше диэлектрической проницаемости стекол, бой которых был использован.

Отличия в диэлектрической проницаемости для материалов, полученных с использованием разных видов стеклобоя, связаны с различиями в величинах данного свойства у стекол. Известно, что в первую очередь оксиды калия и натрия, а также оксиды кальция и магния повышают диэлектрическую проницаемость [12, 13, 15]. В связи с этим наименьшей диэлектрической проницаемостью отличаются образцы, полученные с применением боя листового оконного и сортового стекла, а наибольшей диэлектрической проницаемостью характеризуются образцы, полученные с использованием боя тарного зеленого стекла марки ЗТ-1.

В связи с тем, что максимальная прочность разрабатываемого стеклокерамического материала достигается при введении 35 масс. % стеклобоя для образцов, полученных при использовании данного количества стеклобоя были проведены дополнительные исследования свойств, результаты которых представлены в табл. 2.

Из данных таблицы видно, что полученные стеклокерамические материалы характеризуются высокой прочностью и низким водопоглощением. Плотность разработанных материалов низкая по сравнению с другими силикатными электроизоляционными материалами, а диэлектрическая проницаемость и удельно объемное сопротивление сходны со значениями для электровакуумного стекла марки С 38-1 (ЗС-9) из вольфрамовой группы. Величины ТКЛР полученных материалов позволяют получать согласованные спаи с проводниками из вольфрама, молибдена, кобальта и их сплавов, которые относятся к наиболее распространенным в электротехнике.

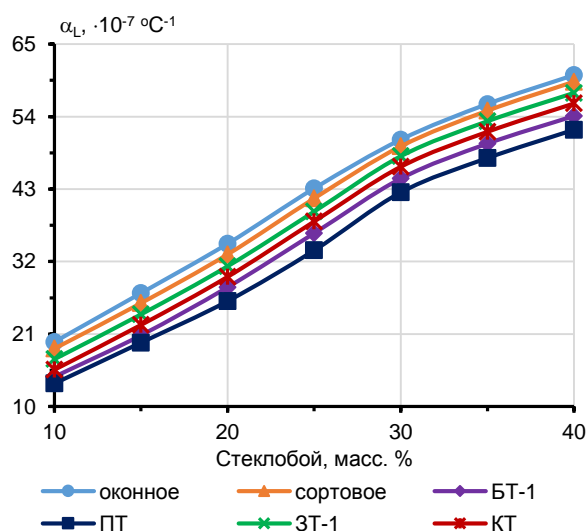


Рис. 3. Зависимость термического коэффициента линейного расширения стеклокерамического материала от вида и содержания стеклобоя

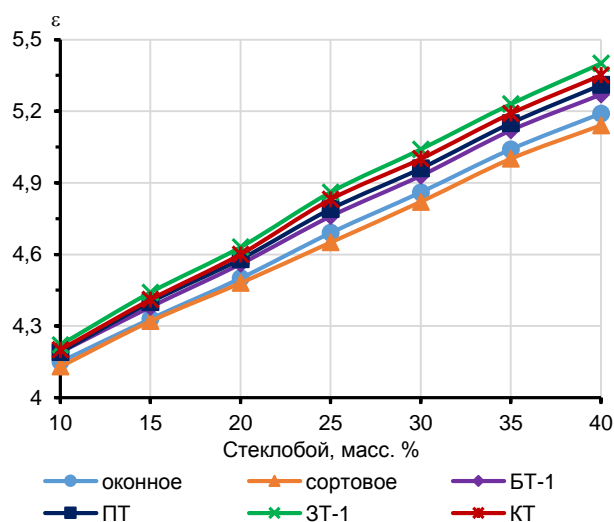


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости стеклокерамического материала от вида и содержания стеклобоя

Таблица 2

Свойства электроизоляционного стеклокерамического материала

Свойство	Значение для материала, содержащего 35 масс. % боя соответствующего вида стекла					
	оконное	сортовое	БТ-1	ПТ	ЗТ-1	КТ
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1800,6	1797,7	1804,7	1809,7	1815,4	1810,8
$\sigma_{изг}$ , МПа	46,2	44,3	52,6	51,6	48,7	50,4
$B$ , %	1,4	1,6	2	2,2	2,6	2,4
$\alpha_L \cdot 10^{-7}$ , °C <sup>-1</sup>	55,9	54,9	49,9	47,7	53,3	51,7
$\varepsilon$	5,04	5	5,12	5,15	5,23	5,19
$lg\rho_v$ , Ом·м:						
– при 20 °C	17,2	17,6	16,6	16,5	16,5	16,5
– при 300 °C	9,9	9,9	9,4	9,4	9,4	9,4
$TK_{100}$ , °C	480	480	440	433	433	433

### Заключение

В результате выполненных исследований был разработан состав шихты, включающий 65 масс. % кварцевого песка и 35 масс. % боя наиболее распространенных видов стекла: оконного, сортового и тарного различных цветов. В качестве временной технологической связки в состав шихты дополнительно вводится 10 масс. % водного раствора, содержащего 6 масс. % поливинилового спирта.

Полученные при использовании данного состава шихты стеклокерамические материалы отличаются достаточно высокими для материала электротехнического назначения величинами физико-механических и диэлектрических характеристик, сохраняя свои электроизоляционные свойства до температур не менее 430 °C для всех видов стекольного боя и до температур 480 °C для боя листового оконного и сортового стекол. При превышении указанных характеристических температур, которые являются максимальными при эксплуатации разработанных материалов, удельное объемное сопротивление превысит значение, равное  $10^8$  Ом·м, которое является пограничным значением между диэлектриками и полупроводниками.

При использовании разработанного состава и применении боя листового или оконного стекол получаемые стеклокерамические материалы по величине ТКЛР в наибольшей степени подходят для получения согласованных спаев с молибденом ( $\alpha_L = 55 \cdot 10^{-7}$  °C<sup>-1</sup>), а при применении бесцветного тарного стекла получаемые стеклокерамические материалы по величине ТКЛР в наибольшей степени подходят для получения согласованных спаев с коваром ( $\alpha_L = 50 \cdot 10^{-7}$  °C<sup>-1</sup>). Следует отметить, что при снижении содержания бесцветного тарного стекла до 30 масс. % может быть получен стеклокерамический материал с ТКЛР равным  $44,6 \cdot 10^{-7}$  °C<sup>-1</sup>, что позволит получить согласованный спай с вольфрамом ( $\alpha_L = 44,4 \cdot 10^{-7}$  °C<sup>-1</sup>).

Таким образом, разработанный состав шихты и стеклокерамический материал на ее основе может эффективно использоваться для производства электрических изоляторов, получения согласованных спаев с проводниками из вольфрама, молибдена, ковара и их сплавов для вакуумплотных электроизоляционных соединений, а также для нанесения на них покрытий для защиты от окисления и коррозии

при обычной и повышенной температурах. Применение стекольного боя позволит расширить возможности его утилизации, в том числе и отходов потребления, для получения изделий электротехнического назначения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Вайсман Я. И., Кетов А. А. Воздействие на окружающую среду и перспективы переработки стеклобоя // Вестник ПНИПУ. Урбанистика. 2011. № 4. С. 78–95.
2. Маркова А. А., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г., Чухланов В. Ю., Подолец А. А. Комплексная утилизация отходов Владимирской области в производстве высокопрочной строительной керамики из местной малопластичной глины // Экология промышленного производства. 2016. № 3. С. 14–17.
3. 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.
4. Мелконян Р. Г. Все об отходах стекла // Твердые бытовые отходы. 2014. № 5. С. 10–15.
5. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Строительные материалы из отходов: учебно-справочное пособие. — Ростов н/Д: Феникс, 2007. — 368 с.
6. Торогожина Ж. Р., Пономаренко О. И., Турешева Г. О., Омаров А. Т. Эколого-химические проблемы утилизации стеклобоя в качестве вторичного сырья // Вестник КазНУ. Сер. Химическая. 2012. № 1. С. 199–201.
7. 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.
8. 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.
9. Торлова А. С., Виткалова И. А., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г., Сысоев Э. П., Чухланов В. Ю. Разработка стеклокерамического материала для получения согласованных спаев с молибденом // Стекло и керамика. 2017. № 3. С. 40–43.
10. Солнцев С. С., Соловьева Г. А., Денисова В. С. Электроизоляционные эмалевые покрытия для современной электронной техники // Труды ВИАМ. 2014. № 9. С. 8.
11. Левицкий И. А., Папко Л. Ф., Дяденко М. В. Стеклоцементы для вакуумплотных спаев // Труды БГТУ. № 3. Химия и технология неорганических веществ. 2015. № 3(176). С. 3–8.
12. Блюмен Л. М. Глазури. — Репр. изд. 1980 г. — М.: ООО "Книга по требованию", 2012. — 171 с.
13. Казьмина О. В., Беломестнова Э. Н., Дитц А. А. Химическая технология стекла и ситаллов: учеб. пособие. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. — 170 с.
14. Постников В. С. Оптическое материаловедение: курс лекций. — Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. — 280 с.
15. Алпен А. А., Асланова М. С., Амосов Н. П., Артамонова М. В. и др. Стекло: справочник / под ред. Н. М. Павлушкина. — М.: Стройиздат, 1973. — 487 с.



## Application of cullet for the production of glass-ceramic material for electrical purposes

E. S. PIKALOV

Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletovs, Vladimir, Russia

*This article presents the results of research on the possibility of using the most common types of cullet together with quartz sand to obtain a glass-ceramic material for electrical insulation purposes. For the plasticization of the charge and as a temporary technological bundle, an introductory solution of polyvinyl alcohol was additionally introduced into the composition of the charge. The article presents the dependences of the main properties of the obtained material on the amount of cullet and its chemical composition. The resulting material is characterized by sufficiently high values of physical and mechanical, and dielectric characteristics for an electro-technical material. The thermal coefficient of linear expansion in the range from 20 to 500 °C will make it possible to obtain consistent junctions with molybdenum, tungsten, kovar and their alloys using the developed material. The use of the developed composition can expand the possibilities for the disposal of cullet, including in relation to consumer waste, with the receipt of electrical products.*

**Keywords:** cullet, recycling of wastes, quartz sand, glass-ceramic, electroinsulating material, matched seal.

**Bibliography** — 15 references.

*Received March 3, 2022*

УДК 504.064.4

DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_2\_12

EDN: EZCBJX

## Комплексное использование электронного и электротехнического лома

<sup>1</sup> Л. Я. ШУБОВ, д-р техн. наук; <sup>1,2</sup> И. Г. ДОРОНКИНА, канд. техн. наук;  
<sup>1,3</sup> Т. С. СМЕРНОВА, канд. техн. наук; <sup>1</sup> О. В. ГОЛУБ

<sup>1</sup> ФГАУ «НИИ «Центр экологической промышленной политики»,  
г. Мытищи, Московская обл., Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Российский государственный университет туризма и сервиса»,  
пос. Черкизово, Пушкинский р-н, Московская обл., Россия

<sup>3</sup> Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина,  
Москва, Россия

*Создание эффективной системы обращения с электронным и электротехническим ломом (транзисторы, реле, проволока, радиоэлектронный лом, телевизоры и мониторы компьютеров, персональные компьютеры и калькуляторы, вакуумные трубки) является актуальной задачей реализации в РФ принципов экономики замкнутого цикла. Статья посвящена систематизации технологических решений в сфере утилизации электронного и электротехнического лома с использованием методов сепарации (электрической и магнитной сепарации, флотации, пневмоклассификации), пиро- и гидрометаллургии для извлечения цветных и благородных металлов и возврата их в экономический оборот.*

**Ключевые слова:** электронный и электротехнический лом, методы сепарации, плавка, гидрометаллургия, вторичное сырье.

Первой страной, признавшей остроту проблемы обращения с отходами электронного и электротехнического оборудования, стала Швейцария. В стране в 1995 г. была разработана директива, определяющая обязательства заинтересованных сторон и порядок финансирования деятельности по утилизации отходов электронного и электротехнического оборудования: потребитель обязан сдать (вернуть) эти отходы, дилер обязан бесплатно их принять, а импортер (производитель) организовать (или участвовать в системе организации) сбор отходов от использования

своей продукции и экологически безопасно их утилизировать в соответствии с наилучшими доступными технологиями (НДТ) (НДТ для отходов электронного и электротехнического оборудования (ОЭЭО) разработаны совместно властями, промышленностью и операторами по обращению с отходами).

Точное количество образующегося в мире электронного и электротехнического лома неизвестно. Согласно открытым данным, ежегодно в мире образуется около 50 млн т электронного лома; наибольшее количество приходится на страны ЕС — приблизительно 25 % всех ОЭЭО (прирост около 2,5 % в г.) [1].

Анализ образования ОЭЭО, проведенный в одном из районов Индии, показал, что ежегодно на душу населения образуется порядка 3,1 кг таких отходов. Электронный лом в основном представлен мобильными телефонами, ноутбуками, стиральными машинами, кондиционерами, обогревателями, светодиодами и жидкокристаллическими мониторами. Ежегодно в Индии образуется порядка 10 тыс. т электронного лома. Одна из эффективных форм его сбора — продажа в качестве вторичного сырья (продавцы лома осведомлены о прибыльности утилизации электронного лома) [2]. Особенно привлекательны для целей утилизации мобильные телефоны (извлечение ценных функциональных компонентов и металлов из плат мобильных телефонов) [3].

**Шубов Лазарь Яковлевич**, профессор, старший научный сотрудник.

E-mail: l.shubov@eipc.center

**Доронкина Ирина Геннадиевна**, доцент, старший научный сотрудник.

E-mail: doronkinaig@mail.ru

**Смирнова Татьяна Сергеевна**, заместитель начальника отдела методологии ресурсосбережения, доцент кафедры "Промышленная экология".

E-mail: Tatsmirnova82@mail.ru

**Голуб Ольга Владимировна**, начальник отдела методологии ресурсосбережения.

E-mail: o.golub@eipc.center

Статья поступила в редакцию 18 марта 2022 г.

© Шубов Л. Я., Доронкина И. Г., Смирнова Т. С., Голуб О. В., 2022

Установлено, что при утилизации печатных плат электронного скрапа предварительное удаление меди и сопутствующих металлов с использованием бром-бромидного раствора существенно интенсифицирует процесс выщелачивания серебра, золота и палладия. Предварительное удаление основной части меди позволяет снизить ее содержание в продуктивном растворе в 10 раз. В условиях коллективного выщелачивания серебра, золота и палладия слабо-кислым ( $\text{pH} = 2$ ) бром-бромидным раствором (содержание бромид-ионов  $100,8 \text{ г-дм}^3$ ) извлечение металлов составляет 97,2—98,6 %. Для осаждения золота, серебра и палладия из продуктивных растворов весьма эффективно применение цинковой пыли, медного порошка и раствора гидразина (в частности, золото выделяется на цинковой пыли в форме цементного порошка чистотой 99,4 %) [4].

При использовании  $\text{HCl}$  для выщелачивания металлов из смешанного лома керамики и электроники серебро селективно осаждается в виде  $\text{AgCl}$ . Осадок растворяют в  $\text{NH}_4\text{OH}$  и восстанавливают до нанопорошка серебра, используя гидразин ( $\text{N}_2\text{H}_4$ ). При этом в качестве стабилизатора процесса используют поливинилпирролидон. Технология позволяет извлекать наноразмерное серебро из обожженного при низкой температуре смешанного лома керамики и электроники [5].

При переработке измельченных печатных плат на стадии извлечения меди с помощью серноокислотного выщелачивания получают растворы с высоким содержанием палладия. Растворенный палладий экстрагируется раствором диизоамилсульфида в додекане. При соотношении водной и органической фаз 5:1 извлечение палладия из раствора составляет 99,4 %. Реэкстракция палладия проводится водным 0,1М раствором  $\text{NH}_3$  в две стадии (при соотношении водной и органической фаз 1:1); при этом извлечение палладия — 99,5 %. Общая степень извлечения палладия из печатных плат по данной технологии (растворение—экстракция—реэкстракция) составляет 96,9 % [6].

В работе [7] авторами приведена информация о технологии прямого извлечения меди из скрапа дробленых печатных плат с содержанием примерно 48 %  $\text{Cu}$ , 40 % других металлов и 12 % неметаллов. Технология предусматривает электрохимическое растворение — осаждение (скрап печатных плат анодно растворяют в сульфатном электролите, осаждая на катоде чистую медь). В анодном материале остаются  $\text{Sn}$ ,  $\text{Pb}$  и неметаллы с небольшим количеством меди ( $\text{Sn}$  и  $\text{Pb}$  могут быть использованы в качестве припоя). Извлечение меди по данной технологии составляет 96 %. Для достижения высокого показателя извлечения меди рекомендуется перемешивание электролита при 400 об/мин в течение 15 ч при 25 °C.

Активно развиваются биотехнологии выщелачивания металлов, в том числе из отходов. Извлечение меди из отработанных печатных плат возможно с применением смешанной культуры двух видов ацидофильных бактерий: *Acidithiobacillus thiooxidans* и *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Оптимальные условия выщелачивания: продолжительность процесса — 240 ч,  $\text{pH} = 1,56$ , соотношение численности популя-

ций в субстрате — 1:2, наличие питательных компонентов: элементарной серы — 5,4 г/л и  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  — 16,9 г/л, расход отходов — 28,8 г/л. Извлечение меди составляет 92,6 % [8].

Перспективно биовыщелачивание электронного лома, отличающегося весьма малым содержанием меди (из печатных плат, проводов малых сечений, абразивных порошков и т. п.). Целью биовыщелачивания является получение чистого порошка меди. Регенерированные отработанные биорастворы можно использовать повторно [9].

Разработано несколько технологических вариантов извлечения золота и меди из печатных плат отработанных мобильных телефонов и других отходов электроники [10]:

- биовыщелачивание с применением цианогенерирующих бактерий штамма *Bacillus megaterium*; при содержании золота в печатных платах 130 г/т его извлечение составляет около 100 %, меди — 72 % (оптимальные условия процесса:  $\text{pH} = 10$ , плотность пульпы — 8,13 г/л, концентрация глицина — 10 г/л);
- кислотная обработка скрапа ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$  или  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) и экстракция меди с использованием в качестве реагента этилендиаминтетрауксусной кислоты и окислителя (воздух, озон,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) с последующей экстракцией золота раствором тиомочевины. Извлечение меди — более 90 %, золота — также более 90 % (за 1 час выщелачивания);
- извлечение золота из скрапа с использованием персульфата аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$  позволяет получить 98 % золота (состав скрапа, г/кг:  $\text{Au}$  — 1,05,  $\text{Fe}$  — 86,  $\text{Ni}$  — 73,64,  $\text{Cu}$  — 26,65);
- выщелачивание меди из скрапа раствором аммонийных солей, например  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  (извлечение — 95 %), с последующей электроре-экстракцией меди без дополнительной очистки раствора (выход по току — до 90 %);
- концентрирование благородных металлов путем обжига электронного скрапа в течение 10 мин в горизонтальной трубчатой печи при 800—1350 °C в токе аргона (1 л/мин).

Отходы электрического и электронного оборудования отличаются повышенным содержанием галлия ( $\text{Ga}$ ) (лидер производства — Германия, немецкие предприятия являются производителями  $\text{GaAs}$  полупроводниковых пластин), а также индия ( $\text{In}$ ) и иттрия ( $\text{Y}$ ).

В [11] авторы описывают технологию извлечения  $\text{In}$  и  $\text{Y}$  из отработанных дисплеев с плоским экраном, включающую операции выщелачивания  $\text{In}$  и  $\text{Y}$  раствором  $\text{HCl}$  (1М раствор,  $\text{T:Ж} = 0,1 \text{ г/мл}$ ) и экстракции  $\text{In}$  и  $\text{Y}$  раствором экстрагента Cyanex 923 (алкилфосфиновая кислота, 0,25М) в керосине. Образование хлоридных комплексов  $\text{In}$  и  $\text{Y}$  при выщелачивании повышает эффективность их отделения от ионов  $\text{Fe}$ ,  $\text{Cu}$  и  $\text{Al}$  при экстракции. Реэкстракцию  $\text{In}$  и  $\text{Y}$  из органической фазы проводят одномолярным раствором  $\text{HNO}_3$  с последующей очисткой экстракцией диэтилгексилфосфорной кислотой.

Индий концентрируется в классе — 212 мкм отработанных панелей жидкокристаллических дисплеев и полностью выщелачивается серной кислотой

(0,75 моль/л) при 85 °С и плотности пульпы 10 %; время выщелачивания — 3 часа. Извлечение In из раствора проводится сорбцией смолой Amberlite 5 % в течение 24 ч (при pH = 3 и комнатной температуре); реэкстрагируется In серной кислотой [12].

В публикации [13] приведены результаты пиролиза отработанных жидкокристаллических дисплеев с извлечением из стекла (твердые отходы пиролиза) индия путем его выщелачивания водным раствором серной кислоты. Извлечение индия — около 100 % (оптимальные условия: температура — 65,6 °С, продолжительность — 42 мин, 0,6M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Рассмотренные в данной работе запатентованные технологические решения утилизации электронного лома содержат более детальные сведения о его составе и технологических возможностях использования в качестве вторичного сырья.

Целью запатентованной технологии, описание которой приводится в патенте РФ № 2521766 "Способ переработки электронного лома" [14], является повышение эффективности утилизации электронного лома, содержащего благородные металлы (преимущественно печатных схем телевизоров, калькуляторов, компьютеров, сотовых телефонов и другой техники, в которой используют микроэлектронные схемы).

Состав электронного лома, %: медь — 20, серебро — 0,2, золото — 0,02, палладий — 0,001, остальное — полимерные материалы.

Этапность технологического режима:

- дробление электронного лома в молотковой дробилке до крупности 2,5—3 мм;
- смешивание дробленого лома с медью (расход меди 25 % от массы лома);
- шихтование образовавшейся смеси с флюсообразующими добавками (% от массы лома): диоксид кремния — 16, сода — 10, стекло — 15, известь — 8, кокс — 3;
- плавление смеси при температуре 1320—1350 °С с продувкой воздухом в течение 45—60 мин.

В результате плавления получается медный сплав, содержащий, %: медь — 95,4, золото и серебро — 2,6, остальные металлы (железо, свинец, алюминий, олово) — 2,0.

Содержание благородных металлов в сплаве при использовании данной технологии повышается на 46,0 % (относительно).

В патенте США 8882881B2 [15] цель разработки технологии обозначена как повышение эффективности извлечения драгоценных металлов из отработанных печатных плат мобильных телефонов и автомобильных катализаторов с использованием цветного шлака.

Печатные платы мобильных телефонов содержат примерно: 240—400 г/т золота, 2000—3000 г/т серебра, 10—100 г/т палладия, 5—15 масс. % меди, 0,1—0,2 масс. % никеля и 0,3—0,7 масс. % олова. В автомобильных катализаторах содержатся драгоценные металлы: платина, палладий и родий; содержание их составляет около 55—790 г/т.

Технологические решения включают:

- измельчение отходов цветного шлака;

- измельчение отработанных автомобильных катализаторов;
- равномерное смешивание негашеной извести (CaO) (является флюсом для регулирования состава шлака) с отходами цветного шлака, в результате которого образуется смесь с содержанием извести в количестве от 5 до 40 весовых частей из расчета на 100 весовых частей отработанного цветного шлака. Смесь загружается в электрическую печь с последующей плавкой при температуре от 1300 до 1450 °С в течение 10—20 минут;
- введение отработанных печатных плат мобильных телефонов и отработанных автомобильных катализаторов в расплав смеси с последующим плавлением;
- поддержание расплава смеси в течение заданного времени с последующим разделением расплава на фазу сплава, содержащую драгоценные металлы, и фазу шлака, не содержащую драгоценных металлов.

В результате процесса извлекаются драгоценные металлы: золото, серебро, платина, палладий и родий. Также из печатных плат мобильных телефонов и отработанных автомобильных катализаторов могут быть извлечены ценные металлы: железо, медь, никель и олово. Образующийся шлак может быть использован в качестве вторичного сырья в металлургической и цементной отраслях промышленности.

Извлечение меди из отходов электронной и электротехнической промышленности является целью патентования технологии "Способ переработки отходов электронной и электротехнической промышленности" [16].

Изобретение относится к области гидрометаллургии и может быть использовано для извлечения цветных и благородных металлов из электронных плат отработанных электронных приборов, а также других ОЭЭО.

