

# ЭКОЛОГИЯ

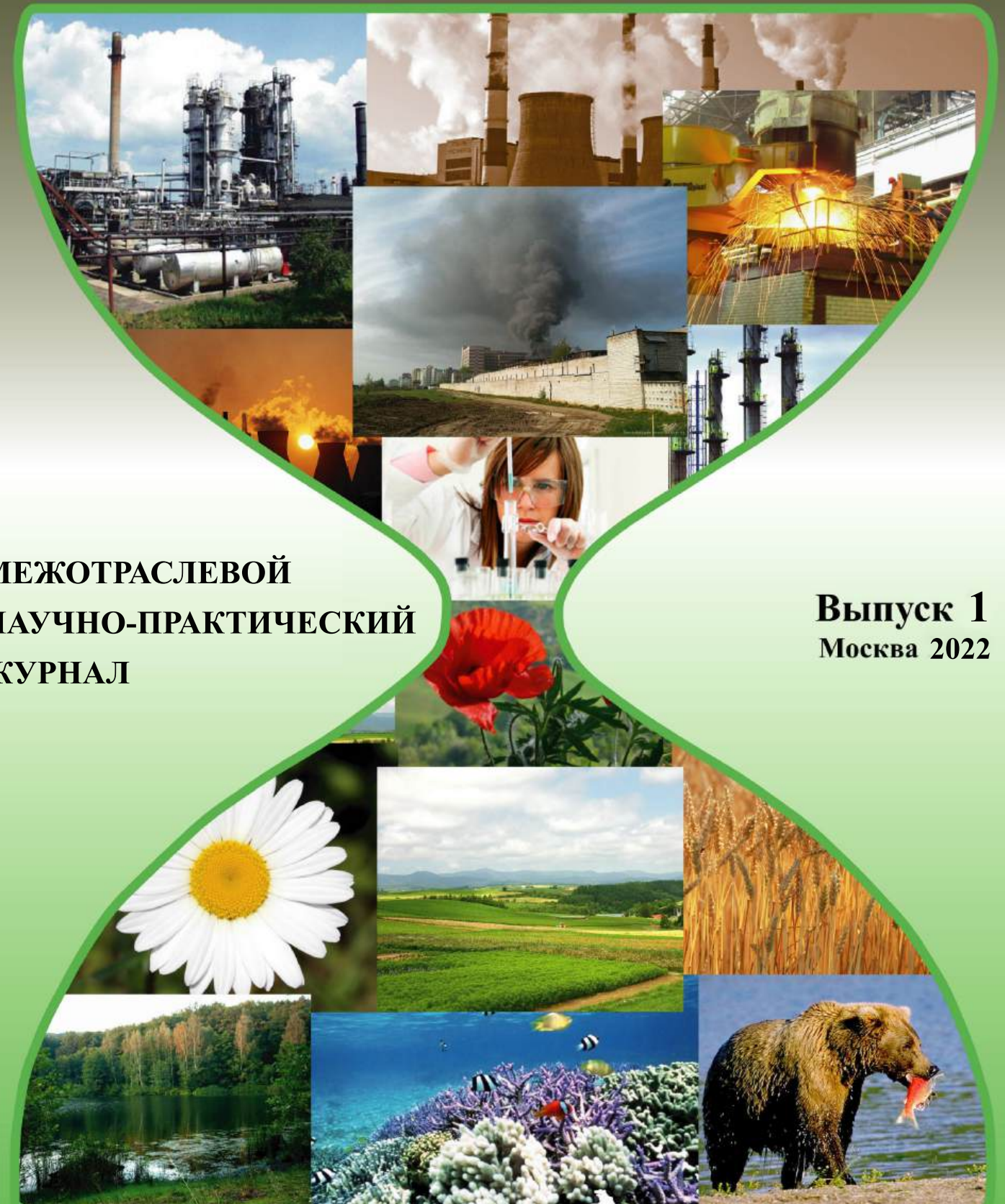
промышленного  
производства

Индекс 80090



# ЭКОЛОГИЯ

промышленного  
производства



МЕЖОТРАСЛЕВОЙ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

Выпуск 1  
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 1 (117)

Издается с 1993 г.

Москва 2022

### СОДЕРЖАНИЕ

#### ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ, УТИЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕРАБОТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Артемьев А. В., Переславцев А. В., Воишин С. А., Тресвятский С. С., Коробцев С. В. "Зеленые" технологии в плазменной переработке отходов. Получение и переработка глицерина ..... 2

Пикалов Е. С. Полимерстеклянный строительный материал на основе отходов ..... 7

Боранбаева А. Н., Серикбаева А. К., Иманбаев Е. И., Бусурманова А. Ч., Аккенжеева А. Ш. Снижение нагрузки на окружающую среду с утилизацией нефтешламов на дорожный битум ..... 13

#### ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДООЧИСТКА

Руденко Е. Ю., Царева Е. А., Давлятина М. З., Темникова Е. С. Адсорбенты из отходов пищевой промышленности для очистки воды ..... 18

Ксенофонтов Б. С. Экокомбайны в технологиях очистки сточных вод ..... 24

#### ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Янников И. М., Исаков В. Г., Алексеев В. А., Абрамова А. А., Галиакберов Р. А. Анализ применимости методов реабилитации территорий объектов по уничтожению химического оружия ..... 30

#### ОЧИСТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ

Катин В. Д., Косыгин В. Ю., Медведева Г. Г. К проблеме исследования выбросов оксидов азота с продуктами сгорания трубчатых печей с подовой компоновкой горелок ..... 38

Уюттов С. Ю., Овчинников Е. В., Чаплыгин М. Е. Оценка эффективности систем адаптации газодизельного двигателя для работы в закрытых помещениях ..... 42

#### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Гладун И. В., Черенцова А. А. Оценка экологического развития Хабаровского края в период с 2000 по 2018 годы ..... 50

Ивахник Д. Е. Оценка экологической конкурентоспособности топливных энергогенерирующих компаний России ..... 58

#### Главный редактор

М. В. Слипенчук, д-р экон. 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