Стадии технологического режима:

- разрушение щелочным раствором лакового покрытия печатных плат при температуре 70—80 °С в течение двух часов; щелочной раствор содержит 40—60 % NaOH и 5—10 % KOH, применяется в присутствии флокулянта "Праестол 650";
- дополнительное перемешивание в течение 1 ч. Далее образовавшуюся суспензию разделяют на две части: осветленную используют для обработки новых порций печатных плат, осадок — накапливают и утилизируют;
- промывка водой и сушка очищенных от лакового покрытия плат после растворения оловянно-го припоя;
- обработка плат раствором, содержащим 25—30 % NaCl и 15—20 % CuCl<sub>2</sub>, в течение 60 минут при температуре 70—80 °С, циркулирующим в процессах растворения меди — электрохимического осаждения меди на медном катоде из медной фольги толщиной 0,1 мм;
- введение добавки моющего средства "Прогресс" или "Фейри" в количестве 20—40 г/м<sup>3</sup>.



Процесс проводится в течение 8—10 ч при температуре 50—60 °С и катодной плотности тока 80—120 А/м<sup>2</sup> (для образования мелкокристаллического осадка меди);

- извлечение медного катода из электролитической ячейки, промывание водой. Далее медный катод опускают в 10-ный раствор соляной кислоты, выдерживают в течение 5—10 мин и вновь промывают водой. Для удаления остаточного количества CuCl<sub>2</sub> электрод погружают в 30%-ный раствор NaCl на 20—30 мин, затем опять промывают водой, сушат и направляют на плавку в индукционную печь;
- монтирование вместо отработанного катода свежего катода из медной фольги; процесс растворения меди с электронных плат и электролитического осаждения меди повторяются.

После электролитической переработки растворы вновь используют в операциях растворения меди с электронных плат. Таким образом растворы многократно циркулируют в операциях растворения меди — электролиза меди до получения медного катода с осадком меди.

Техническим результатом запатентованного изобретения является повышение эффективности процесса переработки электронных плат путем дополнительного извлечения меди и улучшения качества полученного катодного осадка меди.

Цель разработки технологии авторов патента KR101226612B1 (Южная Корея) состоит в повышении эффективности извлечения драгоценных металлов из отработанных печатных плат мобильных телефонов и отработанных автомобильных катализаторов с использованием отработанного цветного шлака [17].

В результате процесса извлекаются такие драгоценные металлы как золото, серебро, палладий, родий, а также другие ценные металлы: железо, медь, олово и никель. Восстановленный шлак, не содержащий драгоценных металлов, используется повторно для восстановления других драгоценных металлов или применяется в качестве вторичного сырья на предприятиях цементной отрасли.

Технологический процесс включает следующие операции:

- измельчение отходов цветного шлака, выгружаемого после процесса производства меди, свинца, цинка, до частиц размером 0,5—1,5 см. Если размер частиц цветного шлака составляет менее 0,5 см, время плавления сокращается, в случае превышения размера частиц отработанного цветного шлака более 1,5 см, время плавления увеличивается;
- измельчение отработанных автомобильных катализаторов;
- равномерное смешивание расплавленной извести (CaO) в качестве регулятора состава шлака с отходами цветного шлака; для расплавления негашеной извести (CaO) по сравнению со 100 весовыми частями отходов цветного шлака (5—40 весовых частей могут быть равномерно перемешаны, загружены в электрическую печь и расплавлены в течение 10—20 мин при температуре 1300—1450 °С. Когда

количество добавляемой негашеной извести составляет менее 5 весовых частей или более 40 весовых частей, температура плавления смеси отработанного цветного шлака и негашеной извести повышается, что приводит к увеличению потерь энергии. Когда количество добавляемой негашеной извести составляет менее 5 весовых частей или более 40 весовых частей, вязкость шлака увеличивается, скорость извлечения драгоценных металлов снижается);

- к расплавленному сплаву добавляются отработанные печатные платы мобильных телефонов и отработанные автомобильные катализаторы (на 100 весовых частей отработанного цветного шлака берется 40—70 весовых частей печатных плат мобильных телефонов и 10—30 весовых частей отработанных катализаторов транспортных средств) с последующим плавлением (при температуре 1300—1450 °С в течение 20—40 мин). При добавлении менее 40 или более 70 весовых частей печатных плат мобильного телефона вязкость шлака увеличивается и скорость извлечения драгоценных металлов снижается. При добавлении менее 10 или более 30 весовых частей отработанных катализаторов вязкость шлака также увеличивается и скорость извлечения драгоценных металлов также снижается;
- поддержание расплава смеси в течение 10—20 мин с последующим разделением расплава на фазу сплава, содержащую драгоценные металлы, и фазу шлака, не содержащую драгоценных металлов, (если время выдержки менее 10 мин — восстановление драгоценных металлов в фазе сплава снижается, если время плавления более 20 минут — затрудняется разделение фаз сплава и шлака).

По результатам технологического цикла из 100 г печатной платы мобильного телефона и 30 г отработанного катализатора транспортного средства можно получить 927,7 мг золота, 1954,6 мг серебра, 359,9 мг палладия, 282,7 мг платины и 32,7 мг родия. Содержание драгоценных металлов, присутствующих в сплавах, собранных металлами, составит 909,5 мг золота, 1935 мг серебра, 354,8 мг палладия, 277,4 мг платины и 32,3 мг родия. Показатели извлечения золота, серебра, палладия, платины и родия — более 98 %.

Настоящее изобретение является энергосберегающей экологически безопасной технологией, в процессе которой не происходит загрязнения окружающей среды, и в то же время утилизируются порядка тридцати видов промышленных отходов с возвратом металлов в экономический оборот.

Целью разработки технологии, запатентованной как "Способ извлечения металлов платиновой группы из отработанных автомобильных катализаторов" [18], является извлечение металлов платиновой группы из отработанных автомобильных катализаторов.

Последовательность операций данного технологического решения следующая:

- измельчение автомобильных катализаторов до фракции 3—5 мм;

- перемешивание измельченных автомобильных катализаторов с металлической стружкой на основе меди или железа с негашеной известью, применяемой в качестве флюса (в шихту металлическую стружку вводят в зависимости от состава (марки) катализаторов);
- порцию шихты направляют в дуговую печь (постоянного или переменного тока) с нагреванием до температуры плавления, затем повышают температуру расплава до 1600—1700 °С и выдерживают расплав при этой температуре для осаждения капель металлической фазы на подине дуговой печи с получением концентрации металлов платиновой группы;
- шлак, не содержащий металлы платиновой группы, сливают в металлические изложницы, металлический концентрат остается в печи;
- в жидкий металлический концентрат вводят вторую (и последующие) порции шихты и проводят повторно все операции. Концентрация металлов платиновой группы в металлической ванне повышается.

После проведения всех операций в специальных изложницах концентрация металлической фазы с содержанием металлов платиновой группы увеличивается до 2 %. Электрохимическими и химическими методами из получившихся слитков на аффинажных предприятиях извлекают металлы платиновой группы в чистом виде. Получившийся шлак дробится и может быть использован в качестве вторичного сырья, например в строительстве дорог, для замещения природного щебня.

Извлечение благородных металлов из отходов радиоэлектронного лома — цель разработчиков технологии, описание которой приведено в патенте РФ №2357012С1 [19].

Изобретение относится к металлургии благородных металлов и может быть использовано в процессах утилизации радиоэлектронного лома и при извлечении золота или серебра из отходов электронной и электрохимической промышленности.

Два основных этапа процесса включают следующие операции:

- в электролитической ванне медно-никелевый анод (содержание железа — 6—10 % и примеси благородных металлов) и катод помещают в отдельные сетчатые диафрагмы с хлорсодержащим электролитом, создавая отдельные анодное и катодное пространства. В катодном пространстве электролит обогащается трехвалентным железом  $\text{FeCl}_3$ , а затем его подают в анодное пространство;
- в катодном пространстве образуется электролит, обогащенный  $\text{FeCl}_2$ , который направляют в анодное пространство, где происходит его окисление до  $\text{FeCl}_3$ , вследствие чего начинается процесс химического растворения анода.

Процесс растворения анода ведется при плотности тока 2—10 А/дм<sup>2</sup>, температуре 40—70 °С и напряжении 1,5—2,5 В. Под действием электрического тока и окислительного влияния трехвалентного железа процесс растворения анода значительно

ускоряется и увеличивается содержание благородных металлов в шламе.

Благодаря электролитическому и химическому воздействию скорость растворения анода значительно увеличивается, повышается содержание благородных металлов в шламе, снижаются потери золота и сокращается время растворения анода.

При концентрации железа в аноде меньше 6 % в электролите наблюдается пониженное содержание  $\text{FeCl}_3$ , что приводит к недостаточному химическому воздействию трехвалентного железа  $\text{FeCl}_3$  на анод и, как следствие, низкой скорости растворения анода. Увеличение концентрации железа в аноде больше 10 % не способствует дальнейшему увеличению скорости растворения анода, а создает дополнительные трудности при переработке электролита.

Благодаря реализации данной технологии достигаются:

- увеличение содержания благородных металлов в шламе;
- значительное увеличение скорости растворения анода;
- сокращение объема образования шлама.

## Выводы

Статистический учет образования в РФ электронного лома в настоящее время не ведется. В то же время, по разным оценкам, в РФ ежегодно образуется около 1,2 млн т электронного и электротехнического лома. Большая его часть попадает в состав ТКО и направляется на размещение на полигонах.

Как было показано в статье, электронный лом содержит смесь различных металлов — Cu, Al, Au, Ag и многие другие. Благородные металлы присутствуют в этой смеси в виде покрытий различной толщины, припоев, компонентов сплавов (драгметаллы часто используют в контактах реле, в переключателях, в печатных схемах компьютеров). Состав электронного лома во времени изменяется; это связано с изменением материалов, применяемых в производстве электронного оборудования (в частности, все большее применение находят редкоземельные металлы), снижается содержание драгметаллов.

Технический прогресс в сфере электронной промышленности приводит к появлению более совершенных моделей, возрастанию потока отработанных средств мобильной связи и аудио-видеоаппаратуры, что требует ускорения темпов развития отходов перерабатывающей отрасли, создания систем контролируемого раздельного сбора отходов, технологий их утилизации.

Наиболее высокое содержание Au (до 1 %) приходится на изоляторы транзисторов и стеклянные изоляторы, а также на компоненты электронных приборов и печатные платы (Au — 0,3 %, Ag — 3%). Лом электронных систем военной техники (самолеты, танки) отличается высоким содержанием Cu (более 20%) и Sn (до 12,5 %). Весьма высокое содержание Cu характерно для печатных плат и элементов переключения (23—33 %), а также для лома электронной и электробытовой техники (12—14 %).

С 1 января 2021 г. в РФ запрещено производить захоронения многих компонентов электронного и электротехнического лома (распоряжение Правительства РФ от 25 июля 2017 г. № 1589-р) [20]:

- платы электронные (в т. ч. компьютерные), жесткие диски, системный блок компьютера, принтеры, сканеры, картриджи, компьютерные мониторы, банкоматы;
- телефонные аппараты, мобильные телефоны, портативные радиостанции, модемы, коммутаторы, диктофоны, счетчики электрические;
- отходы изолированных проводов и кабеля, светильники со светодиодными элементами и т. п.;
- микроволновые печи, манометры, кондиционеры, приборы КИПиА;
- калькуляторы, контрольно-кассовые аппараты, счетчики банкнот, копировальные машины.

Для выполнения распоряжения Правительства РФ необходимо создание эффективной системы сбора и утилизации ОЭО, развитие технологической инфраструктуры и, конечно, организация системы мониторинга всех операций, связанных с обращением с данным видом отходов.

Для решения этой непростой задачи в РФ в 2015 г. был введен механизм расширенной ответственности производителя, новый импульс которому был дан в конце 2020 г., 2021 г. утверждением Концепции совершенствования института расширенной ответственности производителей и импортеров товаров и упаковки, и дорожной карты мероприятий по ее реализации [21, 22].

Современные методы утилизации электронного лома, главной целью которых является извлечение металлов, особенно благородных, включают демонтаж, обогащение, методы гидро- и пирометаллургии, спецметоды.

Достаточно сложным объектом для утилизации являются полимерные материалы, входящие в состав электронного лома; микросхемы, транзисторы, покрытые золотом, серебром или палладием, сепарируются относительно легко (об этом свидетельствует многообразие вариантов технологических решений в этом направлении с достижением достаточно высоких технологических показателей).

Основные виды сырья, поступающие на переработку на аффинажные заводы, включают лом электронных систем военной техники, печатные платы, смешанный лом электронных приборов, элементы переключения, изоляторы транзисторов и стеклянные изоляторы.

Вовлечение электронного лома в утилизацию осложняет относительно высокое содержание в нем ртути (особенно в мониторах жидкокристаллических телевизоров; производство мониторов и телевизоров с электронно-лучевой трубкой прекращено в 2008 г.). С точки зрения загрязнения окружающей среды наиболее опасны старые телевизоры; их захоронение на свалках или сжигание в составе ТКО создает повышенные экологические риски и риски ухудшения здоровья населения, проживающего вблизи мест размещения таких объектов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шубов Л. Я., Иванков С. И., Скобелев К. Д. Систематизация технологий переработки и утилизации электронного и электротехнического лома // Экологические системы и приборы. 2020. № 2. С. 35—48. DOI 10.25791/esip.02.2020.1138.
2. Singx Manmoxit et al. An analysis on e-waste generation in Chandigarh: quantification, disposal pattern and future predictions // Cycl. And Waste Manag. 2018. V. 20. № 3. P. 1625—1637.
3. Bridgens Ben et al. Closing the Loop on E-waste: a Multidisciplinary perspective // J. Ind. Ecol. 2019. V. 23. № 1. P. 169—181.
4. Kogan V. S. et al. Silver, gold and palladium leaching from pre-prepared electronic scrap using bromine-bromide solution // Комплексное использование минерального сырья. 2019. № 3. С. 55—63.
5. Swain Basudev et al. Synthesis of submicron silver powder from scrap low-temperature co-fired ceramic an e-waste: Understanding the leaching kinetics and wet chemistry // Chemosphere. 2018. V. 194. P. 793—802.
6. Zhang Zhiyuan et al. Selective recovery of palladium from waste printed circuit boards by a novel non-acid process // J. Hazardous Mater. 2014. V. 279. P. 46—51.
7. Guimaraes Yu. F. et al. Direct recovery of copper from printed circuit boards powder concentrate by a simultaneous electroleaching — electrodeposition process // Hydrometallurgy. 2014. V. 149. P. 63—70. DOI: 10.1016/J.HYDROMET.2014.06.005.
8. Liang Guobin et al. Optimising mixed culture of two acidophiles to improve copper recovery from printed circuit boards // J. Hazardous Mater. 2003. V. 250—251. P. 238—245.
9. Гавриш В. М. и др. Рециклинг ранее не перерабатываемых медьсодержащих отходов с целью получения чистого порошка меди // Вестник БГТУ. 2016. № 1. С. 133—137.
10. "Waste Manag". 2016. Nov.; 57. P.113—148, 158—167.
11. Yang Jiaxu et al. Recovery of indium and yttrium from Flat Panel Display waste using solvent extraction // Separ. and Purif. Technol. 2016. V. 166. P. 117—124.
12. Ferella Francesco et al. Separation and recovery of glass, plastic and indium from spent LCD panels // Waste Manag. 2017. V. 60. P. 569—588.
13. Wang Xinying et al. Study on the waste liquid crystal display treatment: Focus on the resource recovery // J. Hazardous Mater. 2013. V. 244—245. P. 342—347.
14. Старших В. В., Максимов Е. А. Способ переработки электронного лома. Патент РФ № 2521766, C22B7, C22B9, C22B11, C22B15. 2014.
15. Бен-Су Ким, Дон Хё Ян, Кан-Ин Ри, Чже Чхон Ли, Чжин Ки Чхон, Доюн Шин. Способ концентрирования и извлечение драгоценных металлов из отработанных печатных плат мобильных телефонов и отработанных автокатализаторов, используя отработанный цветной шлак. Патент США 8882881B2 C22B11. 2014.
16. Бучихин Е. П., Денисенко А. П., Ивакин А. В., Самохин В. А., Сарычев Г. А., Семин М. В. Способ переработки отходов электронной и электротехнической промышленности. Патент РФ 2644719C2 C22B7. 2016.
17. Бен-Су Ким, Дон Хё Ян, Кан-Ин Ри, Чже Чхон Ли, Чжин Ки Чхон, Доюн Шин. Способ концентрирования и извлечение драгоценных металлов из отработанных печатных плат мобильных телефонов и отработанных автокатализаторов, используя отработанный цветной шлак / Патент Южная Корея KR101226612B1 C22B11. 2012.
18. Ахметов Р. Р., Чухловин А. Н. Способ извлечения металлов платиновой группы из отработанных автомобильных катализаторов. Патент РФ 2531333C2 C22B11. 2012.
19. Литвиненко В. С., Теляков Н. М., Горленков Д. В. Способ извлечения благородных металлов из отходов радиоэлектронной промышленности. Патент РФ 2357012C1 Y02P10. 2009.
20. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 25 июля 2017 года N 1589-р "Об утверждении перечня видов отходов производства и потребления, в состав которых входят полезные компоненты, захоронение которых запрещается" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/436754215> (дата обращения: 17.02.2022).
21. Концепция совершенствования института расширенной ответственности производителей и импортеров товаров и упаковки [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573324833> (дата обращения: 17.02.2022).
22. Дорожная карта по реализации Концепции расширенной ответственности производителей и импортеров товаров и упаковки (РОП) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.consultant.ru/law/hotdocs/68813.html/> (дата обращения: 15.06.2020).

## Complex use electronic and electrical scrap

<sup>1</sup> L. Ya. SHUBOV, <sup>1,2</sup> I. G. DORONKINA, <sup>1,3</sup> T. S. SMIRNOVA, <sup>1</sup> O. V. GOLUB

<sup>1</sup> FSAB "Research Institute "Environmental Industrial Policy Center",  
Mytishi, Moscow region, Russia

<sup>2</sup> Russian State University of Tourism and Service, village Cherkizovo,  
Urban district Pushkinsky, Moscow region, Russia

<sup>3</sup> Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University),  
Moscow, Russia

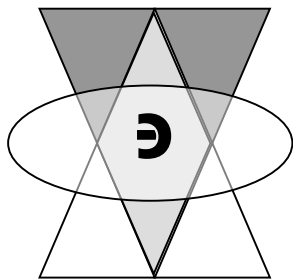
*It is very important to provide a recycling method and system for electronic and electric scrap (such as transistors, relays, wiring, radioelectronic products scrap, television screens and computer monitors, personal computers and calculators, vacuum tubes). The article relates to a process for recovering metals from electronic and electric waste by means of separation methods (electrical separation, magnetic separation, flotation, air classifying), melting, hydrometallurgy of nonferrous and precious metals.*

**Keywords:** electronic and electric scrap, separation methods, melting, hydrometallurgy, secondary raw materials.

Bibliography — 22 references.

*Received March 18, 2022*





# Водоподготовка и водоочистка

УДК 628.54

DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_2\_19

EDN: FCHHVV

## Обработка воды с использованием эжектора-смесителя с тангенциальным вводом реагента

**Б. С. КСЕНОФОНТОВ**, д-р техн. наук; **С. Н. КАПИТОНОВА**, канд. техн. наук;  
**Я. С. ВАСИЛЬЕВА**

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

*Показано, что смешение воды с реагентом можно успешно осуществлять с использованием эжекторов. Исследованы основные конструктивные особенности эжектора-смесителя. Определены параметры работы эжектора и особенности дозирования реагента для обеспечения оптимального процесса смешения, при этом установлены эмпирические зависимости подсоса раствора реагента в очищаемую воду. Все зависимости имеют линейный характер. Полученные зависимости можно использовать в практике реагентной обработки воды.*

**Ключевые слова:** очистка сточных вод, эжектор, смеситель, реагентная обработка.

Вопрос охраны водной среды имеет важное экономическое, экологическое и социальное значение. Необходимость предотвращения загрязнения водных объектов привела к ужесточению требований к качеству очистки сточных вод. Это, в свою очередь, отразилось на более интенсивном использовании компактных высокоэффективных аппаратов. Все большее распространение в различных технологических процессах получили эжектора, которые просты в изготовлении, компактны и не требуют существенных финансовых вложений [1].

Использование реагентной обработки воды является одним из самых распространенных способов интенсификации ее очистки. При этом важное значение имеет не только подбор дозы реагента, но и процесс смешения его с водой [2]. Сам процесс коагуляции происходит довольно быстро, и в этой связи

важно распределить реагент в воде наиболее равномерно. Интенсивность смешения реагентов с водой характеризуется величиной градиента скорости  $G$  (с<sup>-1</sup>), а также критерием Кэмпса:

$$Ca = G \tau,$$

где  $\tau$  — время перемешивания, с.

Градиент скорости можно найти по формуле:

$$G = \sqrt{\frac{W}{\mu}},$$

где  $W$  — мощность, затрачиваемая на перемешивание воды, отнесенная к единице объема воды в камере смешения;

$\mu$  — динамическая вязкость.

Время перемешивания определяется по формуле:

$$T = \frac{V}{Q},$$

где  $Q$  — расход сточных вод, м<sup>3</sup>/с;

$V$  — рабочий объем смесителя, м<sup>3</sup>.

В случае предварительно проведенной оптимизации процесса перемешивания должно быть выполнено следующее условие:

$$T = \tau.$$

**Ксенофонов Борис Семенович**, профессор кафедры "Экология и промышленная безопасность".

E-mail: kbsflot@mail.ru

**Капитонова Светлана Николаевна**, доцент.

E-mail: clear81@rambler.ru

**Васильева Яна Сергеевна**, аспирант.

E-mail: vasiljevajane@gmail.com

Статья поступила в редакцию 13 января 2022 г.

© Ксенофонов Б. С., Капитонова С. Н., Васильева Я. С., 2022

Выполнение указанных соотношений дает возможность осуществлять процесс перемешивания реагентов с водой практически в оптимальном режиме.

Быстрое перемешивание реагентов с водой, как правило, повышает эффективность их использования. Тем не менее, применение для этих целей аппаратов с мешалками, как наиболее эффективных технических средств, приводит в ряде случаев к разрушению образующихся при этом агрегатов, требует поэтому строгого соблюдения временного интервала перемешивания. Наиболее простым в аппаратном отношении и в то же время эффективным устройством является эжектор [2]. В рассматриваемом случае эжектор, функционирующий как струйный насос, позволяет дозировать и перемешивать реагент со сточной водой.

Для исследования процесса смешения реагента и сточной воды в камере эжектора была выбрана опытная модель эжектора, представленная на рис. 1.

Для исследования режимов работы эжекторов применяются различные модели и программные продукты [3—10]. В данной задаче модель была спроектирована и исследована в программном комплексе ANSYS (далее — Программа) с установлением различных вводных параметров работы модели.

Серия экспериментов была основана на использовании однофазной модели, т. е. программа произ-

водила расчет с учетом подачи одинаковой жидкости в оба патрубка. Функции теплообмена (энергия) не рассматривались в рамках эксперимента. Учтена турбулентность.

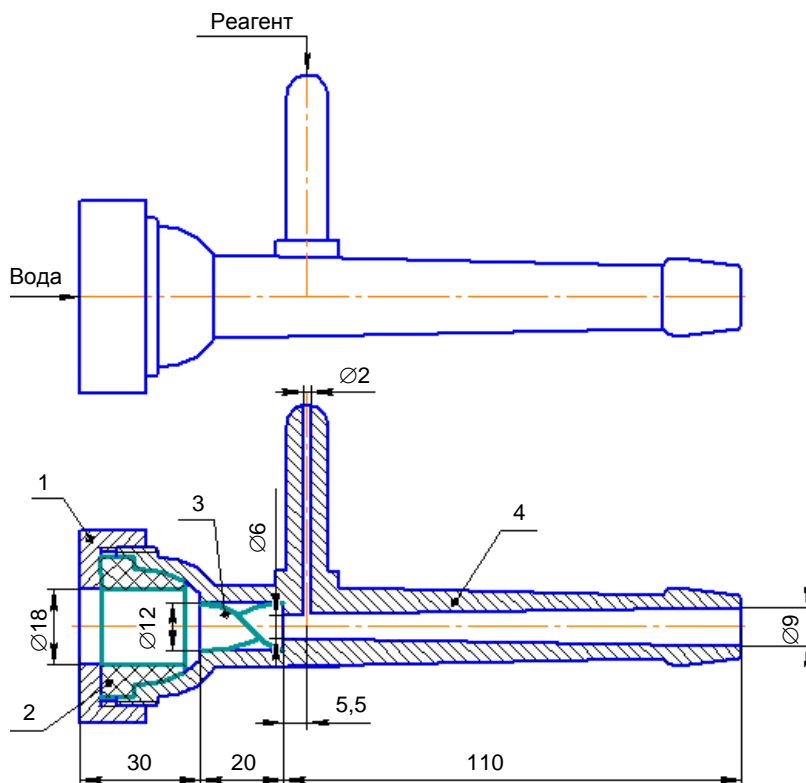
Расчет показал быстрый и стабильный выход на стационарный режим работы, при этом время составило 60 секунд.

Основным параметром исследования эффективности применения эжекторов в качестве смесителя для подачи раствора реагента в поток очищаемой сточной воды являются показатели скорости и ее вариации.

На рис. 2—7 представлены изоповерхности скоростей потока жидкости, которые дают наглядное представление о том, какие показатели скоростей преобладают на отдельных участках внутри камеры эжектора.

Контуры распределения скоростей (магнитуды скорости) на всех участках камеры смешения эжектора в соответствующих плоскостях представлены на рис. 8—9.

Согласно данным, представленным на рисунках, наиболее интенсивное изменение скорости происходит на участке ввода второго потока жидкости (реагента). На рис. 10 представлены графики распределения скоростей на данном участке камеры смешения длиной 3 см.



**Рис. 1. Конструктивные особенности эжектора:**

1 — крышка эжектора (пластик); 2 — резиновая прокладка; 3 — изогнутая металлическая перегородка для закручивания потока, толщиной 1 мм; 4 — тело эжектора (пластик)



Рис. 2. Изоповерхность  $V = 12$  м/с



Рис. 3. Изоповерхность  $V = 10$  м/с

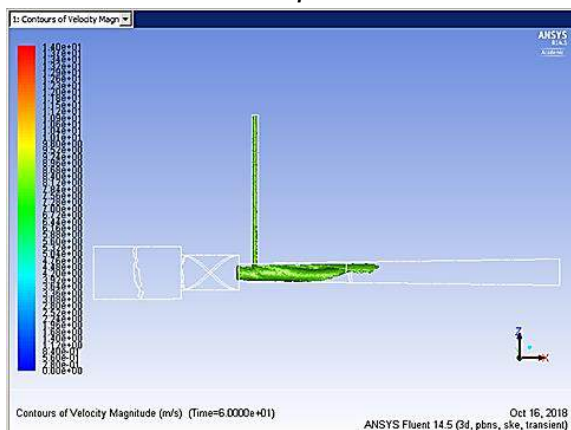


Рис. 4. Изоповерхность  $V = 8$  м/с

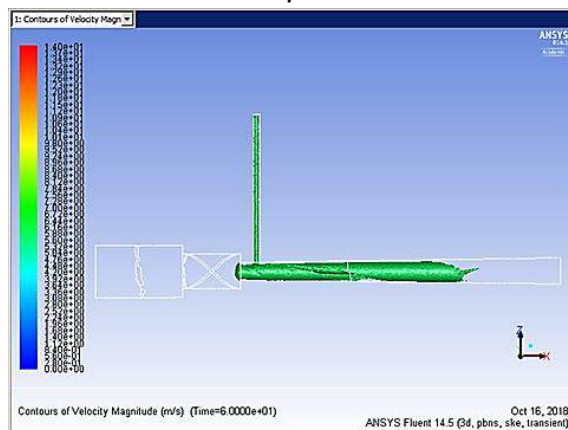


Рис. 5. Изоповерхность  $V = 6$  м/с

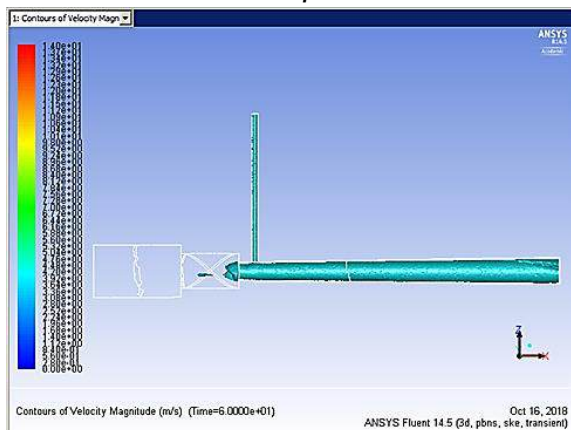


Рис. 6. Изоповерхность  $V = 4$  м/с

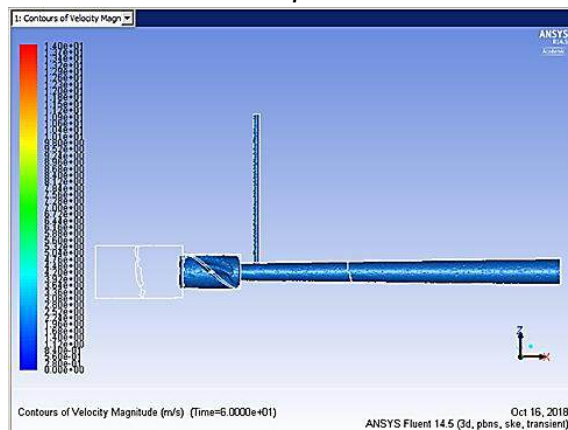


Рис. 7. Изоповерхность  $V = 2$  м/с

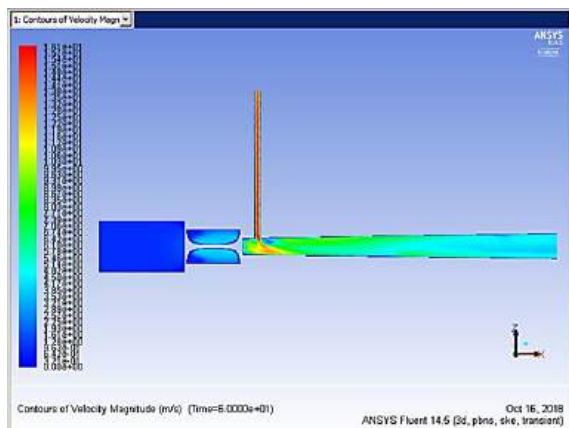


Рис. 8. Магнитуды скорости в сечении XOZ

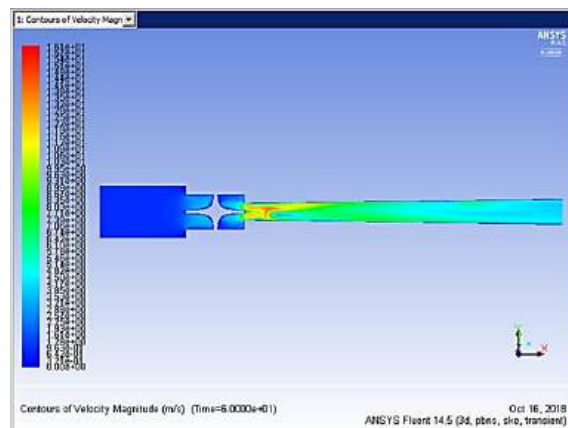


Рис. 9. Магнитуды скорости в сечении XOY

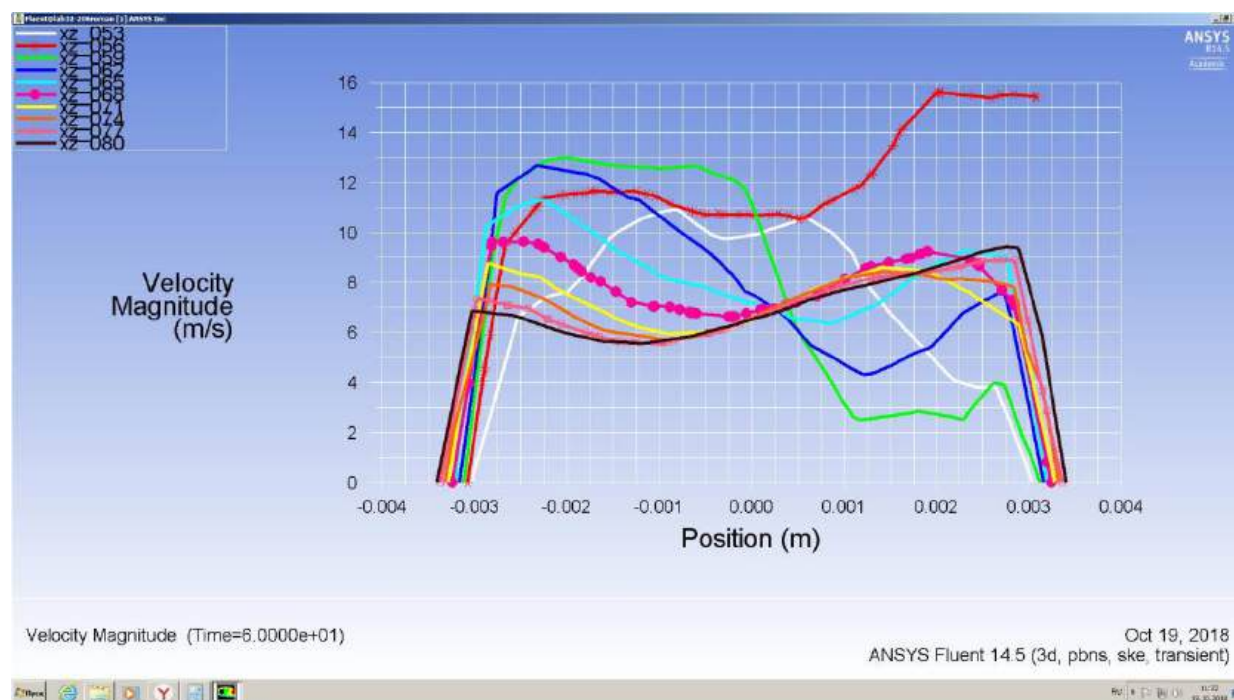


Рис. 10. Распределение скоростей по длине камеры смешения

Ось абсцисс представляет из себя положение точки сечения эжектора в плоскости  $ZOY$  (перпендикулярно сечению, представленному на рисунках) от начала камеры смешения. При этом координате 0,000 соответствует положение на оси движения основного потока смешиваемых жидкостей в эжекторе (ось эжектора в направлении  $OX$ ).

По оси ординат приведены значения скоростей в м/с.

При этом график, соответствующий легенде  $XZ_{053}$ , белый характеризует распределение магнитуды скорости на отрезке, удаленном от левого края модели на 53 мм, что соответствует началу камеры непосредственного смешения жидкостей. Магнитуда дана в сечении  $XOZ$  по длине эжектора.

Далее съемка магнитуд и построение графиков делается с шагом 3 мм от начала камеры смешения.

На рис. 11 видно, что график распределения скорости  $XZ_{053}$  (красный) не дает "прилипания" к стенке эжектора, т. к. это место ввода реагента (патрубок эжектора).

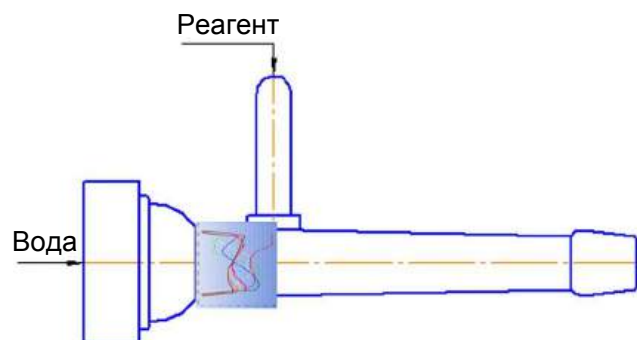


Рис. 11. Расположение графика магнитуд скоростей в теле эжектора

Более наглядно расположение данного графика скоростей внутри тела эжектора представлено на рис. 11. Однофазная модель не дает полного представления о процессах, которые будут протекать в камере смешения при введении в очищаемую сточную воду раствора реагента через патрубок эжектора, предназначенный для подсоса воздуха (в случае классического применения эжектора), т. к. смешиваемые жидкости будут иметь различные друг от друга характеристики и, соответственно, для расчета в ANSYS они должны быть представлены как два различных потока. При этом на данном этапе исследований нет необходимости задавать конкретный состав реагента и точные характеристики применяемой жидкости, достаточно задать в программе двухфазную модель расчета.

Во второй серии экспериментов была задана двухфазная модель расчета. При этом одним из исследуемых параметров стала гомогенность среды (жидкости). Гомогенность в данном случае напрямую связана со степенью очистки сточных вод, т. к. чем лучше реагент (флокулянт, коагулянт) распределен в очищаемой сточной воде, тем выше будет эффективность флотационной очистки.

Объемное распределение жидкостей (смешение фаз) представлено на рис. 12—13.

Из распределения видно, что для интенсификации процесса смешения необходимо либо больше закрутить потоки, например, изменив конструкцию металлической перегородки на входе основного потока в эжектор, или, увеличив скорость подачи потока жидкости в патрубок ввода реагента. Еще одним альтернативным методом интенсификации процесса смешения и получения на выходе из эжектора более гомогенной жидкости является увеличение длины самого эжектора.

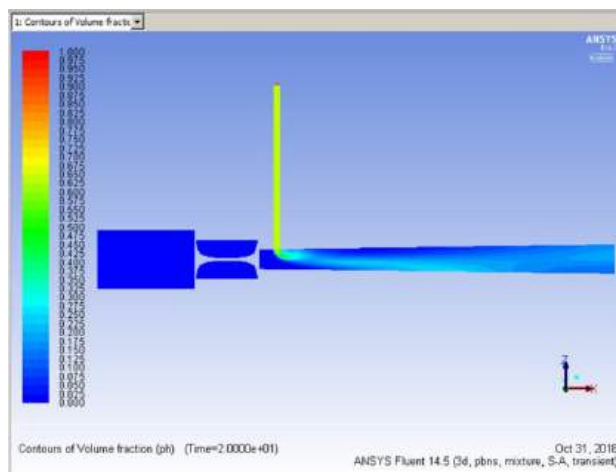


Рис. 12. Объемное распределение фаз (смешение), X0Z

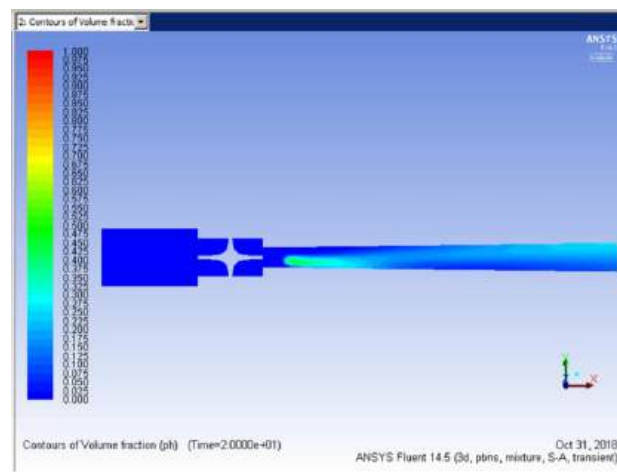


Рис. 13. Объемное распределение фаз (смешение), X0Y

Одним из основных параметров, характеризующим процесс смешения, является градиент скорости. В таблице представлена зависимость градиента скорости от начальной скорости подачи воды.

Анализ данных, представленных в таблице, показывает, что градиент скорости по оси X как и по осям Y и Z существенно зависит от начальной скорости подачи воды. При этом соотношение значений градиента скорости по оси X к значениям по осям Y и Z составляет примерно как 2:1. Это показывает, что турбулизация среды резко не различается по указанным направлениям, что, по нашему мнению, должно обеспечивать достаточно хорошее перемешивание реагентов с очищаемой водой.

Для проверки предлагаемых технических решений была создана экспериментальная установка.

Принципиальная схема такой установки представлена на рис. 14.

Сточная вода подается в эжектор 1, где в узком месте, в точках разрежения подсасывается раствор реагента из резервуара 2. В смесительной камере эжектора происходит смешение раствора со сточной водой, после чего поток поступает в резервуар-отстойник 3.

Опыты показали, что при подаче воды в количестве 1 л через эжектор подсасывается 20—50 мл раствора реагента за время 30 секунд.

Зависимость градиента скорости от начальной скорости подачи воды

Скорость воды на входе, м/с	Расход, кг/с			Скорость, м/с			Нвх., %	Градиенты компонентов скорости, с <sup>-1</sup>		
	Вода	Реагент	Невязка	реагента на входе	смеси макс.	смеси на выходе		V <sub>x</sub> max	V <sub>y</sub> max	V <sub>z</sub> max
0,4 (7с)	0,102	0,003	-4,7e-06	0,919	5,829	1,645	2,76	12776	6188	7065
0,8 (14с)	0,203	0,007	-1,0e-05	2,115	11,634	3,304	3,16	24162	11931	14019
1,2 (21с)	0,305	0,010	-1,5e-05	3,310	17,452	4,962	3,29	36226	17920	20988
1,6 (28с)	0,406	0,014	-2,0e-05	4,487	23,273	6,620	3,35	48302	23906	27986
2,0 (35с)	0,508	0,018	-2,4e-05	5,655	29,094	8,277	3,37	60406	29897	34999
2,4 (42с)	0,609	0,021	-2,8e-05	6,811	34,920	9,934	3,39	72532	35896	42029

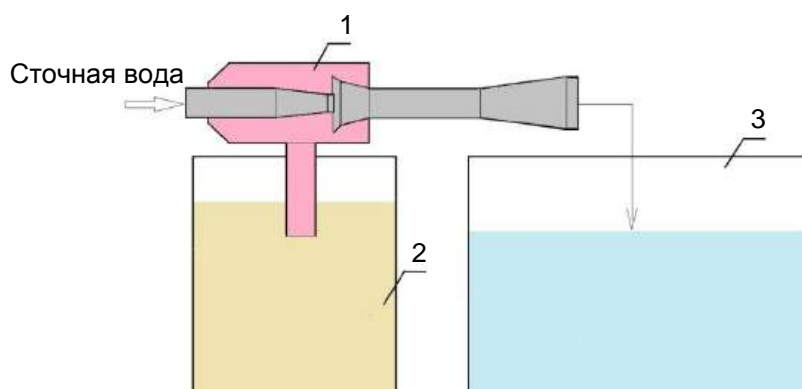


Рис. 14. Схема установки с эжектором-дозатором:  
1 — эжектор; 2 — резервуар с раствором реагента;  
3 — резервуар отстойник



В ходе проведения исследований была установлена эмпирическая зависимость:

$$q = kQ,$$

где  $q$  — количество подсасываемого раствора реагента;

$Q$  — количество обрабатываемой воды;

$k$  — коэффициент пропорциональности.

Коэффициент  $k$  в уравнении имеет достаточно широкий интервал значений, и управление этим значением достигается путем изменения техническим способом подачи раствора  $q$ , например, регулированием вентилем или каким-либо другим устройством.

Полученная зависимость позволяет использовать ее в практике смешения очищаемой воды с реагентами.

Таким образом, проведенные исследования показали, что дозирование и смешение реагентов с водой можно надежно осуществлять с использованием эжектора с тангенциальным вводом реагента. Это позволяет интенсивно перемешивать реагент с очищаемой водой за счет закручивания потока жидкостной смеси раствор реагента—очищаемая вода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Спиридонов Е. К., Исмагилов А. Р. Струйные насосы / учебное пособие по выполнению лабораторных работ. — Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2013. — 30 с.
2. Ксенофонтов Б. С. Эжекторы для перемешивания очищаемой воды с реагентами // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 8. С. 8—10.
3. Чабурко П. С., Ломакин В. О. Численное моделирование течения жидкости в струйном насосе // Машиностроение: Сетевой электронный научный журнал. 2014. Т. 2. № 3. С. 55—58.
4. Rusly E. et al. CFD analysis of ejector in a combined ejector cooling system // International Journal of Refrigeration. 2005. V. 28. № 7. P. 1092—1101.
5. Khuri-Yakub B. T., Levin L. Fluid drop ejector and method. Патент 5828394 США. 1998.
6. Sriveerakul T., Aphornratana S., Chunnanond K. Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 1. Validation of the CFD results // International Journal of Thermal Sciences. 2007. V. 46. № 8. P. 812—822.
7. Alexis G. K. Exergy analysis of ejector-refrigeration cycle using water as working fluid // International Journal of energy research. 2005. V. 29. № 2. P. 95—105.
8. Соколов Е. Я., Зингер Н. М. Струйные аппараты. Изд. 3-е, перераб. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 352 с.
9. Подвидз Л. Г., Кирилловский Ю. Л. Расчёт струйных насосов и установок // Труды ВНИИгидромаша. — ВНИИгидромаш, 1968. Вып. 38. С. 44—96.
10. Сазонов Ю. А. Основы расчета и конструирования насосно-эжекторных установок. — М.: ГУПИЗд-во "Нефть и газ" РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2012. — 305 с.

## Water treatment using an ejector-mixer with a tangential reagent injection

B. S. KSENOFONTOV, S. N. KAPITONOVA, Ya. S. VASILYEVA  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

*The article shows that the mixing of water with the reagent can be successfully carried out using ejectors. The main design features of the ejector-mixer are investigated. The parameters of the ejector operation and the features of the dosing of the reagent were determined to ensure the optimal mixing process. At the same time, empirical dependences of the suction of the reagent solution into the treated water were established. All dependencies are linear. The obtained dependencies can be used in the practice of chemical water treatment.*

**Keywords:** wastewater treatment, ejector, mixer, reagent treatment.

**Bibliography** — 10 references.

*Received January 13, 2022*



УДК 547.539.261; 502.17  
DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_2\_25  
EDN: FLKQQP

## Экспериментальная оценка опасности загрязнения воды водоёмов гексахлорбензолом

<sup>1</sup> А. А. МАСЛЕННИКОВ, д-р биол. наук; <sup>1</sup> С. А. ДЕМИДОВА, канд. биол. наук;

<sup>2</sup> А. А. КАЩЕЕВ; <sup>1</sup> В. А. АНТОНОВ, д-р мед. наук

<sup>1</sup> ФГУП «Научно-исследовательский институт гигиены, токсикологии и профпатологии»  
Федерального медико-биологического агентства, г. Волгоград, Россия

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», г. Волгоград, Россия

*Проведена комплексная экспериментальная оценка опасности содержания стойкого органического загрязнителя — гексахлорбензола в воде водоемов. Установлено, что токсикант вызывал изменения органолептических и общесанитарных свойств воды. В условиях острого опыта вещество при внутрижелудочном поступлении оказывало токсическое воздействие на организм лабораторных животных. Полученные результаты необходимо принимать во внимание при обращении с рассмотренным соединением в данной экосистеме.*

**Ключевые слова:** вода, гексахлорбензол, органолептический и санитарный режим водоёмов, порог острого общетоксического действия.

Общеизвестно, что гексахлорбензол (ГХБ) — пестицид, внесенный Стокгольмской конвенцией в 2001 г. в список 12 стойких органических загрязнителей [1].

В порядке исключения (путём письменного уведомления Секретариата) на территории РФ разрешена возможность его производства и применения в качестве промежуточного вещества при синтезе поливинилхлорида, синтетического каучука, пентахлорфенола, красителей. Кроме того, ГХБ включен в состав различных пиротехнических смесей, входящих в оборонный потенциал страны [2, 3].

Для обеспечения санитарно-эпидемиологического контроля за содержанием данного пестицида в воде необходимо проведение эколого-токсикологических исследований.

Комплексная оценка степени опасности однократного загрязнения водной биосреды любым химическим соединением, в том числе гексахлорбензолом, предусматривает обязательное изучение его негативного действия по органолептическому, обще-

санитарному и токсикологическому признакам вредности [4].

Цель проводимого исследования — определение особенностей содержания гексахлорбензола в воде водоёмов.

### Материалы и методы

В качестве объекта исследования использован гексахлорбензол (перхлорбензол, гексахлорид бензола, ГХБ,  $C_6Cl_6$ ; номер CAS 118-74-1) с удельной плотностью:  $d_4^{20} = 2,044$  г/см<sup>3</sup>, массовой долей вещества равной 99,95 % и с молекулярной массой 284,7822. ГХБ представляет собой белые (иногда бесцветные или окрашенные) моноклинные (пластинчатые) игольчатые кристаллы от белого до светло-желтого или серого цвета, нерастворимые в воде, малорастворимые в этаноле и бензоле [2, 3].

Исследования влияния соединения на органолептические свойства воды и её общесанитарный режим выполнены в соответствии с требованиями действующих методических указаний [4] и положениями монографий [5, 6]. Анализ качества воды проводили по следующим показателям: прозрачность, цветность и наличие пены.

В ходе оценки воды на прозрачность визуально различали шрифт на белом фоне через высоту водяного столба тестируемых проб на уровне 30,0 см и более, а менее — принимали за достоверное отклонение от контроля [4—6]. Установление предельного значения цветности воды выражали в градусах по графику. Критерияльно значимой принята величина, превышающая 20,0° [4—6]. При характеристике пенистости использовали метод цилиндров. Проба считалась негативной, если пена сохранялась более 1 мин [4—6].

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

E-mail: maslennikov@rihtop.ru

**Демидова Светлана Александровна**, ведущий научный сотрудник лаборатории "Экологическая токсикология".

E-mail: demidova@rihtop.ru

**Кащеев Александр Александрович**, магистрант.

E-mail: maslennikov@rihtop.ru

**Антонов Валерий Алексеевич**, профессор, исполняющий обязанности директора.

E-mail: antonov@rihtop.ru

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2022 г.

© Масленников А. А., Демидова С. А., Кащеев А. А., Антонов В. А., 2022

Воздействие токсиканта на общесанитарный режим воды оценивали по состоянию основных процессов её самоочищения: биохимическое потребление кислорода за пять суток (БПК<sub>5</sub>), процессы нитрификации, развитие и отмирание сапрофитной микрофлоры. Достоверными считали отклонения показателей в опыте, выходявшие за пределы отличий соответствующих контрольных значений: 15,0 % — угнетение; 20,0 % — стимуляция [4].

Содержание растворённого кислорода (РК) при анализе БПК<sub>5</sub> в пробах осуществляли распространённым методом йодометрического титрования по Винклеру [4—7]. Тестирование водных образцов выполняли в следующие сроки: в день загрязнения — 0-е сутки (определение РК); на 1-е, 3-е и 5-е сутки.

Характеристику влияния ГХБ на нитрифицирующие процессы в воде проводили по комплексу основных показателей: азот аммонийный, азот нитритов, азот нитратов. Пробы анализировали через 1 ч после внесения вещества в воду (0-е сутки) и далее на 1-е, 3-и, 7-е, 10-е, 14-е, 17-е, 21-е, 23-и, 27-е, 30-е и 33-и сутки [4, 8—11].

Жизнеспособность сапрофитной микрофлоры оценивали в 14-и суточном эксперименте (на 0-е, 1-е, 2-е, 3-и, 7-е, 9-е, 10-е и 14-е сутки) [4, 8].

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 [12].

Исходя из физико-химических свойств, не позволяющих применять нативную форму, тестируемое вещество вводили в желудок подопытным особям в виде взвеси в 2,0%-ом растворе водного крахмала при помощи зонда из расчёта 1 мл на 100 г массы тела. Особи контрольной группы получали адекватные объёмы водно-крахмального раствора.

Общерезорбтивное действие ГХБ 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 (горизонтальная, вертикальная двигательная, эмоциональная, суммарная активность, а также "норковый" рефлекс и груминг) в установке "открытое поле" [13]. Показатели периферической крови крыс-самцов регистрировали на автоматическом гематологическом анализаторе "PCE-210" ("ERMA", Япония).

Статистическую обработку данных осуществляли с применением критерия Стьюдента-Фишера [14], используя пакет Primer of Biostatistics 4.03.

## Результаты

В ходе выполнения исследований установлено, что ГХБ в концентрациях 2,5; 0,5 и 0,1 мг/л, не способствовал появлению цветности воды.

В то же время испытываемый токсикант в концентрации 2,5 мг/л приводил к стойкому (более 1 мин) образованию пены, вызывая её присутствие на поверхности и пузырьков по всему объёму жидкости при  $t = 20 \dots 25$  °C (комнатная) и 60 °C (табл. 1). Также на этом уровне зарегистрировано изменение прозрачности воды. На поверхности "искусственного" водоёма, загрязнённого ГХБ, обнаружены белые волокнистые хлопья (табл. 2). При снижении концентрации вещества до 0,5 мг/л и ниже критерияльно значимых отличий от контроля не выявлено (табл. 2).

Таким образом, пороговый уровень ГХБ по органолептическому показателю-признаку вредности соответствует значению 2,5 мг/л, а максимально недействующий — 0,5 мг/л.

Таблица 1

Характеристика пенности воды, содержащей гексахлорбензол

Температура воды, °C	Концентрация вещества в воде, мг/л	Наличие пены	Продолжительность сохранения пены, мин
20—25 (комнатная)	Контроль	Отсутствие	—
	<b>2,5</b>	<b>Крупная <math>h = 1,0</math> см</b>	<b>Более 1,0</b>
	0,5	Отсутствие	—
	0,1	Отсутствие	—
60	Контроль	Отсутствие	—
	<b>2,5</b>	<b>Крупная <math>h = 1,0</math> см</b>	<b>Более 1,0</b>
	0,5	Отсутствие	—
	0,1	Отсутствие	—

Таблица 2

Оценка интенсивности прозрачности воды, содержащей гексахлорбензол

Концентрация вещества в воде, мг/л	Описание прозрачности воды	Высота водяного столба $h$ , см
Контроль	Прозрачная	20,0 и более
<b>2,5</b>	<b>Прозрачная, на поверхности белые хлопья</b>	<b>15,0 и менее</b>
0,5	Прозрачная	30,0 и более
0,1	Прозрачная	30,0 и более

В табл. 1 и 2 полужирным шрифтом указано достоверное отклонение величины от контроля.

При определении санитарных характеристик воды соединения вносили в "искусственные" водоёмы в количестве от 0,5 до 0,02 мг/л с понижающим фактором 5. В соответствии с требованиями МУ 2.1.5.720-98 [4] исследования возможности химагента проявлять негативное влияние на процессы БПК в воде водоёмов выполнены в трёх независимых сериях экспериментов.

Отмечено, что тестируемое вещество в концентрациях — 0,5 и 0,1 мг/л с 1-х по 3-и сутки эксперимента способствовало ингибированию (до 28,28 %) протекания БПК в воде (табл. 3). При снижении содержания химагента до 0,02 мг/л достоверных отличий значений окисления анализируемых проб от контроля не зарегистрировано (табл. 3).

Исходя из представленных результатов, уровень гексахлорбензола — 0,1 мг/л, сопровождающийся минимальным негативным действием на процессы БПК<sub>5</sub>, признан в качестве пороговой величины по данному показателю. Соответственно концентрация токсиканта в воде 0,02 мг/л является максимально недействующей.

Воздействие соединения на триаду азота проводили при его содержании в воде в концентрациях: 0,1; 0,02 и 0,005 мг/л.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что ГХБ на уровне 0,1 мг/л оказывал отрицательное действие (стимуляция до 27,65 %) на начальную ста-

дию (I этап) процесса нитрификации — аммонификацию на 7-е и 10-е сутки исследований (табл. 4).

Помимо указанного вещества в концентрациях 0,1 и 0,02 мг/л приводило к ингибированию II стадии окислительных процессов (азот нитритов) в воде до 28,64 % с 17-х по 23-и сутки эксперимента (табл. 4).

Кроме того, химагент в концентрации 0,1 мг/л способствовал угнетению до 27,52 % реакции восстановления нитритов до нитратов (III этап) с 17-х по 21-е сутки исследований (табл. 4), что характеризует её, как действующую. Однако в концентрации 0,02 мг/л и ниже пестицид не приводил к достоверному изменению процессов нитрификации аквасистемы на данной стадии (табл. 4).

Основываясь на этом, концентрация ГХБ 0,02 мг/л определена в качестве пороговой, а 0,005 мг/л — максимально недействующей на триаду азота воды.

Исследования кинетики процесса жизнеспособности сапрофитной микрофлоры воды, содержащей ГХБ, проведены по стандартной схеме. Соединение испытывали в следующих концентрациях: 0,1; 0,02 и 0,005 мг/л.

Установлено, что присутствие вещества в воде "искусственных" водоёмов на уровнях 0,1 и 0,02 мг/л с трех суток и до конца эксперимента (14-е сутки) приводило к ингибированию роста оцениваемой микрофлоры от 15,28 до 36,84 %. Снижение содержания токсиканта до 0,005 мг/л не вызывало значимых изменений числа сапрофитов (табл. 5).

Таблица 3

Достоверные изменения процессов БПК<sub>5</sub> воды (мг О<sub>2</sub>/л), загрязненной ГХБ

Период проведения исследований, сут	Концентрация ГХБ в воде, мг/л			Контроль
	0,50	0,10	0,02	
I серия				
1	0,77 (20,62↓)	0,81 (16,50↓)	0,91 (6,19)	0,97
3	1,39 (27,98↓)	1,43 (25,91↓)	1,71 (11,40)	1,93
II серия				
1	0,71 (23,66↓)	0,78 (16,13↓)	1,01 (8,60)	0,93
3	1,79 (15,57↓)	1,85 (12,74)	2,29 (8,02)	2,12
III серия				
1	0,71 (28,28↓)	0,78 (21,21↓)	0,91 (8,08)	0,99
3	2,57 (22,82↓)	2,82 (15,32↓)	3,25 (2,40)	3,33

Примечание. В табл. 3—5 в скобках полужирным шрифтом указано достоверное отклонение величины (%) и направленность эффекта (↑↓).

Таблица 4

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

Показатели и единицы измерения	Сроки наблюдения	Концентрация ГХБ в воде, мг/л			Контроль
		0,1	0,02	0,005	
Азот аммонийный (по NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ), мг/л	7-е сутки	4,34 ( <b>27,65↑</b> )	3,94 (15,88)	3,96 (16,47)	3,40
	10-е сутки	4,02 ( <b>20,36↑</b> )	3,84 (14,97)	3,62 (8,38)	3,34
Азот нитритов (по NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ), мг/л	17-е сутки	1,57 ( <b>28,64↓</b> )	1,65 ( <b>25,00↓</b> )	1,98 (10,00)	2,20
	21-е сутки	2,36 ( <b>22,62↓</b> )	2,51 ( <b>17,71↓</b> )	2,97 (2,62)	3,05
	23-е сутки	3,31 ( <b>20,24↓</b> )	3,83 (7,71)	4,20 (1,21)	4,15
Азот нитратов (по NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), мг/л	17-е сутки	0,79 ( <b>27,52↓</b> )	0,95 (12,84)	1,14 (4,59)	1,09
	21-е сутки	0,59 ( <b>19,18↓</b> )	0,67 (8,22)	0,77 (5,48)	0,73

Таблица 5

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

Период посева	Концентрация ГХБ в воде, мг/л			Контроль
	0,1	0,02	0,005	
3-е сутки	5550,0 ( <b>22,92↓</b> )	6100,0 ( <b>15,28↓</b> )	7600,0 (5,56)	7200,0
7-е сутки	2850,0 ( <b>25,97↓</b> )	3100,0 ( <b>19,48↓</b> )	4090,0 (6,23)	3850,0
10-е сутки	670,0 ( <b>29,47↓</b> )	750,0 ( <b>21,05↓</b> )	891,0 (6,21)	950,0
14-е сутки	360,0 ( <b>36,84↓</b> )	425,0 ( <b>25,44↓</b> )	595,0 (4,39)	570,0

Таблица 6

## Достоверные изменения, установленные после однократного перорального воздействия гексахлорбензола

Показатели и единицы измерений	Дозы вещества, мг/кг		Контроль
	500	10,0	
Частота дыхательных движений в минуту	<b>95,50 ± 9,66**↓</b>	<b>104,0 ± 5,18*↓</b>	119,5 ± 3,24 (101,16 ÷ 137,8)
Гемоглобин, г/л	<b>162,1 ± 3,6*↓</b>	173,0 ± 2,0	170,8 ± 2,6
Гематокрит, %	<b>41,04 ± 0,87*↓</b>	43,81 ± 0,54	43,09 ± 0,49

Примечание: символом \* обозначены статистически значимые различия при  $P \leq 0,05$  и находящиеся в пределах ( $M \pm 2\sigma$ ) показатели контрольной группы животных; символом \*\* обозначены статистически значимые различия при  $P \leq 0,05$ , выходящие за пределы ( $M \pm 2\sigma$ ) показатели контрольной группы животных.

Величина ГХБ — 0,02 мг/л, оказывающая минимальное вредное воздействие на жизнеспособность исследуемых микроорганизмов воды, признана в качестве пороговой величины. Соответственно концентрация соединения — 0,005 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 — 50,0 мг/кг (1-я опытная группа) и 10,0 мг/кг (2-я опытная группа). Обследование крыс проводили через 1 сутки после введения водно-крахмальных растворов химагента. При этом определено, что у животных опытных групп не выявлено видимых клинических признаков интоксикации, а также достоверных в сопоставлении с контролем отличий массы тела, частоты сердечных сокращений и порога реакции на тепловое воздействие (табл. 6). Кроме того, анализ данных, полученных после проведения регистрации поведенческих реакций в установке "открытое поле", позволил констатировать отсутствие достоверных отклонений от соответствующих контрольных значений (табл. 6).

В то же время у подопытных самцов обеих групп зарегистрировано статистически значимое снижение частоты дыхательных движений, выходящее за пределы бисигмальных отклонений контроля у особей первой опытной группы.

При последующей оценке состояния периферической крови подопытных грызунов, получавших соединение в большей дозе, выявлено статистически значимое относительно аналогичных показателей в контроле снижение уровня гемоглобина и гематокрита (табл. 6).

С учетом изложенного доза ГХБ — 50,0 мг/кг признана явно действующей, а уровень — 10,0 мг/кг расценен как близкий к порогу острого общетоксического действия.

Обобщенный анализ результатов выполненных экспериментов однократного загрязнения воды водоемов ГХБ позволил установить, что тестируемое соединение приводит к негативному изменению её органолептических характеристик и общесанитарных свойств. Кроме того, в условиях острого опыта данное вещество при внутрижелудочном поступлении оказывает токсическое воздействие на организм лабораторных животных.

Таким образом, можно констатировать, что попадание гексахлорбензола в воду представляет экологотоксикологическую опасность, зарегистрированную

по всем трём базовым признакам вредности, что обязательно должно приниматься во внимание при обращении с рассмотренным стойким органическим загрязнителем.

## Выводы

1. Гексахлорбензол способствует пенообразованию и изменению прозрачности исследуемой экосистемы. Концентрация 2,5 мг/л определена как пороговая по органолептическому признаку вредности.
2. По влиянию на процессы биохимического потребления кислорода пороговая концентрация соединения составила 0,1 мг/л, по воздействию на триаду азота и жизнеспособность сапрофитной микрофлоры — 0,02 мг/л.
3. Уровень токсиканта — 10,0 мг/кг признан в качестве порога однократного общетоксического действия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях (с изменениями на 10 мая 2019 года) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/901821036>, свободный (дата обращения: 10.01.2022).
2. Стойкие органические загрязнители: управление риском воздействия на окружающую среду и здоровье населения: [пособие] / под ред. Б. Н. Филатова. Федеральное медико-биологическое агентство, Федеральное государственное унитарное предприятие "Научно-исследовательский институт гигиены, токсикологии и профпатологии" Федерального медико-биологического агентства. Волгоград: ФМБА России, 2013. — 180 с.
3. Гексахлорбензол (ГХБ) // Экология производства: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.promothod.ru/spisok-soz/geksaxlorbenzol-gxb/> (дата обращения: 10.01.2022).
4. 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.
5. Унифицированные методы анализа вод / под ред. Лурье Ю. Ю. — М.: Химия, 1971. — 448 с.
6. Муравьев А. Г. Руководство по определению показателей качества воды полевыми методами. — СПб.: Крисмас+, 2004. — 477 с.
7. ПНДФ 14.1:2.4.123-97 КХА вод. МВИ биохимической потребности в кислороде после *n*-дней инкубации (БПК<sub>полн</sub>) в поверхностных пресных, подземных (грунтовых), питьевых, сточных и очищенных сточных водах. — М.: Гос. комитет РФ по охране окружающей среды, 2004. — 18 с.
8. Цыганок В. М. Определение влияния исследуемых веществ на процессы естественного самоочищения при гигиеническом нормировании в области санитарной охраны водоемов: сб. науч. трудов НИИ гигиены им. Ф. Ф. Эрисмана. — М., 1974. С. 55—58.
9. ПНДФ 14.1:2.1-95 Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов аммония в очищенных сточных водах фо-

тометрическим методом с реактивом Несслера. — М.: Гос. комитет РФ по охране окружающей среды, 2004. — 13 с.

10. 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.

11. 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.

12. ГОСТ 33044–2014 Принципы надлежащей лабораторной практики. — М.: Стандартинформ, 2014. — 18 с.

13. 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., Тимофиевской Л. А., Балыкина Е. С., Веселовской К. А., Шашкиной Л. Ф., Голубевой М. И. — Киев, 1980. — 46 с.

14. Лакин Г. Ф. Биометрия. — М.: Высшая школа, 1990. — 350 с.

## Experimental assessment of the danger of contamination of water bodies with hexachlorobenzene

<sup>1</sup> A. A. MASLENNIKOV, <sup>1</sup> S. A. DEMIDOVA, <sup>2</sup> A. A. KASHCHEEV, <sup>1</sup> V. A. ANTONOV

<sup>1</sup> FSUE "Research Institute of Hygiene, Toxicology and Occupational Pathology" at Federal Medical and Biological Agency, Volgograd, Russia

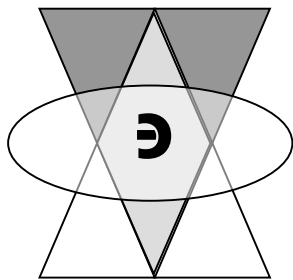
<sup>2</sup> Federal State Autonomous Education Institution of Higher Education "Volgograd State University", Volgograd, Russia

*A comprehensive experimental assessment of the danger of the content of a persistent organic pollutant — hexachlorobenzene in the water of reservoirs was carried out. It was found that the toxicant caused changes in the organoleptic and general sanitary properties of water. In the conditions of acute experience, the substance with intragastric intake had a toxic effect on the body of laboratory animals. The data obtained should be taken into account when handling the considered compound in this ecosystem.*

**Keywords:** water, hexachlorobenzene, organoleptic and sanitary regime of water reservoirs, threshold of acute general toxicity.

Bibliography — 14 references.

Received February 15, 2022



## Экологический контроль. Прогнозирование

УДК 621.22

DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_2\_30

EDN: DVPSEQ

### Максимальный нагревательный потенциал антропогенных парниковых газов

**В. В. ТЕТЕЛЬМИН**, д-р техн. наук

Общественный совет при Минэнерго РФ, Москва, Россия

*На основании ранее предложенного решения выполнены расчеты динамики глобального потепления с учетом сокращения выбросов парниковых газов в соответствии с рекомендациями Парижского соглашения. На основании анализа термодинамических параметров климатической системы в последний ледниковый и доиндустриальный периоды истории Земли получены функции зависимости максимальной температуры глобального потепления от массы и объемной концентрации парниковых газов в атмосфере. Определена "масса парникового насыщения" атмосферы антропогенными парниковыми газами и соответствующая максимальная температура глобального потепления. При неограниченной эмиссии трех основных парниковых газов максимальная температура, которую они могут обеспечить, равна 9,2 °С. При снижении к 2060 г. ежегодных глобальных выбросов в два раза глобальное потепление будет продолжаться примерно до 2110 г. с увеличением глобальной температуры до 3,1 °С.*

**Ключевые слова:** парниковые газы, ледниковый период, солнечная постоянная, масса насыщения атмосферы, максимальная температура глобального потепления.

В последние десятилетия обнаружилось, что человек в погоне за производством возрастающего количества энергии опасно нагревает все земное пространство. Тысячи дымовых труб и выхлопы миллиарда автомобилей расшатывают климатическую систему Земли. Годовые выбросы мировой экономикой основных парниковых газов следующие: CO<sub>2</sub> — около 40 млрд т; CH<sub>4</sub> — 330 млн т, N<sub>2</sub>O — 8,2 млн т. Гипертрофированная зависимость мировой энергетики от ископаемого топлива привела к выбросу в атмосферу более 2 трлн т основного парникового газа CO<sub>2</sub>, из которых около половины усваивается мировой растительностью и Мировым океаном, а вторая половина антропогенных выбросов аккумулируется атмосферой.

За последние полтора века глобальная температура увеличилась почти на 1,2 °С. Такого темпа роста земной температуры не наблюдалось никогда. Климатологи всего мира пришли к заключению, что наблюдаемое необратимое "широкомасштабное, быстрое и усиливающееся изменение климата" — это следствие роста антропогенных парниковых газов в атмосфере [1].

На рис. 1 представлен рассчитанный график изменения содержания парниковых газов (ПГ) в атмосфере с начала XX в. с учетом сокращения глобальных выбросов в соответствии с рекомендациями Парижского соглашения и с учетом периода существования CO<sub>2</sub> в атмосфере продолжительностью до 120 лет. Здесь и далее массовое и объемное содержание ПГ в атмосфере приводится к эквиваленту диоксида углерода (т-eq и ppm-eq).

В работе [2] приведено аналитико-эмпирическое решение задачи по определению темпа глобального потепления как функции содержания в атмосфере массы антропогенных парниковых газов (ПГ). В основу вывода "формулы глобального потепления" поло-

---

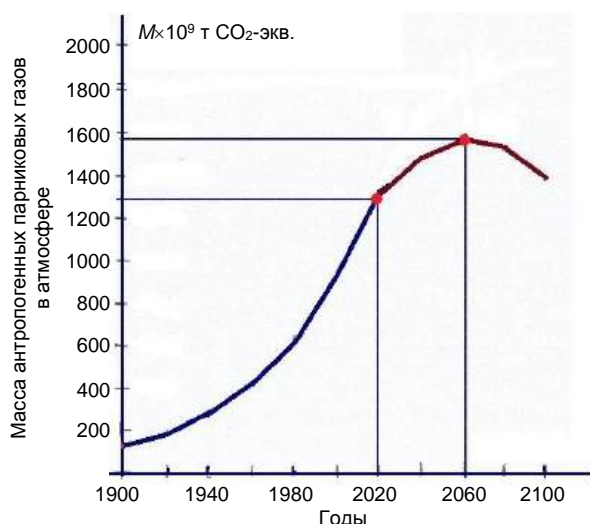
**Тетельмин Владимир Владимирович**, профессор, член Общественного совета при Минэнерго РФ.  
E-mail: v-tetelmin@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 1 февраля 2022 г.

© Тетельмин В. В., 2022



жен график реального роста аккумулированной климатической системой (КС) тепловой энергии за период 1970—2010 гг., который косвенно учитывает все особенности переноса и передачи тепловой энергии парниковых газов климатической системе Земли [3, 4]. За период с 1970 по 2010 г. климатическая система (КС) Земли аккумулировала  $2,7 \cdot 10^{23}$  Дж ( $75 \cdot 10^{15}$  кВт·ч) тепловой энергии антропогенных парниковых газов, из которой примерно 94 % приходится на Мировой океан, 4,5 % на сушу и 1,5 % на атмосферу.



**Рис. 1.** Содержание антропогенных парниковых газов в атмосфере с учетом сокращения глобальных выбросов в соответствии с рекомендациями Парижского соглашения и с учетом продолжительности существования CO<sub>2</sub> в атмосфере до 120 лет

В основу предложенного решения положено следующее выражение, позволяющее определять повышение температуры атмосферы за любой 10-летний период времени [2, 5]:

$$\Delta T_i = 16,5 \cdot 10^{-14} \cdot M_i \text{ (град/10 лет).} \quad (1)$$

где  $M_i$  (т-eq) — среднее значение массы ПГ в атмосфере в расчетном периоде в эквиваленте диоксида углерода.

Расчеты выполняют с использованием метода последовательной смены стационарных состояний с шагом по времени в 10 лет. Повышение глобальной температуры за несколько расчетных периодов  $i$  определяют суммированием:

$$T_i = \sum \Delta T_i. \quad (2)$$

В табл. 1 приведены результаты расчета глобального потепления с 1950 по 2120 г. при изменении содержания ПГ в атмосфере в соответствии с графиком рис. 1. Результаты расчетов практически совпадают с известными натурными и расчетными данными глобального потепления, что позволяет сделать вывод о том, что предлагаемая формула хорошо работает. При сокращении к 2060 г. ежегодных глобальных выбросов CO<sub>2</sub> наполовину планета Земля будет продолжать нагреваться, и к 2100 г. средняя глобальная температура на планете повысится до 2,92 °С.

При климатическом прогнозировании важно знать предельное значение температуры  $T_{\max}$ , к которой стремится глобальное потепление и которое могут обеспечить антропогенные выбросы ПГ. Сила воздействия единицы массы ПГ на глобальное потепление зависит от их концентрации в атмосфере. По мере насыщения атмосферы ПГ радиационная эффективность единицы их содержания в атмосфере снижается.

Например, поступление дополнительной массы диоксида углерода в атмосферу будет поглощать только ту часть длинного ИК-излучения, которая не была абсорбирована уже присутствующим в атмосфере этим газом. Добавление новых порций CO<sub>2</sub> оказывает меньшее воздействие на потепление, потому что им приходится конкурировать с ранее поступившим в атмосферу газом за излучение в диапазонах длин волн 4—4,4 мкм и 14—19 мкм. По этой причине удвоение содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере не увеличит вдвое поглощение ИК-излучения.

Таблица 1

**Накопленные с нарастающим итогом показатели содержания антропогенных парниковых газов в атмосфере, парниковой тепловой энергии в климатической системе Земли и доля N парникового тепла в атмосфере от общего количества накопленного в КС парникового тепла**

Годы	Накопленные в атмосфере выбросы ПГ, Кррт-eq	Накопленные в атмосфере выбросы ПГ, $M \cdot 10^9$ т-eq	Накопленная тепловая энергия в климатической системе, $Q \cdot 10^{15}$ кВт·ч	Накопленный рост среднегодовой температуры атмосферы, °С	Доля парниковой тепловой энергии в атмосфере, N %
1950	43	340	12,4	0,20	2,40
1960	52	410	19,0	0,25	1,94
1970	63	500	27,5	0,32	1,72
1980	78	615	38,2	0,44	1,67
1990	97	763	53,1	0,62	1,66
2000	117	914	72,0	0,80	1,61
2010	139	1085	100,4	0,98	1,42
2020	167	1304	135,2	1,16	1,25
2050	196	1525	268,7	1,78	1,00
2060	200	1563	312,5	2,01	0,98
2100	177	1381	482,5	2,92	0,90
2120	143	1116	557	3,28	0,89

Для нахождения предельной температуры потепления  $T_{\max}$  нужно знать функцию зависимости потенциала нагревания атмосферы от содержания парниковых газов, например от их объемной концентрации в атмосфере  $P_K = f(K)$  (град/ррт-eq). Для определения потенциала глобального потепления антропогенных парниковых газов строятся математические модели, которые учитывают соотношение между физическими, химическими и биологическими свойствами климатической системы Земли, а также динамические процессы атмосферной и океанической циркуляции. Полученные решения дают большой разброс результатов. Например, из приведенных в [6] результатов расчетов семи климатических сценариев следует, что при концентрации антропогенных ПГ на уровне 550 ррт-eq оценка соответствующей глобальной температуры  $T_{\max}$  составляет от 2 до 4,5 °C, а при  $K = 800$  ррт-eq разброс ещё больше: от 3 до 7 °C. Подобную точность нельзя признать удовлетворительной.

Более точные прогнозы максимальной равновесной температуры для каждого значения концентрации ПГ в атмосфере можно получить, используя известные данные о палеоклимате. Функции зависимости предельного значения "нагревательного" потенциала единицы массы  $P_m$  или единицы объемной концентрации  $P_K$  от содержащихся в атмосфере ПГ можно получить, используя свойство тесной корреляции между глобальной квазистационарной температурой и концентрацией ПГ в палеоатмосфере Земли [7, 8].

Если представить, что искомая функция  $P_K = f(K)$  град/ррт-eq является линейной, то достаточно получить две экспериментальные точки этой прямой. Примерное постоянство содержания ПГ в атмосфере на протяжении последних 8 тысяч лет современного межледникового периода обеспечивало квазистационарное состояние климатической системы Земли. Эта особенность позволяет получить первую искомую точку графика линейной функции  $P_K = f(K)$  град/ррт-eq.

В доиндустриальный период средняя концентрация каждого из трех основных ПГ в атмосфере составляла:  $\text{CO}_2$  — 280 ррт,  $\text{CH}_4$  — 0,7 ррт,  $\text{N}_2\text{O}$  — 0,27 ррт. В переводе на единицы, эквивалентные потенциалу глобального потепления диоксида углерода GWP, общая доиндустриальная объемная концентрация этих ПГ составляла 370 ррт-eq, а их массовое содержание в атмосфере  $2,86 \cdot 10^{12}$  т-eq. Известно, что в доиндустриальном периоде доля основных ПГ ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$ ) в общем парниковом эффекте на Земле составляла 9,4 °C из 33,4 °C [9, 10]. Отсюда находим свойственный для этого периода потенциал нагревания содержащихся в атмосфере ПГ в единицах объемной концентрации —  $P_K = 9,4 \text{ °C}/370 \text{ ррт-eq} = 25,4 \cdot 10^{-3}$  град/ррт-eq, а также в единицах массы —  $P_m = 3,29 \cdot 10^{-12}$  т-eq.

Вторую искомую точку графика линейной функции  $P_K = f(K)$  можно найти, анализируя ход изменения глобальной температуры и концентрации ПГ в последний ледниковый период (рис. 2). В этот период температура изменялась в диапазоне 5,8—16,4 °C,

концентрация  $\text{CO}_2$  в диапазоне 190—290 ррт,  $\text{CH}_4$  в диапазоне 0,35—0,70 ррт,  $\text{N}_2\text{O}$  в диапазоне 0,20—0,27 ррт. При этом независимо от того, что было первичным — изменение температуры, вслед за которым изменялась концентрация ПГ в атмосфере, или наоборот, осредненные значения этих величин в последний ледниковый период изменялись согласованно. Примерно 18 тыс. лет назад началось глобальное потепление на 10 °C, продолжавшееся около 11 тыс. лет. При этом темп естественного нагревания атмосферы происходил примерно в 20 раз медленнее современного наблюдаемого глобального потепления.

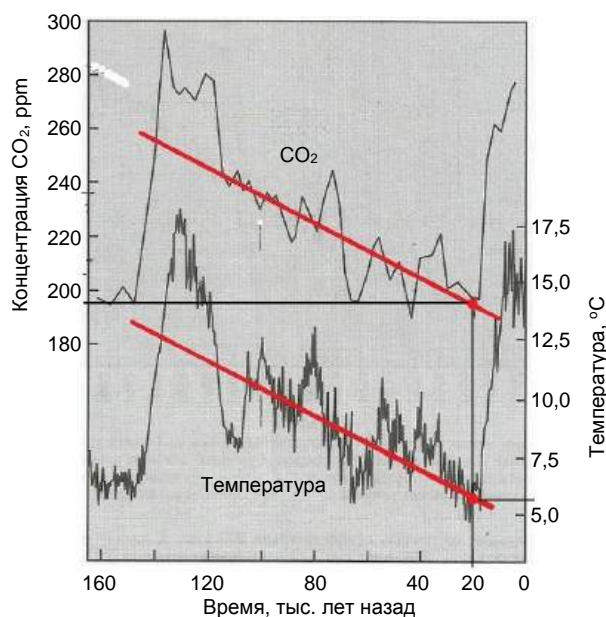


Рис. 2. Ход изменения глобальной температуры и концентрации диоксида углерода за последние 160 тыс. лет [11]

Изменение глобальной температуры на Земле, в первую очередь, происходит за счет изменения солнечной постоянной  $S$ , которая в настоящее время равна 1368 Вт/м<sup>2</sup>. Из трех известных циклов Миланковича [7, 8] ледниковые периоды обеспечиваются только одним циклом — изменением эксцентриситета  $\varepsilon = c/a$  эллиптической орбиты Земли. В приведенном отношении:  $c$  — половина фокусного расстояния,  $a$  — большая полуось эллиптической орбиты. В последний ледниковый период произошла существенная корректировка орбиты Земли гравитационным воздействием планет Солнечной системы, которая изменила эксцентриситет орбиты от значения 0,042 в период 100 тыс. лет назад до 0,017 в период 20 тыс. лет назад.

В табл. 2 приведены данные о современных параметрах орбиты и климатической системы Земли при  $\varepsilon = 0,017$ , а также рассчитанные параметры орбиты и соответствующие термодинамические показатели состояния в начальной стадии ледникового периода 100—70 тыс. лет назад, когда орбита была наиболее вытянутой при  $\varepsilon = 0,042$ . Расчеты выполнены с использованием закона Стефана—Больцмана для излучающего абсолютно черного тела [12—14].

Таблица 2

Некоторые параметры эллиптической орбиты Земли и соответствующие термодинамические параметры климатической системы

Период, тыс. лет назад	Эксцентриситет, $\varepsilon$	Длина большой полуоси, а млн км	Вариация солнечной постоянной, $S_{\max}/S_{\min}$ , %	Солнечная постоянная, $S$ Вт/м <sup>2</sup>	Температура Земли без ПГ, $T_0$ К/°С	Глобальная температура, $T$ °С	Концентрация $\text{CO}_2/\Sigma \text{ПГ}$ , $K_{\text{ppm-eq}}$
100	0,042	153,5	19,9	1300	252/-21	10,6	235/314
20	0,017	149,6	6,8	1368	254/-19	5,8	198/267

Изменение эксцентриситета орбиты Земли на 0,025 изменило интенсивность лучистой энергии на внешней границе земной атмосферы — солнечной постоянной на 4,6 %, что и ввергло нашу планету в ледниковый период. В начале ледникового периода температура атмосферы снизилась на величину 3,8 °С, из которой 2 °С вызвано снижением солнечной постоянной, а остальные 1,8 °С — снижением содержания в атмосфере ПГ. В последующие годы 100—20 тыс. лет назад глобальная температура на Земле дополнительно снизилась на 4,8 °С, концентрация  $\text{CO}_2$  в палеоатмосфере на 37 ppm, а концентрация ПГ — на 47 ppm-eq.

К концу ледникового периода 20—18 тыс. лет назад эксцентриситет орбиты вернулся к уровню 0,017, после чего Земля вновь стала получать лучистую энергию в количестве  $S = 1368$  Вт/м<sup>2</sup>. В этот период климатическая система Земли находилась в состоянии радиационного баланса, сопоставимом с доиндустриальным квазистационарным состоянием, которое можно использовать в качестве второй реперной точки для определения потенциала нагревания ПГ.

В табл. 3 приводятся фактические значения "нагревательного потенциала" трех основных ПГ. Годы 20 и 2 тыс. лет назад определяют две искомые точки линейной функции  $\Pi_K = f(K)$ . Именно эти точки отвечают современному значению солнечной постоянной  $S = 1368$  Вт/м<sup>2</sup>, в то время как годы 100 и 70 тыс. лет назад определяют две точки функции  $\Pi_K = f(K)$ , которая отвечает более холодному состоянию Земли при солнечной постоянной  $S = 1300$  Вт/м<sup>2</sup> (рис. 3).

На рис. 3 приведены графики изменения  $\Pi_K$  в зависимости от содержания ПГ в атмосфере для двух состояний КС Земли: при значении солнечной постоянной  $S = 1300$  Вт/м<sup>2</sup> и  $S = 1368$  Вт/м<sup>2</sup>. В обоих случаях удельный потенциал нагревания атмосферы (КС) уменьшается с увеличением содержания ПГ в атмосфере. При относительно малых концентрациях "нагревательный" потенциал ПГ выше, чем потенциал при их более высоком содержании в атмосфере. Эта особенность объясняется тем, что дополнительные выбросы парниковых газов поглощают оставшуюся часть ИК-излучения, которая не была адсорбирована уже находящимися в атмосфере парниковыми газами. Увеличение содержания ПГ в атмосфере снижает парниковое действие каждой единицы массы.

Современному термодинамическому состоянию климатической системы Земли, отстоящей от Солнца в среднем на 149,6 млн км, отвечает график 2 (рис. 3). Зависимость "нагревательного потенциала" ПГ от их объемной концентрации  $K$  в атмосфере может быть представлена следующей функцией:

$$\Pi_K = 29,8 \cdot 10^{-3} - 11,9 \cdot 10^{-6} \cdot K \text{ (град/ppm-eq)}. \quad (3)$$

Значение температуры максимального (равновесного) глобального потепления, вызванного общей концентрацией  $K$  (ppm-eq) парниковых газов, определяется следующим уравнением:

$$T_{\max} = \Pi_K \cdot K = [29,8 \cdot 10^{-3} \cdot K - 11,9 \cdot 10^{-6} \cdot K^2] \text{ (град)}. \quad (4)$$

Таблица 3

Изменение общего потенциала нагревания атмосферы тремя основными парниковыми газами ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ), в зависимости от их общего содержания в атмосфере Земли в последний ледниковый период

Годы, тыс. лет назад	Концентрация парниковых газов в атмосфере, $K$ ppm-eq	Концентрация парниковых газов в атмосфере, $M \cdot 10^{12}$ т-eq	Максимальное нагревание атмосферы, $T_{\max}$ °С	Потенциал нагревания, $\Pi_K \cdot 10^{-3}$ град/ppm-eq	Потенциал нагревания, $\Pi_M \cdot 10^{-12}$ град/т-eq
100	314	2,48	8,9	28,3	3,59
70	293	2,31	8,4	28,6	3,64
20–18	261	2,03	7,0	26,8	3,45
8–2	370	2,86	9,4	25,4	3,29

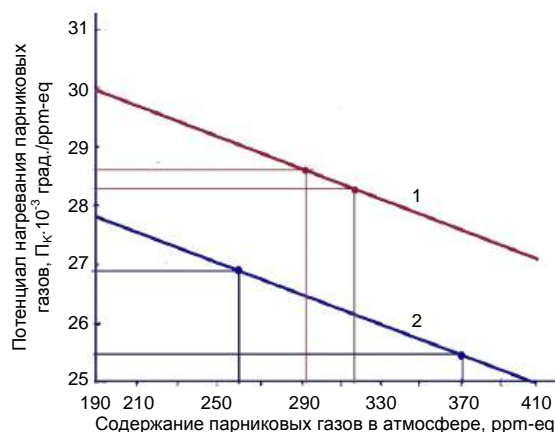


Рис. 3. Зависимость потенциала нагревания атмосферы парниковыми газами от их содержания в атмосфере при разных значениях солнечной постоянной:

1 —  $S = 1300$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\varepsilon = 0,042$ ;  
2 —  $S = 1368$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\varepsilon = 0,017$



Максимальная температура  $T_{\max}$ , к которой через продолжительное время приходит земная атмосфера, определяется нелинейным уравнением параболического типа. Исследуя функцию (4) на экстремум, получаем максимальное значение концентрации ПГ, при котором наступает "парниковое насыщение" атмосферы:  $K_{\text{нас}} = 1250$  ppm-eq. Этому значению концентрации соответствует температура максимального глобального потепления, которое могут обеспечить три основных антропогенных парниковых газа:  $T_{\max(\text{нас})} = 18,6$  °C.

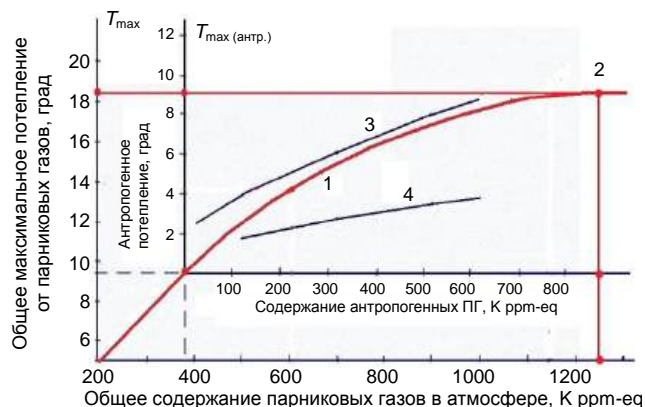


Рис. 4. График функции максимального глобального потепления 1, соответствующего равновесному состоянию климатической системы: 2 — точка "парникового насыщения" КС; 3 и 4 — верхний и нижний пределы оценки  $T_{\max}$ , полученные моделированием

На рис. 4 приведен график 1 нелинейной функции (4) в двух системах отсчета: в системе общей концентрации ПГ в атмосфере и в системе антропогенной концентрации ПГ. Точка начала антропогенной системы отсчета имеет координаты 370 ppm-eq и 9,4 °C, соответствующие состоянию КС в начале индустриального периода. Видим, что график функции (4) укладывается в широкий диапазон оценок  $T_{\max}$ , полученный математическим моделированием семи климатических сценариев [6].

Используя данные табл. 3, можно определить функцию зависимости нагревательного потенциала от массы  $M$  (т-eq) ПГ в атмосфере:

$$P_M = 3,8 \cdot 10^{-12} - 0,195 \cdot 10^{-24} \cdot M \text{ (град/т-eq)}. \quad (5)$$

Значение температуры максимального глобального потепления, вызванного массой  $M$  (т-eq) содержащихся в атмосфере ПГ, определяется произведением:

$$T_{\max} = P_M \cdot M = [3,8 \cdot 10^{-12} \cdot M - 0,195 \cdot 10^{-24} \cdot M^2] \text{ (град)}. \quad (6)$$

Исследуя функцию (6) на экстремум, находим массу  $M_{\text{нас}}$ , при которой происходит "парниковое насыщение" атмосферы:  $M_{\text{нас}} = 9,7 \cdot 10^{12}$  т-eq. При таком содержании массы ПГ в атмосфере их "парниковые возможности" себя исчерпают и в случае дальнейшего увеличения  $M > M_{\text{нас}}$  температура атмосферы повышаться не будет.

Полученное значение максимальной температуры  $T_{\max(\text{нас})} = 18,6$  °C определяет собой абсолютный

вклад основных ПГ в глобальное потепление. Максимальное участие антропогенных выбросов ПГ в глобальном потеплении определяется разностью:  $T_{\max(\text{нас антр})} = (18,6$  °C  $- 9,4$  °C) = 9,2 °C. Таким образом, неограниченные выбросы и неограниченное участие человека в глобальном потеплении способны добавить к глобальной доиндустриальной температуре примерно 9,2 °C, то есть к наблюдаемому современному антропогенному потеплению на 1,2 °C может быть добавлено еще 8,0 °C.

На рис. 5 приведены расчетная кривая роста глобальной температуры, построенная по данным табл. 1, а также кривая изменения предельной температуры  $T_{\max}$ , которая изменялась в соответствии с графиком изменения содержания ПГ в атмосфере (рис. 1). Точка пересечения 3 этих кривых определяет собой время наступления термодинамического равновесия в системе "Земля—Космос". К этому состоянию радиационного баланса Земля подойдет примерно в 2110 г., а максимальная температура глобального потепления к этому времени достигнет значения 3,1 °C.

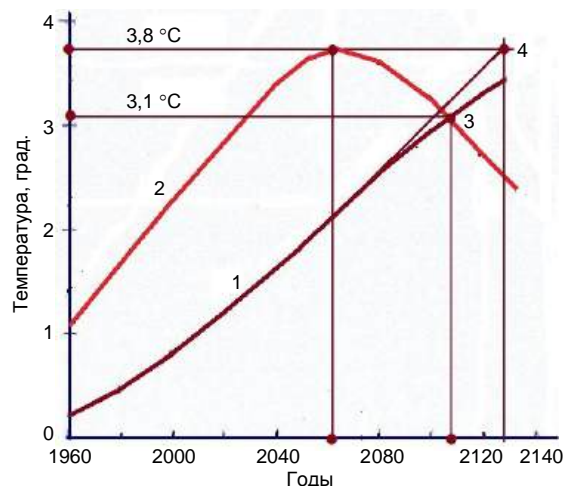


Рис. 5. Динамика изменения глобальной температуры во времени (кривая 1) и график изменения во времени максимальной температуры в соответствии с изменением содержания ПГ в атмосфере (кривая 2)

Если представить, что в 2060 г. содержание ПГ в атмосфере стабилизируется, то состояние термодинамического равновесия будет определяться точкой пересечения 4. В таком случае радиационный баланс наступит позже — в 2130 г., а глобальное потепление составит 3,8 °C.

## Выводы

Рассмотрение и использование параметров квазистационарного состояния КС Земли в доиндустриальный и ледниковый периоды позволило получить:

- функции (3) и (5), определяющие зависимость "удельного нагревательного потенциала" парниковых газов от их содержания в атмосфере;
- функции (4) и (6), определяющие зависимость максимальной температуры  $T_{\max}$  глобального потепления от содержания ПГ в атмосфере.

Исследование нелинейных функций (4) и (6) на экстремум позволяет определить:

- приведенную концентрацию  $K_{\text{нас}} = 880 \text{ ppm-eq}$  и приведенную массу  $M_{\text{нас}} = 6,84 \cdot 10^{12} \text{ т-eq}$  антропогенных ПГ, при достижении которых наступает "парниковое насыщение" атмосферы;
- максимальную температуру глобального потепления, отвечающую равновесному состоянию "парникового насыщения" атмосферы антропогенными ПГ —  $T_{\text{max(антр)}} = 9,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Совместное использование функций (2) и (6) позволяет при любом сценарии выбросов ПГ рассчитать темп глобального потепления и момент достижения атмосферой предельного значения температуры, при которой устанавливается радиационный баланс в системе "Земля—Космос".

Через несколько тысяч лет Земля войдет в очередную ледниковый период, когда на её поверхности впервые будет присутствовать технологически и технически вооруженный человек. Сегодняшний человек понимает, что происходит с климатом, предвидит последствия его изменения, понимает причины и особенности изменения солнечной постоянной  $S$  и сумеет подготовиться к длительному глобальному похолоданию.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пачаури Р., Мейер Л. и др. Изменение климата: Обобщенный доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в пятый оценочный доклад МГЭИК. 2014: МГЭИК. Женева. Швейцария, — 44 с.
2. Тетельмин В. В. Антропогенные выбросы парниковых газов и формула глобального потепления // Экология промышленного производства. 2021. № 4. С. 46—52.
3. Глобальная климатическая угроза и экономика России в поисках особого пути. Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО, май 2020 г. — 65 с.
4. IPCC. 2014 b. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken. Cambridge University Press, Cambridge. United Kingdom and New York, NY USA. — 1132 p.
5. Тетельмин В. В. Планета Земля и человек. Единая экосистема. — М.: ЛЕНАНД, 2022. — 480 с.
6. Силвер Дж. Глобальное потепление без тайн / пер. с англ. — М.: Экспо. 2009. — 336 с.
7. Бялко А. В. Палеоклимат: дополнение к теории Миланковича // Природа. 2009. № 12. С. 18—28.
8. Мельников В. П., Смусьский В. И. Астрономическая теория ледниковых периодов: Новые приближения. Решенные и нерешенные проблемы. — Новосибирск: Изд. ГЕО, 2009. — 98 с.
9. Бажин Н. Б. Метан в окружающей среде. — Новосибирск: СО РАН. 2010. — 56 с.
10. Иващенко О. В. Потепление климата — каким оно будет. Режим доступа <http://www.poteplenie.ru/problem/oi-1-2.htm>.
11. Джирард Дж. Е. Основы химии окружающей среды / пер. с англ. — М.: ФИЗМАТЛИТ. 2008. — 640 с.
12. Бринкман Э. Физические проблемы экологии. — Долгопрудный: Интеллект, 2012. — 288 с.
13. Тетельмин В. В. Физика и проблемы изменения климата // Вестник РАЕН. 2019. № 4. С. 29—35.
14. Тетельмин В. В., Пимашков П. И. Биосфера и человек. Глобальное потепление. — М.: ЛЕНАНД, 2021. — 336 с.

## The highest warming potential of anthropogenic greenhouse gases

V. V. TETELMIN

Public Council at the Ministry of Energy of the Russian Federation, Moscow, Russia

*Based on the previously proposed solution, the calculations of the global warming dynamics were made taking into account the reduction of greenhouse gas emissions according to the recommendations of the Paris Agreement. Based on the analysis of thermodynamic parameters of the climatic system during the last glacial and pre-industrial periods of the Earth's history, the functions of the maximum global warming temperature dependence on the mass and volume concentration of greenhouse gases in the atmosphere were obtained. The "mass of greenhouse saturation" of the atmosphere by anthropogenic greenhouse gases and the corresponding maximum global warming temperature have been determined. With unrestricted emission of the three major greenhouse gases, the maximum temperature they can provide is 9.2 °C. With annual global emission reduction by 2060, global warming will continue until about 2108 with a global temperature increase up to 3.1 °C.*

**Keywords:** greenhouse gases, glacial era, solar constant, atmospheric saturation mass, maximum global warming temperature.

Bibliography — 14 references.

Received February 1, 2021

УДК 656.13+504.054  
DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_2\_36  
EDN: FRTTHU

## Оценка уровня негативного воздействия автомобильного транспорта в городе Челябинске на окружающую среду и здоровье населения на период до 2030 года

Ю. В. ТРОФИМЕНКО, д-р техн. наук; В. И. КОМКОВ, канд. техн. наук  
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
Москва, Россия

*С использованием прогнозных оценок численности, структуры, экокласса, типа энергоустановок, а также характеристик движения АТС приводится расчетная модель (реализованная в программе COPERT V) и представлены результаты оценки уровня негативного воздействия автотранспортного комплекса г. Челябинска по двум сценариям (базовому и целевому) в случае реализации мероприятий по совершенствованию транспортной системы города. Установлено, что к 2030 г. по сравнению с 2019 могут сократиться как выбросы загрязняющих веществ (до 2,05 раза) при реализации целевого сценария, так и существенно снизится потребление моторного топлива и выбросы парниковых газов (от 20 до 32,8 %).*

**Ключевые слова:** автомобильный транспорт, выбросы загрязняющих веществ, расчетные оценки, программа COPERT.

Любые мероприятия, направленные на развитие транспортных систем, реализуемых на основе транспортного планирования, моделирования, использования информационно-коммуникационных технологий, новых материалов, видов энергии поддаются экологической оценке.

В условиях бурного развития транспортных технологий в связи с информатизацией (цифровизацией) транспортной деятельности, электрификацией автомобильного транспорта, внедрения беспилотных транспортных средств, мультимодальности необходимо так совершенствовать транспортную систему, чтобы обеспечивалась ее экологическая устойчивость, которая связана с решением следующих проблемных вопросов (вызовов):

- повышенный уровень загрязнения атмосферного воздуха, а также водных объектов и почв вблизи городских улиц и автомагистралей;
- увеличение объемов потребления энергии и выбросов парниковых газов на транспорте и в дорожном хозяйстве, несмотря на повышение энергоэффективности одиночных АТС;

повышенный уровень транспортного шума в городах затрагивает большое число людей. В связи с электрификацией и автономностью АТС ожидается

рост электромагнитного "смога", связанного с транспортной деятельностью;

- эстетическая деградация среды обитания — отчуждение территории под транспортную инфраструктуру и стоянки, несанкционированное размещение отходов эксплуатации транспортных объектов, ограничения на землях с особым статусом;
- уязвимость транспортной инфраструктуры в результате роста чрезвычайных ситуаций природного характера в результате климатических изменений;
- воздействие на социальную среду, здоровье, социально-экономическое развитие;
- изменение мотивации транспортного поведения. Новые способы и культура взаимодействия человека со средой обитания из-за использования IT-технологий требуют новых подходов к управлению транспортным спросом и мотивацией поведения.

Все указанные виды негативного воздействия транспорта на окружающую среду и возникающие экологические проблемы связаны с реализацией современных или перспективных транспортных технологий, направленных на развитие мобильности и экономики.

Экологическую оценку по совокупности всех указанных видов негативного воздействия транспортных средств, технологий желательно выполнить в полном объеме. Однако в настоящее время это невозможно сделать, т. к. остается много нерешенных вопросов (отсутствие достоверных методик) по всей цепочке взаимодействия "водитель—автомобиль—дорога—окружающая природная и социальная среда—качество жизни—здоровье людей".

В этой связи представляется целесообразным оценивать влияние на окружающую природную и со-

---

**Трофименко Юрий Васильевич**, заведующий кафедрой "Техносферная безопасность".  
E-mail: ywtrofimenko@mail.ru  
**Комков Владимир Иванович**, доцент кафедры "Техносферная безопасность".  
E-mail: v.komkov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 18 марта 2022 г.

© Трофименко Ю. В., Комков В. И., 2022



циальную среду наиболее значимых факторов (мероприятий, объектов, технологий) развития транспортной системы. В их числе технический уровень, численность и структура автомобильного парка, интенсивность его использования (годовые пробеги АТС), вид используемого топлива (энергии), протяженность и связность УДС, организация дорожного движения и др.

В Челябинской области наиболее значимым видом негативного воздействия на окружающую среду, влияющим на качество жизни и здоровье населения, является повышенный уровень загрязнения атмосферного воздуха токсичными и вредными загрязняющими веществами от стационарных, а также и передвижных источников — автомобильного транспорта.

### Материалы и методы

Анализ экологической обстановки в г. Челябинске выполнен на основании анализа опубликованных официальных данных МПР России, Администрации Челябинской области и г. Челябинска, данных Росстата, ГИБДД МВД, общественных и других организаций, информации, размещенной в сети Интернет [1—8].

На основании данных 12 стационарных постов мониторинга и двух передвижных лабораторий качества атмосферного воздуха, уровень загрязнения атмосферы г. Челябинска в 2019 году по комплексному индексу загрязнения соответствует "повышенному". Значение комплексного индекса загрязнения определили концентрации бенз(а)пирена, фторида водорода, формальдегида, азота, взвешенных веществ (дисперсных частиц). За период 2015—2019 гг.

отмечено повышение концентраций оксида азота, фторида водорода, аммиака, бензола, никеля, марганца, железа, свинца.

В табл. 1 приведены расчетные значения валовых выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников в г. Челябинске, а в табл. 2 от передвижных источников (автомобильного транспорта), приведенные в отчетах Челябинскстата и Министерства экологии Челябинской области [3, 9].

Как следует из приведенных данных, в 2018 г. суммарные выбросы загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников (автотранспорта) в Челябинской области составили 830,99 тыс. т, в 2019 г. — 556,84 тыс. т. Доля автомобильного транспорта в суммарных выбросах составила соответственно 41,5 % и 17,9 %. Причем, если по стационарным источникам в 2019 г. по сравнению с 2018 г. произошло некоторое (на 3...18 %) снижение выбросов оксида углерода, оксидов серы, азота, ЛОС и лишь незначительный рост выбросов твердых частиц, то по передвижным источникам результаты расчетов Минэкологии Челябинской области по нормативной методике для сводных расчетов [10] показали кардинальное сокращение выбросов в 2019 году по сравнению с 2018 годом ЛОС (в 4,5 раза), оксида углерода (в 3,8 раза), диоксида серы (2,4 раза), оксидов азота (в 2 раза), аммиака и метана (в 1,8 раза). Аналогичная ситуация отмечена и в г. Челябинске — выбросы загрязняющих веществ от передвижных источников (автотранспорта) в 2019 г. составили 99,783 тыс. т, в то время как в 2018 г. объем выбросов составлял 344,5 тыс. т, а в 2017 г. — 305,7 тыс. т. Наблюдаемое в 2018 г. увеличение вклада автотранспорта в загрязнение атмосферного воздуха в г. Челябинске составляло в среднем 11,3 %, в 2019 г. оно уменьшилось на 71 %.

Таблица 1

**Валовые выбросы загрязняющих веществ, отходящих от стационарных источников Челябинской области и г. Челябинску**

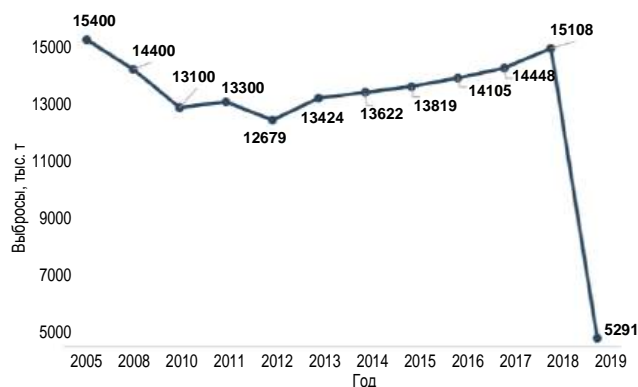
Загрязняющие вещества, тыс. т	2017	2018	2019
Твердые вещества	2718,966	64,548	70,188
Диоксид серы	422,962	63,604	52,885
Оксиды азота	67,475	59,225	58,904
Оксид углерода	266,52	261,708	248,442
Летучие органические соединения	8,824	7,132	6,928
Всего:	3509,335	486,486	457,060

Таблица 2

**Масса выбросов загрязняющих веществ от передвижных источников (автотранспорта) по Челябинской области и г. Челябинску по веществам, тыс. т**

Наименование	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	ЛОС	CO	C	NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	Всего
2018								
Область	1,9	38,3	35,6	265,6	0,6	1,0	1,4	344,5
Челябинск	0,4	7,5	8,83	73,4	0,16	0,17	0,39	90,8
2019								
Область	0,80	19,114	7,897	69,600	0,606	0,553	0,797	99,783
Челябинск	0,28	6,079	3,242	27,012	0,222	0,420	0,201	37,456

Такая же картина наблюдается и в целом по Российской Федерации, что приведено в проекте Государственного доклада "О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 г." (рис. 1).



**Рис. 1. Динамика выбросов основных загрязняющих веществ в атмосферный воздух от автомобильного транспорта [11]**

Никаких кардинальных мер по улучшению экологических характеристик автотранспортных средств, интенсивности их использования, моторного топлива, использования альтернативных источников энергии в автомобильном парке Российской Федерации, Челябинской области, города Челябинска в 2019 г. не было внедрено.

По мнению экспертов, основная причина такого значительного расхождения результатов расчетов валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу автомобильным транспортом в период с 2010 по 2019 гг. заключается в использовании рекомендуемой МПР России "Методики определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов" [10], которая имеет определенные недостатки, не прошла верификацию и требует уточнения.

В этой связи было принято решение использовать более совершенную методику оценки выбросов передвижными источниками (автотранспортом), которую широко используют при инвентаризации выбросов загрязняющих веществ дорожным транспортом в 28 странах мира, а также в Российской Федерации — методику Европейского агентства по охране окружающей среды и Европейского агентства по энергетике ЕМЕП/ЕЕА (программа COPERT версия 5). Методику используют в России для оценки выбросов ПГ от дорожного транспорта при составлении Национального доклада о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ нерегулируемых Монреальским протоколом (в рамках РКИК ООН).

С использованием этой методики уточнены выбросы загрязняющих веществ в атмосферу автомобильного транспорта г. Челябинска в 2019 г. и выполнены прогнозные оценки валовых выбросов на период до 2030 г. с учетом контрольных цифр развития транспортной системы, содержащихся в стратегических документах развития города и агломерации.

### Методика и результаты оценки

Объем валовых выбросов загрязняющих веществ передвижными источниками (автомобильный транспорт) г. Челябинска на период до 2030 г. определялся в соответствии с методикой ЕМЕП/ЕЕА, которая реализована с использованием компьютерной программы COPERT V (версия 5.4.36) [12]. В этой версии, опубликованной в 2020 г., выполняли расчет валовых выбросов загрязняющих веществ 18 наименований, включая CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, C, SO<sub>2</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> (ЛОС), CH<sub>4</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, формальдегид, бенз(α)пирен, кадмий, никель, бензол, толуол, акролеин, ацетальдегид, 1,3-бутадиен. Также впервые оценены выбросы дисперсных частиц PM<sub>10</sub> и PM<sub>2.5</sub>, образуемых в результате износа шин, дорожного покрытия и тормозов автомобилей.

В качестве исходных данных используют детальные данные условий эксплуатации АТС, их возраст, экологический класс, природно-климатические факторы, которые влияют на удельные (на единицу пробега) выбросы указанных выше загрязняющих веществ отдельных подкатегорий АТС. Прогнозная численность, структура автомобильного парка легковых, грузовых автомобилей и автобусов по экологическому классу, типу энергоустановки (виду используемого топлива) определяли по методике МАДИ [13]. Среднегодовые пробеги АТС разных типов могут приниматься в соответствии с Методическими рекомендациями для судебных экспертов [14]. Однако на основании анализа приводимых в данном документе значений средних годовых пробегов АТС было установлено, что они завышены, поскольку их верификация — расчет на основе суммарного топливопотребления автомобильного парка дает величину, значительно превышающую объемы производства моторных топлив в стране. С учетом изложенного в данном исследовании была использована методика определения среднегодовых пробегов АТС, которая приведена в [15].

Указанные показатели представляют собой необходимый набор исходных показателей для расчетной оценки валовых выбросов загрязняющих веществ автомобильным транспортом г. Челябинска при двух сценариях его развития на период до 2030 г. (базовом и целевом) в случае реализации мероприятий по совершенствованию транспортной системы города и агломерации.

Базовый (трендовый) сценарий исходит из предположений о сохранении существующих тенденций развития транспортного комплекса и некотором повышении эффективности использования парка подвижного состава при осуществлении пассажирских перевозок.

Целевой сценарий характеризуется существенным ужесточением требований к экологичности и энергоэффективности развития автомобильного транспорта в рассматриваемом регионе. В данном сценарии предполагается выработка и ввод в действие механизмов государственного и рыночного регулирования, предусматривающих реализацию нормативных правовых, организационных, инженерно-технических и экономических мероприятий на феде-

ральном и региональном уровнях, которые можно сгруппировать по следующим направлениям:

1) повышение энергоэффективности АТС и транспортных технологий, использующих традиционные виды моторного топлива;

2) диверсификация использования различных источников энергии с меньшим выбросом загрязняющих веществ для всех видов городского транспорта;

3) управление транспортной доступностью и мобильностью.

Для построения долгосрочных прогнозов автомобилизации в части личного автотранспорта традиционно рассматривают показатель обеспеченности населения легковыми автомобилями (на 1000 жителей) [16]. Обычно для описания изменения этого показателя (показателя уровня автомобилизации) используются S-образные кривые, характерные для описания насыщения товарного рынка. Для прогнозирования численности парка АТС и уровня автомобилизации в данной работе для прогнозирования численности парка на период до 2030 г. используется *логистическая модель автомобилизации с пошаговой (итеративной) оценкой численности парка*, которая строится на основе анализа статистических данных о ретроспективной динамике уровня автомобилизации в Российской Федерации и других странах. В этом случае (рис. 2) уровень автомобилизации в Челябинске по целевому сценарию к 2030 году может составить 283 ед. легковых АТС/1000 чел., по базовому (линейная тенденция роста) — 332 АТС/1000 чел.

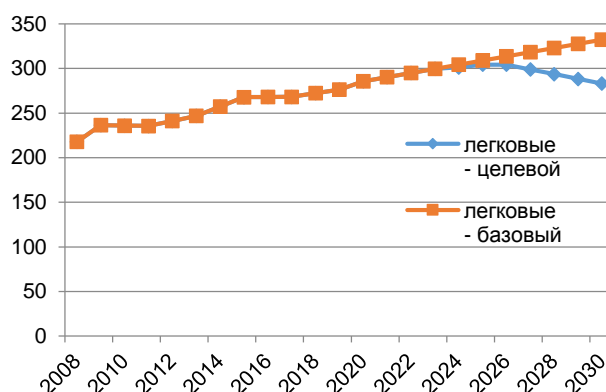


Рис. 2. Прогноз уровня автомобилизации в Челябинске на период до 2030 г. по рассматриваемым сценариям, ед. АТС/1000 чел.

Далее приведены прогнозные оценки общей численности автомобильного парка Челябинска на период до 2030 года по рассматриваемым сценариям (табл. 3).

Прогнозные значения среднегодовых пробегов, а также средних скоростей движения по автомобильным дорогам легковых, грузовых АТС и автобусов определены по элементарным и суммарным показателям использования отдельных видов транспорта в г. Челябинске, полученных в результате расчета по транспортной модели, которые приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 3

Численность автомобильного парка Челябинска до 2030 года, тыс. ед.

Сценарии	2015	2019	2024	2030
Целевой	364,68	381,25	410,71	389,13
Базовый			414,37	448,07

Таблица 4

Фрагмент матрицы интенсивности и скорости передвижения транспорта на отдельных участках УДС г. Челябинска

Длина, км	Количество полос	авт./ч	Скорость движения, км/ч
...	...	...	...
1,516481	2	15,100635	99
0,229702	1	30,672979	63
0,229702	1	206,186763	15
0,640803	1	108,19405	42
...	...	...	...

Таблица 5

Прогноз показателей использования индивидуального, грузового и общественного транспорта в г. Челябинске при реализации разных сценариев (данные ВШЭ, ИргТУ)

Показатели	2019 г.	Маршрутные сети 2024 г.		Маршрутные сети 2030 г.	
		Целевой	Базовый	Целевой	Базовый
Средневзвешенная скорость движения (город), км/ч					
Индивидуальный транспорт	38,97	38,39	38,02	38,47	38,03
Общественный транспорт	23,25	24,6	24,14	24,87	24,49
Суммарные пробеги, км (за час)					
Индивидуальный транспорт	751794	783894	810635	789940	828223
Общественный транспорт	26030	12620	13237	12620	13237
Грузовой транспорт	30954	31026	31116	30196	30271

С учетом приведенных данных транспортного моделирования следует, что прогнозные значения среднегодового пробега одного АТС (автобуса) к 2030 г. может сократиться по сравнению с 2019 г. почти в 2 раза при реализации обоих сценариев. Одна из причин — планируемое развитие рельсового пассажирского транспорта. В то же время среднегодовой пробег легкового и грузового АТС (включая легкий коммерческий транспорт) по территории г. Челябинска существенно не изменится.

В табл. 6 приведены результаты расчета топливопотребления, выбросов парниковых газов и других загрязняющих веществ автомобильным транспортом в базовом году.

Следует отметить, что суммарный валовый выброс загрязняющих веществ автомобильным парком г. Челябинска, отражаемый в [10] на 2019 г., составил 37,5 тыс. т, что на 13,1 тыс. т больше, чем приведено в табл. 6 при расчетах по программе COPERT. Максимальная разница получилась при оценке выбросов  $\text{NH}_3$  — в 5,4 раза, оксидов азота — в 2 раза,  $\text{CO}$  — в 1,54 раза,  $\text{VOC}$  — 1,4 раза. Значения выбросов сажи с отработавшими газами двигателей при расчете по

методике НИИ Атмосферы оказались меньше, чем по программе COPERT в 1,28 раза, а выбросы метана — в 1,2 раза.

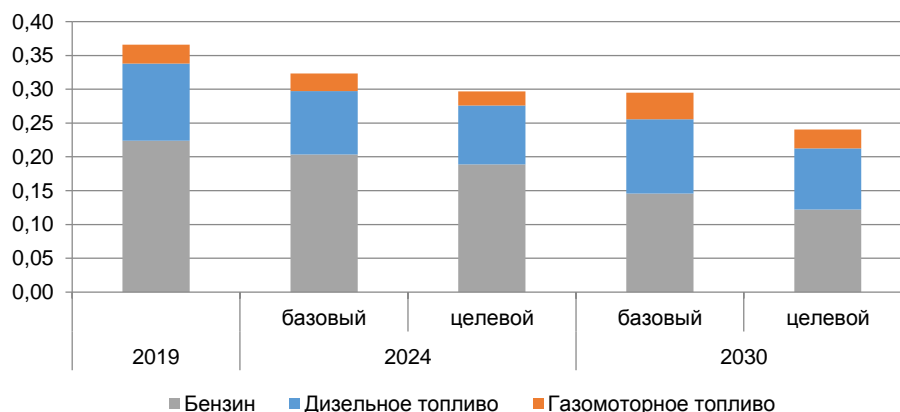
Кроме того, по методике COPERT были впервые произведены оценки валовых выбросов автомобильным транспортом в 2019 г. наиболее чувствительных для г. Челябинска загрязняющих веществ, таких как бенз(а)пирен, формальдегид, бензол, ацетальдегид, а также акролеин, толуол, ксилол, 1,3-бутадиен и металлы кадмий и никель, а также мелкодисперсные частицы размером менее 10 мкм и менее 2,5 мкм. Как следует из таблицы 6 их общая масса составила в 2019 г. 436,5 т, в том числе формальдегида 65,5 т и бенз(а)пирена около 2 т. Выбросы мелкодисперсных частиц от сгорания топлива в ДВС автомобилей, износа шин, дорожного покрытия, тормозов составили в 2019 году:  $\text{PM}_{10}$  — 364,8 т,  $\text{PM}_{2.5}$  — 220,2 т.

Результаты прогноза объемов потребления разных видов топлива автомобильным транспортом г. Челябинска на период до 2030 года с учетом приведенных выше прогнозных оценок удельных выбросов, структуры и численности автомобильного парка по базовому и целевому сценарию приведены на рис. 3.

Таблица 6

**Валовые выбросы загрязняющих веществ автомобильным транспортом г. Челябинска в базовом году (2019), т/год**

Загрязняющие вещества	Масса выбросов	Загрязняющие вещества	Масса выбросов
$\text{CO}$	17567	Формальдегид	65,5
Сажа	285,1	Бенз(а)пирен	0,00196
$\text{NO}_x$	2994,9	Кадмий	0,00078
$\text{CH}$ ( $\text{VOC}$ )	2307,9	Никель	0,00078
$\text{CO}_2$	1 153 220,0	Бензол	84,1
$\text{NH}_3$	78,4	Акролеин	11,3
$\text{CH}_4$	244,6	Толуол	167,4
$\text{N}_2\text{O}$	53,6	Ксилол	46,8
$\text{PM}_{10}$ с отработавшими газами	214,3	Ацетальдегид	31,9
$\text{PM}_{10}$ износ шин	40,7	1,3-бутадиен	29,5
$\text{PM}_{10}$ износ дорожного покрытия	42,4	ВСЕГО	436,504
$\text{PM}_{10}$ износ тормозов	67,4		
$\text{PM}_{2.5}$ с отработавшими газами	142		
$\text{PM}_{2.5}$ износ шин	28,5		
$\text{PM}_{2.5}$ износ дорожного покрытия	22,9		
$\text{PM}_{2.5}$ износ тормозов	26,8		
ВСЕГО (без $\text{CO}_2$ )	24116,5		



**Рис. 3. Прогноз объемов потребления разных видов топлива парком АТС Челябинска по разным сценариям до 2030 г., млн т**

Снижение топливопотребления дает схожую динамику прогноза валовых выбросов CO<sub>2</sub> передвижными источниками автомобильного транспорта при сжигании жидкого и газообразного моторного топлива на период до 2030 г. (табл. 7). Валовые выбросы CO<sub>2</sub> автомобильным транспортом в результате запланированных мероприятий могут заметно снизиться к 2030 г. Представленные в таблицах 8 и 9 расчетные результаты показывают изменение массы выбросов основных видов загрязняющих веществ по базовому и целевому сценариям.

Следует, что в результате реализации запланированных мероприятий по базовому и целевому сценариям валовые выбросы наиболее массовых загрязняющих веществ (кроме выбросов ПГ) автомобильным транспортом в г. Челябинске по некоторым —

веществам могут к 2030 г. возрасти, а по некоторым снизиться по сравнению с 2019 г.

Так, существенное снижение ожидается по выбросам CO — с 17,6 до 12,8 тыс. т и 8,4 тыс. т по базовому и целевому сценариям соответственно. То же наблюдается по летучим органическим соединениям (VOC), NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O. Но по саже по обоим сценариям по сравнению с 2019 г. ожидается увеличение выбросов с отработавшими газами из-за роста парка дизельных легковых автомобилей. Динамика изменения массы мелкодисперсных частиц PM<sub>10</sub> и PM<sub>2,5</sub> в результате износа шин, дорожного покрытия и тормозных механизмов предполагает примерное сохранение значений в 2030 г. по сравнению с 2019 г. при реализации базового сценария и некоторое снижение при реализации целевого сценария.

Таблица 7

**Прогнозные оценки выбросов парниковых газов  
парком АТС Челябинска по двум сценариям, тыс. т CO<sub>2</sub>**

Сценарии	2019	2024	2030
Базовый	1153,22	986,69	921,05
Целевой		903,12	774,79

Таблица 8

**Прогноз валовых выбросов загрязняющих веществ автомобильным парком АТС г. Челябинска  
на период до 2030 года, т/г.**

Сценарии	Год	Загрязняющие вещества с отработавшими газами									
		CO	Сажа	NO <sub>x</sub>	CH (VOC)	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>	NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	Всего
	2019	17567,0	285,1	2994,9	2307,9	214,3	142,0	78,4	244,6	53,6	23887,7
Базовый	2024	16865,0	286,9	2519,0	2291,7	216,3	144,4	75,3	219,5	39,3	22657,4
Целевой		13340,8	275,6	1708,9	1852,8	205,3	133,9	66,6	188,3	35,1	17807,3
Базовый	2030	12776,8	310,3	2080,2	1813,5	239,7	167,9	75,3	247,3	50,2	17761,0
Целевой		8419,4	285,3	1522,3	1274,2	218,5	150,7	44,2	190,6	45,3	12150,5

Таблица 9

**Прогноз валовых выбросов неметановых углеводородов и тяжелых металлов  
автомобильным парком АТС г. Челябинска на период до 2030 года, т/г.**

		Сценарий			
		базовый	целевой	базовый	целевой
		Год			
		2019	2024	2030	
Формальдегид	65,5	63,4	55,3	49,1	41,1
Бенз(а)пирен	0,00196	0,00213	0,00211	0,00276	0,00273
Кадмий	0,00078	0,00077	0,00077	0,00077	0,00072
Никель	0,00078	0,00077	0,00077	0,00077	0,00072
Бензол	84,1	84,9	62,0	63,3	38,2
Акролеин	11,3	11,1	10,2	9,1	8,2
Толуол	167,4	169,4	124,6	125,8	75,6
Ксилол	46,8	43,5	30,6	30,9	18,8
Ацетальдеид	31,9	31,3	28,2	24,6	21,2
1,3-бутадиен	29,5	28,0	23,3	20,0	15,5

### Заключение

Оценка уровня прогнозного воздействия автомобильного транспорта г. Челябинска показывает, что суммарные выбросы загрязняющих веществ (кроме CO<sub>2</sub>) автомобильным транспортом г. Челябинска при реализации базового сценария и соответствующих программных мероприятий по совершенствованию развития транспортной системы к 2030 г. по сравнению с 2019 г. могут сократиться с 224,4 до 163,9 тыс. т (в 1,36 раза), при реализации целевого сценария — до 109,4 тыс. т (в 2,05 раза).

Для обоих сценариев прогнозируется уменьшение потребления моторного топлива. Впервые установлено, что выбросы CO<sub>2</sub> автомобильным транспортом в базовом году составили 1153,22 тыс. т. При реализации базового сценария ожидается в 2030 г. снижение выбросов ПГ автомобильным транспортом на 20 % (до 921,1 тыс. т). Для целевого сценария снижение выбросов CO<sub>2</sub> ожидается еще больше — на 32,8 % (до 774,8 млн т).

Основным мероприятием, которое позволит добиться снижения выбросов, является опережающее развитие общественного транспорта, включая скоростной трамвай, использование альтернативных видов топлива и энергии, вытеснение из парка автомобилей низких экологических классов, развитие велосипедного движения и средств малой мобильности, а также дальнейшее развитие дорожно-мостового строительства и совершенствование организации дорожного движения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный доклад "О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gosdoklad-ecology.ru/2018/atmosfernyy-vozdukh/kachestvo-atmosfernogo-vozdukh/section.pdf> (дата обращения: 28.01.2021).
2. Государственный доклад "О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году" (проект).

3. Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2019 году. — Челябинск, 2020. — 252 с.
4. Комплексный доклад "Итоги социально-экономического развития города Челябинска за 2019 год". Март 2020. — 82 с.
5. Прогноз социально-экономического развития города Челябинска на 2019 год и на плановый период 2020 и 2021 годов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://storage.strategy24.ru/files/strategy/201909/1dd4130d5858f97464db96118862f78e.pdf>.
6. Муниципальная программа "Повышение безопасности дорожного движения", утвержденной распоряжением Администрации города Челябинска от 29.01.2019 № 700.
7. Материалы проекта World Air Quality Index [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://aqicn.org/map/world/ru/> (данные по г. Челябинску).
8. Национальный экологический рейтинг. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://greenpatrol.ru/ru/regiony/chelyabinskaya-oblast/> (Данные по Челябинской области).
9. Данные Челябинскстата. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.gks.ru/scripts/db\\_inet2/passport/munr.aspx?base=munst75](http://www.gks.ru/scripts/db_inet2/passport/munr.aspx?base=munst75).
10. Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов. — СПб.: НИИ Атмосфера, 2010.
11. Статистическая отчетность 2-ТП (воздух) за 2019 год. Росприроднадзор [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rpn.gov.ru/activity/reports-receiving/air/> (дата обращения: 28.01.2021).
12. COPERT Versions. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.emisia.com/utilities/copert/versions/> (дата обращения: 26.02.2020).
13. Трофименко Ю. В., Комков В. И., Григорьева Т. Ю. Прогноз численности и структуры автомобильного парка Российской Федерации по экологическому классу, типу энергоустановок, виду топлива на период до 2030 года. Сб. Урбозкология. Экологические риски урбанизированных территорий. Научный симпозиум. Самарский научный центр РАН, Самарский государственный технический университет. 2017. С. 196—212.
14. Исследование автотранспортных средств в целях определения стоимости восстановительного ремонта и оценки. Методические рекомендации для судебных экспертов (утв. Минюстом России, 2013) (ред. от 22.01.2015). — 150 с.
15. Трофименко Ю. В., Гинзбург В. А., Комков В. И., Лытов В. М. Влияние структуры парка автотранспортных средств по виду топлива и экологическому классу на выбросы парниковых газов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2018. Т. 15. № 6(64). С. 898—910.
16. Ксенофонов М. Ю., Миликин С. Р. Перспективы автомобилизации в Евросоюзе и Китае при различных сценариях распространения беспилотных совместно используемых автомобилей // ЭКО. 2018. № 9. С. 85—107.

## Assessment of the level of negative impact of road transport in Chelyabinsk on the environment and public health for the period up to 2030

Yu. V. TROFIMENKO, V. I. KOMKOV

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

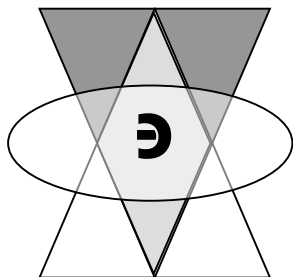
*Using predictive estimates of the number, structure, eco-class, engine type, as well as the characteristics of vehicle movement, a rated model (implemented in the COPERT V program) and the results of assessing the level of negative impact of the road transport complex in Chelyabinsk under two scenarios (baseline and target) in case of implementation measures to improve the city's transport system. It was found that by 2030, compared to 2019, both emissions of pollutants (up to 2.05 times) can be reduced if the target scenario is implemented, and consumption of motor fuel and greenhouse gas emissions (from 20 to 32.8 %).*

**Keywords:** road transport, emissions of pollutants, estimates, COPERT program.

**Bibliography** — 16 references.

*Received March 18, 2022*





## Современные технологии для очистки воздуха

УДК 697.921.47  
DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_2\_43  
EDN: FXRCVH

### Определение производительности фильтров для обеззараживания вентилируемого воздуха резервуаров систем ВиВ

А. А. ЕРХОВ, канд. техн. наук

Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе,  
Москва, Россия

Е. А. КОРОЛЁВА, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный  
строительный университет» (НИУ МГСУ), Москва, Россия

*Проведено исследование фильтров систем обменной приточно-вытяжной вентиляции, основными элементами которых являются: сорбент, пылевой фильтр, озонатор и система обогрева. Установлено, что фильтр должен соответствовать размеру ёмкости как для безопасной эксплуатации резервуара и оборудования, так и для качественной стерилизации воздуха. Рассмотрена производительность воздухопроводов системы вентиляции, и дана оценка концентрации озона и производительности озонатора от расхода воздуха.*

**Ключевые слова:** резервуар, водоснабжение, канализация, вентиляция, фильтр, озонирование.

Очистка воздуха востребована в производственных цехах и помещениях, где в ходе технологического процесса происходит выделение вредных газообразных и пылевых частиц [1]. Произведённая продукция далее поступает в магазины, перераспределяется по жилым и общественным зданиям, и окружает людей, продолжая выделять газ в меньшей концентрации, но на протяжении долгого времени, поэтому в установках очистки воздуха применяют современные технологии: сорбционную, озонокаталитическую, термокаталитическую, плазмокаталитическую, сорбционно-плазмо-каталитическую, биологическую. В последнее время всё шире стали внедрять и технологии, использующие естественные процессы очистки атмосферного воздуха — озонаторы и ионизаторы, встраиваемые в воздухопроводы контура общеобменной приточно-вытяжной вентиляции. Озонато-

ры нашли широкое применение не столько по причине конструктивной простоты, сколько из-за эффективности: озон — сильный окислитель с окислительно-восстановительным потенциалом +2,07 В, поэтому его применяют как реагент при водоподготовке в химических реакциях разложения веществ. Он также эффективен как стерилизатор, при этом имеющий преимущества перед другими средствами обеззараживания (хлором, хлорамином, двуокисью хлора, УФ). Эффективность воздействия озона на бактерии показана в табл. 1 [2].

Таблица 1

Результаты действия озона на бактерии

Тип бактерий	Концентрация, мг/л	Время, мин	Гибель, %
Bacillus sp.	0,2	0,5	99
Bacillus subtilis	0,1	33	90
Clavibacter michiganense	1,1	5	99
Escherichia coli (из фекалий)	0,2	0,5	99
Escherichia coli (из чистой воды)	0,25	2	99
Escherichia coli (из грязной воды)	2,2	19	99
Salmonella sp., Pseudomonas sp., Vibrio cholera	0,05	0,5	99
Staphylococcus sp.	2,2	0,5	99
Streptococcus sp.	0,2	0,5	99
Deinococcus radiodurans	—	—	0

**Ерхов Александр Александрович**, доцент кафедры "Строительства систем и сооружений водоснабжения и водоотведения".  
E-mail: a-erhov@yandex.ru

**Королёва Екатерина Александровна**, учебный мастер кафедры "Водоснабжение и водоотведение".  
E-mail: KorolevaEA@mgsu.ru

Статья поступила в редакцию 24 апреля 2022 г.

© Ерхов А. А., Королёва Е. А., 2022

Вирусы более чувствительны к озону, чем бактерии, и степень восприимчивости определяется наличием липидной оболочки — с оболочкой менее устойчивы, чем без неё; коронавирус не стойкий, но для его подавления требуются высокие концентрации газа. Некоторые вирусы, как и некоторые бактерии, являются "симбионтными", защитными для организма — озон бьёт всех без разбору.

Очистка воздуха от вредных газообразных веществ, пыли и микроорганизмов необходима и для накопительных резервуаров питьевой и технической воды. При этом, при выборе вентиляционного фильтра надо учитывать такие факторы, как нормативные требования, эксплуатационные особенности, размер фильтра, конструкцию корпуса и воздуховода, отвод конденсата.

Внедрение передовых технологий работы вентиляционных фильтров поможет избежать распространённых проблем при монтаже, проверке целостности и при эксплуатации, то есть в процессе всего жизненного цикла фильтров.

### Материалы и методы

Фильтр в системе обменной приточно-вытяжной вентиляции должен быть установлен на вентиляционной трубе (рис. 1).

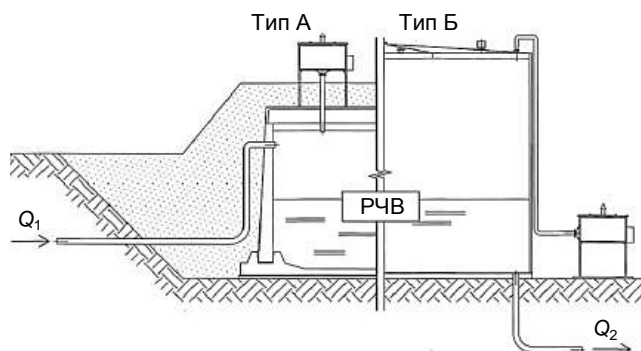


Рис. 1. Схема размещения фильтра:  
А — на ФП резервуара; Б — на отметке земли

Элементами очистителя являются: сорбент (поглощает вредные газообразные вещества); пылевой фильтр; озонатор (генерирует озон для подавления микрофлоры не только внутри очистителя, но и в резервуара, его применение позволяет производить каталитические реакции и на поверхности сорбента, регенерируя его, и тем самым увеличивая сорбционную ёмкость); система автоматического обогрева сорбента [3].

В нижней части фильтра, под слоем гранулированного сорбента, должен располагаться генератор озона (рис. 2), работающий в режиме непрерывной подачи озона, что позволяет насыщенному воздуху стерилизовать внутреннее пространство резервуара, его стенки и поверхность вентиляционной трубы. Кроме того, идёт постоянное подавление микрофлоры сорбента. Фильтры-поглощатели применяют при строительстве новых резервуаров воды, их внедряют как в РФ, так и за рубежом.

Для работы биофильтров необходим влажный воздух температурой 15—40 °С. Преимуществами

микробиологического метода являются: отсутствие электронных схем и работа без источника энергии; высокая степень очистки — 90—98 %; работа при взрывоопасных концентрациях газов.

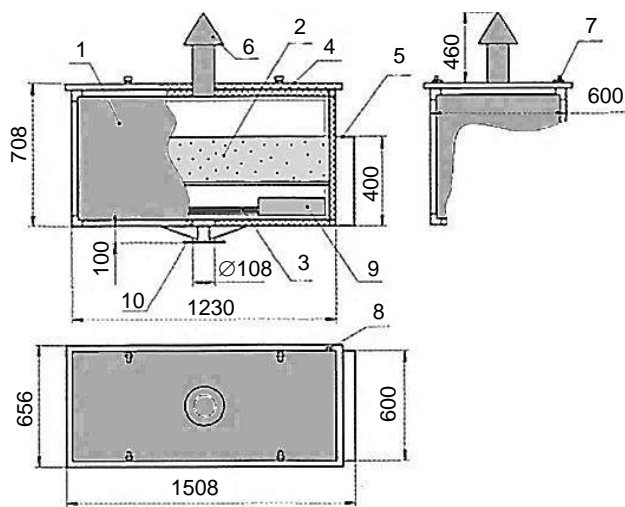


Рис. 2. Система очистки воздуха водонакопительного резервуара:

- 1 — корпус фильтра-поглощителя; 2 — сорбент; 3 — тэн;  
4 — верхняя крышка; 5 — электрошкаф 0,5 кВт; 6 — рефлектор;  
7 — крепёжный элемент; 8 — заземление; 9 — озонатор;  
10 — фланец присоединительный

Очиститель паровоздушных смесей (ОПВС) предназначен для очистки воздуха от сероводорода, меркаптанов, аммиака, ароматических углеводородов и др. (рис. 3, 4).

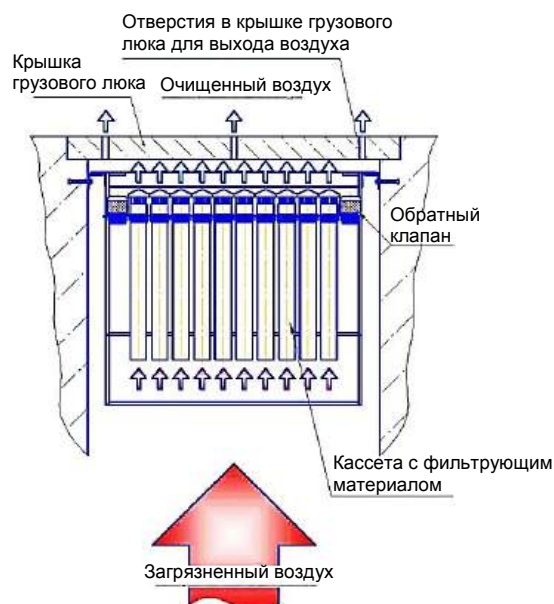
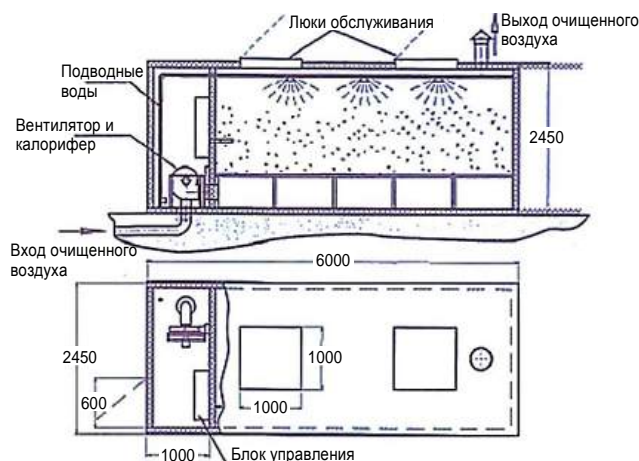


Рис. 3. Биофильтр ОПВС кассетного типа  
(устанавливают под крышкой люков шахт, колодцев)

Технические характеристики:

Производительность	10—1000 м³/ч
Энергопотребление	отсутствует
Влажность воздуха	60—100 %
Качество очистки	80—95 %
Срок службы биомассы	1—3 года
Исполнение	антикоррозийное



**Рис. 4. Биофильтр ОПВС модульного типа (устанавливают у источника выбросов на открытом воздухе)**

Технические характеристики:

Производительность	до 10000 м³/ч
Влажность воздуха	60—100 %
Качество очистки	90—98 %
Срок службы биомассы	1—3 года
Исполнение	антикоррозийное

Технология испытана и применяется для канализационных шахт. Такие очистители устанавливают под крышкой люков шахт, колодцев; прост в эксплуатации, не требует частого технического обслуживания, которое определяется степенью загрязнённости воздуха. Установки работают более 5 лет в шахтах Главного канализационного коллектора Санкт-Петербурга, более 3 лет на объектах водоканала г. Ростов-на-Дону, Щёлково и Солнечногорске Московской области на предприятиях по производству животных кормов, в Липецкой обл. на предприятии по производству опарышей. Безкорпусные модификации применяют в силосных ямах, и это сказывается на стоимости кормов.

Биофильтр может работать в бескислородной среде и при взрывоопасных концентрациях метана, не требует постоянного обслуживания, использование кассет позволяет быстро производить замену биомассы. Для нейтрализации малых локальных источников выбросов можно использовать кассету без корпуса.

Сорбционно-плазмо-каталитическая (СТОПКР) технология основана на образовании озона при высоковольтных разрядах в воздухе и проведении химических реакций на сорбенте-катализаторе, что позволяет одновременно разлагать загрязнители воздуха и улавливать устойчивые вещества (рис. 5); фильтр удаляет дурнопахнущие газы канализационно-насосных станций, расположенных вблизи жилых домов, — технология прошла испытания, и эффективность очистки от серосодержащих веществ более 98 %.



**Рис. 5. Очиститель воздуха СТОПКР устанавливается рядом с источником выбросов в отапливаемом помещении, возможно уличное исполнение**

Технические характеристики:

Производительность по воздуху модуль	до 50000 м³/ч
Влажность воздуха	до 100 %
Степень очистки	90—98 %
Энергопотребление	1-3 Вт·м³
Исполнение	антикоррозийное

## Результаты

Резервуары для хранения воды или сточной жидкости требуют подбора фильтра для вентиляционной системы, поскольку он должен быть надёжным барьером между содержимым резервуара и окружающей средой (рис. 6).



**Рис. 6. Вентиляционный фильтр защиты содержимого резервуара**

Фильтр должен обеспечивать:

- защиту содержимого резервуара от содержащихся в воздухе окружающей среды микроорганизмов, химических и минеральных загрязнителей, ухудшающих качество воды;
- защиту окружающей среды от попадания агрессивных веществ содержимого резервуара;
- поддержание равновесного давления внутри резервуаров.

Помимо описанных требований фильтр вентиляции должен быть гидрофобным — намокший препятствует потоку воздуха в резервуар и из него.

Фильтр должен соответствовать размеру ёмкости, чтобы избежать повреждения резервуара. Вода заполняет резервуар на регулярной основе, и по мере заполнения воздух вытесняется из ёмкости [4]; когда опорожняются резервуары воздух окружающей среды всасывается обратно. Фильтры должны иметь такие размеры, чтобы поток воздуха беспрепятственно следовал в прямом или обратном направлении, не нарушая равновесия давления сред внутренней/внешней. И в этом размер фильтра должен соответствовать подаче насоса и сбрасываемому расходу. Размер важен и для стерилизации.



Для определения размера стационарного вентиляционного фильтра необходимо следовать алгоритму:

1. Определить максимальную скорость технологического потока в системе вентиляции, которая будет зависеть не столько от атмосферного давления, сколько от резкого изменения давления внутри резервуара.

2. Найти максимальный перепад давления, действующий на фильтр, — падение составляет обычно менее 35 кПа и зависит от номинального для резервуара; важно избегать возникновения большого вакуумметрического давления в резервуаре, способного его разрушить.

3. Рассчитать площадь и количество фильтров, удовлетворяющих расходу и перепаду давления.

4. Выбрать соответствующую конструкцию фильтра.

5. Проверить стенки резервуара на нагрузки, чтобы гарантировать их прочность с запасом ~1,5х.

Для предотвращения повреждения самого фильтра необходимо придерживаться простых правил:

- избегать частых и постоянных скачков давления на фильтре;
- минимизировать амплитуду давления на фильтре;
- удалять конденсат через слив, а не через сам фильтр;
- стерилизация не должна разрушать сорбент.

### Оценка вентиляции на пропуск воздуха

Сопротивление движению воздуха в системе вентиляции определяется скоростью потока и конструкцией фильтра — потерями местными и по длине. При этом сопротивление растёт прямо пропорционально скорости. Аэродинамические потери сопротивления движению возникают при трении воздуха о стенки, и

определяются снижением давления, поэтому чем больше стенок и преград в вентиляционной системе, тем меньше воздушный поток. Потери на трение в воздуховодах, а также сопротивление сетевого оборудования (фильтров, шумоглушителей, нагревателей, клапанов и заслонок) можно определить по таблицам и схемам, прилагаемым к оборудованию. Полная потеря складывается из слагаемых.

По заданной производительности вентиляции может оказаться необходимым установление нескольких фильтров, но требования к герметичности резервуара обяжут иметь одно отверстие с коллектором и системой разветвляющихся воздуховодов, основные параметры которых можно установить, руководствуясь данными табл. 2 и формулой

$$V = \frac{Q}{3600 \cdot S},$$

где  $Q$  — подача воздуха, м<sup>3</sup>/ч;

$S$  — сечение воздуховода, м<sup>2</sup>.

Таблица 2

Рекомендуемая скорость движения воздуха внутри воздуховодов

Тип воздуховодов	Скорость воздуха, м/с
Магистральные	6,0—8,0
Боковые ответвления	4,0—5,0
Воздуховоды мелкие	1,5—2,0
Вытяжные решетки	1,5—3,0

Потерю давления в системе воздуховодов можно уменьшить за счёт большего сечения, что даст относительно равномерную скорость и меньшую турбулентность. На рис. 7 показано как обеспечить относительно равномерное движение с минимальными потерями.

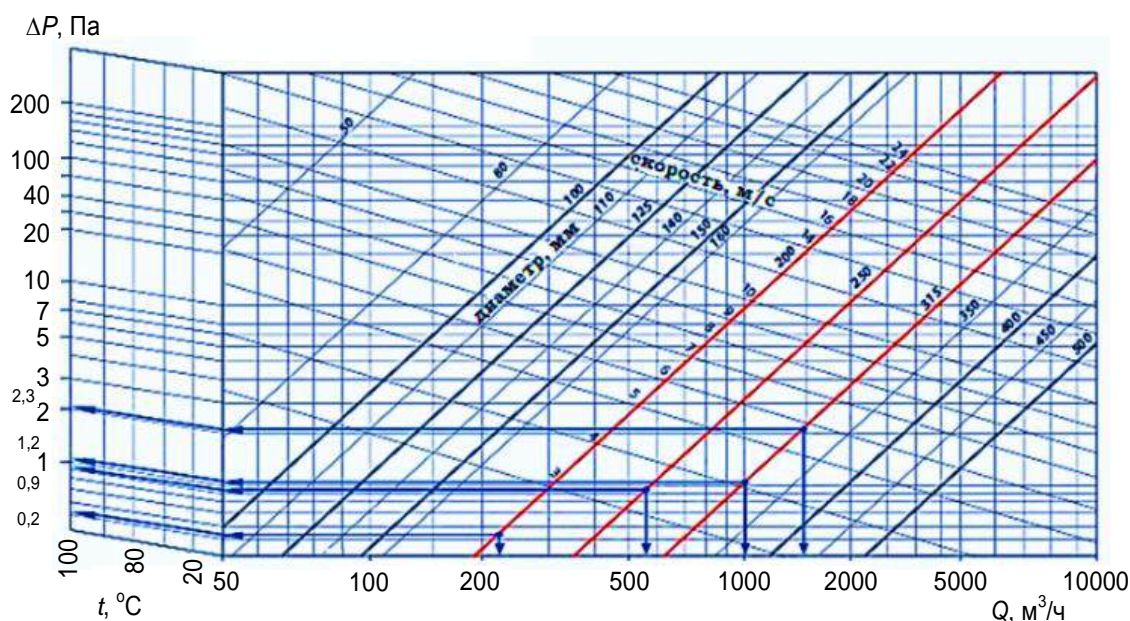


Рис. 7. Номограмма потерь в воздуховодах для расчёта вентиляции

### Оценка производительности на обеззараживание

Применение озона — метод простой, надёжный и эффективный, оборудование дёшево, технология не требует реагентов [5—10]; незначительные денежные расходы на техническое обслуживание и электроэнергию долгосрочные. При выборе озонатора надо исходить из общего расхода воздуха, и раз озон не хранится, его производят по мере использования, а, следовательно, рассчитывают на пиковые, а не средние расходы. Озон является эффективным дезинфицирующим средством, поэтому требуется минимальное время контакта, а, значит, оборудование компактно; озон неселективно уничтожает все патогены (табл. 1), при этом они не способны к адаптации, а остаточного озона в воде из-за быстрой разлагаемости не наблюдают. При использовании озона для обеззараживания воды одновременно реализуют такие преимущества как удаление взвешенных частиц коагуляцией, умягчение, улучшение вкуса и запаха.

С ростом расхода воздуха через фильтр концентрация производимого озонатором озона падает, поэтому производительность озонатора должна расти. Например, рис. 8, откуда концентрация в % от производительности в г/ч линейна  $C = 7,3 - 0,4G$ .

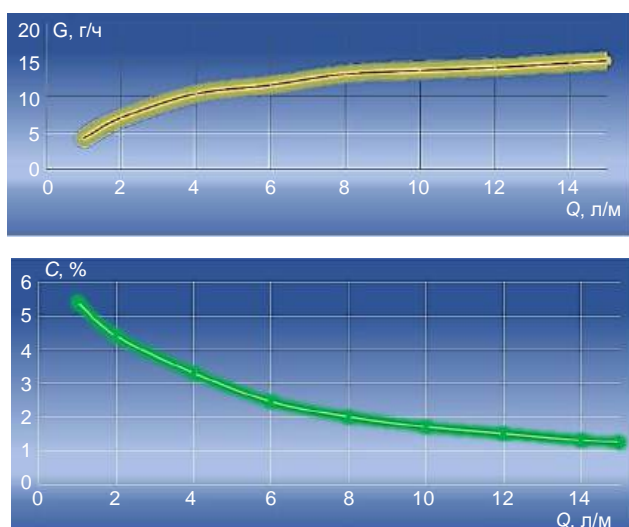


Рис. 8. Характеристики производительности озонатора и концентрации  $O_3$  от расхода воздуха

### Заключение

Предотвращение заражения воды в резервуарах агентами инфицирования (болезнетворными и условно патогенными микроорганизмами) должно

носить профилактический характер, для чего следует применять фильтры с системами обеззараживания; для предупреждения попадания микробов и вирусов из сточной жидкости в атмосферный воздух также должны применяться обеззараживающие фильтры — озонаторы. Фильтр — первичный фильтрующий барьер для снижения концентрации и объёма микроорганизмов, химических веществ и минеральных частиц, входящих/выходящих из резервуара через систему вентиляции. Вне зависимости от количественного и качественного состава система фильтрации должна блокировать клетки, молекулы, частицы, и пропускать только атмосферный воздух. Фильтр должен быть прост и надёжен, работать, практически не нуждаясь в обслуживании.

Существуют фильтры разных размеров, и они должны соответствовать потокам — резервуарам, на которых их монтируют. Для больших ёмкостей может потребоваться несколько фильтров, соединённых через общий коллектор, для обеспечения требуемого расхода.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ерхов А. А., Королёва Е. А. Микробиологический анализ воздуха в процессе эксплуатации инженерных систем и санация трубопроводов. Яковлевские чтения: сб. XVI Межд. научно-техн. конф. — М.: Изд. МИСИ, 2021. С. 92—113.
2. Мосин О. В. Технологический расчет озонаторов барьерного типа // Сантехника Отопление Кондиционирование С.О.К. 2015. № 2. С. 20—26.
3. ООО "Воздухоочистка". Очистка воздуха и газоочистка. Промышленные и бытовые очистители воздуха. Озонаторы. Фильтры-поглотители. С-Пб, 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.air-cleaning.ru>.
4. СП 30.13330.2020 "СНИП 2.04.01-85\* Внутренний водопровод и канализация зданий" (утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 30 декабря 2020 г. № 920/пр).
5. Ерхов А. А., Королёва Е. А. Гидробиологический контроль на станциях водоподготовки и сточных вод. IX Межд. науч. конф. — М.: РГГРУ, 2020. С. 355—358.
6. Ерхов А. А., Королёва Е. А. Обеззараживание воды на крупных водопроводных станциях. XIII Межд. научно-практ. конф. "Новые идеи в науках о Земле", 5–7 апреля 2017 г. Т. 2. — М.: МГРИ-РГГРУ, 2017. С. 190—191.
7. Ерхов А. А. Обзор патогенов питьевой воды для обоснования санитарно-гигиенических мероприятий. XIV Межд. научно-практ. конф. — М.: РГГРУ, 2019. Т. 3. С. 466—470.
8. Ерхов А. А. Качество питьевой воды в аспекте кишечных инфекционных микробных патологий и микробиоты в целом. Яковлевские чтения: сб. докладов XIV Межд. научно-техн. конф. — М.: Изд. МГСУ, 2019. С. 45—53.
9. Черемисинов А. Ю. Строительство и эксплуатация систем сельскохозяйственного водоснабжения и водоотведения. — Воронеж: ВГАУ, 2015. — 241 с.
10. Водоподготовка: Справ. / под ред. С. Е. Беликова. — М.: Аква-Терм, 2007. — 240 с.

## Determination of capacity of filters for decontamination of ventilated air of water supply system tanks and water disposal

A. A. ERKHOV

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting,  
Moscow, Russia

E. A. KOROLEVA

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),  
Moscow, Russia

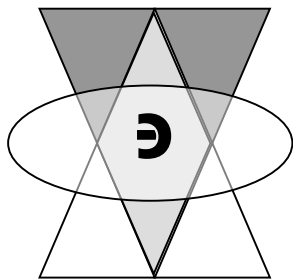
*The filters of the exchange plenum-exhaust ventilation systems were studied, the main elements of which are: sorbent, dust filter, ozonizer and heating system. It was established that the filter should correspond to the size of the tank, both for the safe operation of the tank and equipment, and for high-quality air sterilization — the performance of the air ducts of the ventilation system was considered and an assessment of the ozone concentration and the capacity of the ozonizer from the air flow rate was given.*

**Keywords:** reservoir, water supply, sewerage, ventilation, filter, ozonation.

**Bibliography** — 10 references.

*Received April 24, 2022*





# Очистка промышленных газовых выбросов

УДК 621.436

DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_2\_49

EDN: GEHDFE

## Экономическая оценка экологических показателей газодизельного трактора

**Е. В. ОВЧИННИКОВ; С. Ю. УЮТОВ; М. Е. ЧАПЛЫГИН**, канд. техн. наук  
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

*Представлено экономическое сравнение использования дизельного и газодизельного топлива на основе сжиженного углеводородного газа по экологическим показателям на примере трактора МТЗ 320.4. По результатам расчетов определено, что использование газодизельного топлива сокращает затраты на топливо при выполнении технологических операций, а также снижает негативное воздействие на окружающую среду, тем самым уменьшает плату за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ более чем в два раза.*

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, сжиженный углеводородный газ, экология, экономика, негативное воздействие.

В настоящее время в мире идет тенденция на снижение негативного воздействия от выхлопных газов транспортно-технологических средств [1—3]. Оценка причиняемого природе ущерба носит весьма приблизительный характер, однако однозначно можно утверждать, что необходимо снижать вредные выбросы в атмосферу. Одним из таких способов является переход на альтернативные виды топлива [4—7]. В 2019 г. был принят закон об эксперименте по квотированию вредных выбросов, который должен проводиться с 1 января 2020 г. по 31 декабря 2024 г. в промышленных центрах, включенных в федеральный проект "Чистый воздух". В рамках проекта предприятия обязаны были разработать планы мероприятий по достижению установленных Росприроднадзором квот выбросов и согласовывать их с Минприроды России [8].

Основные усилия региональных властей в рамках проекта "Чистый воздух" направлены на перевод об-

щественного транспорта на газомоторное топливо, модернизацию объектов теплоэнергетики и озеленение территорий для создания "природного щита" от вредных выбросов [8].

Наиболее эффективный способ — это использование сжиженного углеводородного газа (СУГ). Этот вид топлива предпочтителен тем, что его достаточно просто и безопасно использовать, к примеру, объем бака немногим больше традиционного, стоимость в полтора раза ниже классических углеводородных топлив, таких как бензин или дизельное топливо (ДТ), а также доступность заправочных станций, в отличие от метановых. Однако использование пропана в дизельном двигателе возможно только в газодизельном режиме с запальной дозой, т. е. двухтопливная система.

Температура самовоспламенения пропана и нормального бутана в воздухе составляет 470 и 405 °С соответственно. Таким образом, использование паровоздушного СУГ не представляется возможным из-за относительно низкой температуры в камере сгорания в двигателях, работающих от сжатия, так как при сжатии для воспламенения в дизельном двигателе не достигается нужная температура для воспламенения топливной смеси. Однако при частичной подаче дизельного топлива — запальной дозы, происходит контролируемое горение смеси дизельного топлива и СУГ.

---

**Овчинников Евгений Валентинович**, научный сотрудник.

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

**Уютлов Сергей Юрьевич**, младший научный сотрудник.

E-mail: s\_uytov@mail.ru

**Чаплыгин Михаил Евгеньевич**, старший научный сотрудник.

E-mail: misha2728@yandex.ru

---

Статья поступила в редакцию 5 апреля 2022 г.

© Овчинников Е. В., Уютлов С. Ю., Чаплыгин М. Е., 2022

### Экономическая часть

Расчет экономической эффективности произведен на примере трактора МТЗ 320.4, использующего дизельное и газодизельное топливо, оснащенного трехцилиндровым двигателем "LOMBARDINI"/MM3-3LD с системой адаптации для работы на СУГ в газодизельном режиме (рисунок). Максимальная мощность МТЗ 320.4 составляет 27 кВт, номинальная — 25 кВт, эксплуатационная — 22,5 кВт.



Трактор МТЗ 320.4 с системой адаптации для работы на СУГ в газодизельном режиме

Принятая стоимость дизельного топлива на заправочных станциях составляет 64 руб./кг. Стоимость пропан—бутановой смеси на заправочных комплексах составляет 42 руб./кг. При использовании газомоторного топлива в газодизельном варианте процент замещения составляет 85 % при работе до 80 % мощности двигателя. Для расчета авторами предложен коэффициент замещения дизельного топлива сжиженным углеводородным газом  $\partial$ , который рассчитывают следующим образом:

$$\partial = \frac{Q_{\text{ДТ}}}{Q_{\text{СУГ}}} = \frac{42,9}{46,5} = 0,92, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{ДТ}}$  — теплотворная способность ДТ, Мдж/кг;  
 $Q_{\text{СУГ}}$  — теплотворная способность СУГ / жидкая фаза, Мдж/кг.

Таким образом, для замещения 1 кг ДТ необходимо 0,92 кг СУГ.

Произведем расчет стоимости замещения сжиженным углеводородным газом одного кг ДТ по следующей формуле:

$$V_{\text{СУГ}} \cdot \partial = 42 \cdot 0,92 = 38,64 \text{ руб.}, \quad (2)$$

где  $V_{\text{СУГ}}$  — стоимость 1 кг СУГ.

Также стоит отметить, что по результатам стендовых испытаний при использовании СУГ происходит повышение уровня мощности на 10 %. Таким образом, при прочих равных получается, что затраты на топливо при выполнении различных операций на тракторе, работающем в газодизельном режиме, в

сравнении с дизельным исполнением рассчитывают по формуле:

$$G_{\text{ДТ}} = 0,15 \cdot G_{\text{ДТ}} + 0,85 \cdot G_{\text{СУГ}} \cdot 0,9 \cdot N, \quad (3)$$

где  $G_{\text{ДТ}}$  — расход дизельного топлива;

$G_{\text{СУГ}}$  — расход СУГ;

$N$  — мощность двигателя, 0,9 (90% мощности относительно использования СУГ).

Учитывая, что режим работы свыше 80 % мощности занимает не более 10 % времени и расход топлива ДТ составляет 25 % и СУГ соответственно 75 %, введем поправочный коэффициент 1,1. Таким образом формула будет иметь следующий вид:

$$G_{\text{ДТ}} = (0,15 \cdot G_{\text{ДТ}} + 0,85 \cdot G_{\text{СУГ}} \cdot 0,9 \cdot N) \cdot 1,1. \quad (4)$$

Для подсчета удельного расхода топлива в руб./л, используем следующую формулу:

$$G_y = g_y \cdot V_{\text{топл}}, \quad (5)$$

где  $g_y$  — удельный расход топлива, г/(кВт·ч);

$V_{\text{топл}}$  — стоимость 1 кг топлива.

$$G_{\text{удт}} = 0,31 \cdot 64 = 19,84 \text{ руб.}/(\text{кВт} \cdot \text{ч});$$

$$G_{\text{угд}} = 0,237 \cdot 35,7 + 0,042 \cdot 64 = 11,16 \text{ руб.}/(\text{кВт} \cdot \text{ч});$$

$G_{\text{удт}}$  — удельный расход ДТ,  $G_{\text{угд}}$  — удельный расход СУГ.

При эксплуатационной мощности 22,5 кВт затраты на топливо (3) в час составят:

$$З_{\text{ч}} = 19,84 \cdot 22,5 = 446,4 \text{ руб./ч} — \text{ДТ}$$

$$З_{\text{ч}} = 11,16 \cdot 22,5 = 251,1 \text{ руб./ч} — \text{СУГ}$$

В месяц, при 40 часовой рабочей неделе и 4,5 недели в месяце, затраты составят:

$$З_{\text{м}} = 446,4 \cdot 40 \cdot 4,5 = 80352 \text{ руб.} — \text{ДТ}$$

$$З_{\text{м}} = 251,1 \cdot 40 \cdot 4,5 = 45198 \text{ руб.} — \text{СУГ}$$

В год затраты на топливо составят:

$$З_{\text{ДТ}} = 80352 \cdot 12 = 964224 \text{ руб.} — \text{ДТ}$$

$$З_{\text{СУГ}} = 45198 \cdot 12 = 542376 \text{ руб.} — \text{СУГ}$$

При сравнении затрат на топливо, в год экономия от использования СУГ в газодизельном варианте составит:

$$З_{\text{ср.з.т.}} = 964224 - 542376 = 421848 \text{ руб.}$$

### Экологическая часть

В Постановлении Правительства РФ от 12.06.2003 № 344 "О нормативах платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ стационарными и передвижными источниками, сбросы загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты, размещение отходов производства и потребления" (Постановление № 344) нормативы платы за выбросы в атмосферный воздух установлены в зависимости не от объема выброса загрязняющих веществ, а от вида и количества использованного топлива.

Нормативы платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ передвижными источ-

никами по видам топлива, согласно Постановлению № 344, указаны в табл. 1.

Таблица 1

Нормативы платы за выбросы в атмосферный воздух

Вид топлива	Единица измерения	Нормативы платы за 1 ед. изм., руб.
Бензин неэтилированный	тонна	1,3
Керосин	тонна	2,5
Дизельное топливо	тонна	2,5
Сжатый природный газ	тыс. куб. м	0,7
Сжиженный углеводородный газ	тонна	0,9

Пункт 2 Постановления № 344 предусматривает обязательное применение различных коэффициентов к нормативам платы: коэффициент, учитывающий экологические факторы (состояние атмосферного воздуха и почвы), по территориям экономических районов Российской Федерации указаны в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты учитывающие экологические факторы

Экономические районы Российской Федерации	Значение коэффициента	
	Для атмосферного воздуха (*)	Для почвы (**)
Северный	1,4	1,4
Северо-Западный	1,5	1,3
Центральный	1,9	1,6
Волго-Вятский	1,1	1,5
Центрально-Черноземный	1,5	2,0
Поволжский	1,9	1,9
Северо-Кавказский	1,6	1,9
Уральский	2,0	1,7
Западно-Сибирский	1,2	1,2
Восточно-Сибирский	1,4	1,1
Дальневосточный	1,0	1,1
Калининградская область	1,5	1,3

<\*> Применяется с дополнительным коэффициентом 1,2 при выбросе загрязняющих веществ в атмосферный воздух городов.

<\*> Применяется при определении платы за размещение отходов производства и потребления:

- коэффициент, характеризующий ту или иную территорию;
- коэффициент места расположения отходов;
- коэффициент за выбросы вредных веществ в атмосферный воздух городов и другие.

Согласно постановлению Правительства РФ от 19 ноября 2014 г. № 1219 "Об индексации нормативов платы за негативное воздействие на окружающую среду" к нормативам, установленным Постановлением Правительства РФ от 12 июня 2003 г. № 344, в 2017 г. применен повышающий коэффициент — 2,67. Коэффициент использования техники на работах составляет 80 %.

Согласно табличным значениям, произведем расчет потребления топлива при эксплуатационной мощности

$$G_{удт} = g_y \cdot N_{экс}; \quad (6)$$

$$G_{удт} = 0,31 \cdot 22,5 = 6,98 \text{ кг/ч},$$

где  $G_{удт}$  — удельный расход ДТ;

$g_y$  — удельный расход топлива, г/(кВт·ч);

$N_{экс}$  — эксплуатационная мощность.

При рабочей смене 8 часов потребление топлива составит

$$G_{см} = 8 \cdot 6,98 = 55,84 \text{ кг}.$$

При 22 сменах в месяц расход топлива составит

$$G_m = 55,84 \cdot 22 = 1228,48 \text{ кг}.$$

Таким образом, стоимость за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ  $\Omega$  при использовании ДТ в месяц рассчитываются согласно нормативам приведенных в таблицах 1,2 и составят

$$2,5 \cdot 1,6 \cdot 2,45 = 9,8 \text{ руб./т}$$

$$\Omega_{дт} = 9,8 \cdot 1,228 = 12,04 \text{ руб./мес.}$$

Стоимость за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ при использовании СУГ в газодизельном режиме составят соответственно

$$(2,5 \cdot 0,15 + 0,9 \cdot 0,85) \cdot 1,6 \cdot 2,45 = 4,47 \text{ руб./т}$$

$$\Omega_{суг} = 4,47 \cdot 1,228 = 5,49 \text{ руб./мес.}$$

Как видно из расчетов, плата за сжигание топлива трактором класса 0,6 при использовании ДТ и СУГ в месяц составляет 12,04 руб. и 5,49 руб. соответственно. На взгляд авторов для улучшения экологической обстановки и качественного улучшения воздуха в атмосфере как минимум справедливо установить тарифы на выбросы газов, а не на использование топлива. Это обусловлено тем, что наносимый урон экологии значительно выше тех мер, которые могли бы снизить вред окружающей среде за отчисляемые средства. Произведен расчет стоимости выбросов отработавших газов в атмосферу тем же трактором, использующим ДТ и СУГ.

Расчет потребления воздуха двигателем проведен на режимах эксплуатационной мощности.

При выполнении работ трактором МТЗ 320.4 среднее значение оборотов двигателя составляет 2400 при эксплуатационной мощности. Двигатель с рабочим объемом 1649 см<sup>3</sup> и трех цилиндров объемом по 550 см<sup>3</sup> каждый, имеет эффективность наполнения цилиндра —  $E$  принятое за 85 % (в современных двигателях  $E$  при оборотах, близких к максимальному крутящему моменту 85—95%, на максимальных оборотах — 75—85 %, поэтому для расчетов принимаем 85 %) для ДВС без турбонаддува.

Из этого следует, что объем потребления воздуха четырехтактным двигателем трактора МТЗ 320.4 в минуту рассчитывается по формуле

$$V = n/2 \cdot L \cdot v \cdot E = 2400/2 \cdot 3 \cdot 0,85 = 2400/2 \cdot 3 \cdot 550 \cdot 0,85 = 1683 \text{ л/мин.}$$

где  $V$  — объем потребления воздуха;

$n$  — число оборотов двигателя, мин;

$L$  — количество цилиндров;

$v$  — объем одного цилиндра;

$E$  — эффективность наполнения цилиндра воздухом.

Масса воздуха рассчитывается по формуле

$$m = V / \rho \quad (7)$$

$$m = 1683/830 = 2,03 \text{ кг},$$

где  $\rho$  — плотность воздуха (объем 1 кг воздуха при температуре 20 °C составляет 830 л).

Время выработки одной тонны отработавших газов составит

$$T = 1000/2,03 = 492,6 \text{ мин.}$$

При продолжительности смены 8 ч (480 мин) масса выбросов составит

$$M = 480/492,6 = 0,975 \text{ т.}$$

Таким образом, норматив отчислений на охрану окружающей среды  $D$ , для *дизельного топлива* рассчитывается путем умножения соответствующего норматива (2,67 умножают на установленные поправочные коэффициенты к нормативам платы, например, 1,6 — для Северо-Кавказского Федерального округа и 2,67 — для 2017 г.)

$$D = 2,5 \cdot 1,6 \cdot 2,67 = 10,7 \text{ (руб./т.)}$$

Для восьмичасовой смены трактора МТЗ 320.4 работающего на дизельном топливе отчисления на охрану окружающей среды составят

$$S_{\text{см}} = 0,975 \cdot 10,7 = 10,42 \text{ руб.}$$

При работе трактора на газодизельном топливе в пропорции 85 % СУГ/ 15% ДТ, согласно нормативам и коэффициентам, расчет будет выглядеть следующим образом:

$$D = (2,5 \cdot 0,15 + 0,9 \cdot 0,85) \cdot 1,6 \cdot 2,67 = (0,375 + 0,765) \cdot 1,6 \cdot 2,67 = 4,87 \text{ (руб./т.)}$$

Для восьмичасовой смены трактора МТЗ 320.4 работающего на газодизельном топливе отчисления на охрану окружающей среды составят

$$S_{\text{см}} = 0,975 \cdot 4,87 = 4,75 \text{ руб.}$$

Если брать количество рабочих смен в неделю 5, а количество недель в месяце 4,5, то сумма отчислений в месяц от работы одного трактора будет выглядеть следующим образом:

$S_{\text{мес}} = 10,42 \cdot 5 \cdot 4,5 = 234,45 \text{ руб.}$  — при использовании дизельного трактора;

$S_{\text{мес}} = 4,75 \cdot 5 \cdot 4,5 = 106,88 \text{ руб.}$  — при использовании газодизельного трактора.

## Заключение

Как показывают расчеты, использование СУГ в качестве топлива экономически целесообразно, однако на практике, владельцы тракторов неохотно переходят на данный вид топлива из-за с дополнительными проблемами, которые возникают, а именно — заправка газом. Для предприятий, обладающих парком 10 и более машин, целесообразно использовать автогазозаправщик, приобретенный или взятый в аренду. Что касается вредных выбросов, то на взгляд авторов, целесообразно пересмотреть суммы отчислений за использованное топливо. Целесообразнее вводить тариф на используемый воздух при работе двигателя. Зная параметры двигателя это не сложно просчитать. Таким образом, средства, отчисляемые за выбросы в атмосферу, дадут более заметный результат для проведения мероприятий, направленных на очистку атмосферного воздуха.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Aydin M., Irgin A., Çelik M. B. The Impact of Diesel/LPG Dual Fuel on Performance and Emissions in a Single Cylinder Diesel Generator. Appl. Sci. 2018, 8, 825. <https://doi.org/10.3390/app8050825>.
2. Уютов С. Ю., Овчинников Е. В., Чаплыгин М. Е. Оценка эффективности систем адаптации газодизельного двигателя для работы в закрытых помещениях // Экология промышленного производства. 2022. № 1(117). С. 42—49. DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_1\_42.
3. Chakraborty A., Roy S., Banerjee R. (2019) Performance Emission Characterization of a LPG-Diesel Dual Fuel Operation: A Gene Expression Programming Approach: Harmony Search and Nature Inspired Optimization Algorithms. Advances in Intelligent Systems and Computing. — Springer, Singapore. V. 741. DOI: 10.1007/978-981-13-0761-4\_39.
4. Овчинников Е. В., Измайлов А. Ю., Уютов С. Ю., Федоткин Р. С. Система адаптации дизельного двигателя для работы в помещениях с ограниченным воздухообменом // Экология промышленного производства. 2021. № 1(113). С. 46—50. DOI: 10.52190/2073-2589\_2021\_1\_46.
5. Alam M. et al. Performance and emissions of a DI diesel engine operated with LPG and ignition improving additives // SAE Transactions. 2001. P. 2446—2454.
6. Emmanuel Anye Ngang, Claude Valery Ngayihi Abbe. Experimental and numerical analysis of the performance of a diesel engine retrofitted to use LPG as secondary fuel // Applied Thermal Engineering. 2018. V. 136. P. 462—474. ISSN 1359-4311. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.03.022>.
7. Al-Dawody M. F., Idan Al-Chlaihawi K K., Al-Farhany K. A. Numerical simulation of the effect of LPG blending on the characteristics of a diesel engine // Heat Transfer. 2022. V. 51: P. 1918—1938. doi:10.1002/hjt.22381.
8. <https://ecologyofrussia.ru/proekt/chistyj-vozduh/>.

## Economic assessment of the environmental performance of a gas-diesel tractor

E. V. OVCHINNIKOV, S. Yu. UYUTOV, M. E. CHAPLYGIN  
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

*An economic comparison from the use of diesel and gas-diesel fuel based on liquefied hydrocarbon gas in terms of environmental indicators is considered using the example of the MTZ 320.4 tractor. Based on the results of calculations, it was determined that the use of gas-diesel fuel reduces fuel costs when performing technological operations, and also reduces the negative impact on the environment, thereby reducing the fee for emissions of pollutants into the atmospheric air by more than two times.*

**Keywords:** diesel engine, liquefied petroleum gas, ecology, economy, negative impact.

**Bibliography** — 8 references.

*Received April 5, 2022*

Экология промышленного производства: Межотр. науч.-практ. журнал / ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2022. Вып. 2. С. 1—56.

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

Подписано в печать 18.05.2022.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 6,5 . Уч.-изд. л. 6,7.

Тираж 250 экз. Заказ 1994.

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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### Комплектование статьи (обзора)

Статья должна быть представлена в редакцию в следующем комплекте:

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

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

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

### Оформление статьи:

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



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

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

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

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

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

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

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

### **Оформление рисунков:**

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

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

белом фоне. Вспомогательные сетки на площади графика не допускаются;

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

### **Оформление формул:**

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

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

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

- векторы и матрицы обозначать полужирным прямым шрифтом;

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

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

### **Оформление таблиц:**

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

- графы должны иметь название без сокращения отдельных слов.

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

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

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

**БЛАНК-ЗАКАЗ НА ПОДПИСКУ 2022 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](mailto:secretariat@ntckompas.ru)

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

8 (495) 491-43-17.

E-mail: [ivleva@ntckompas.ru](mailto:ivleva@ntckompas.ru)

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

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».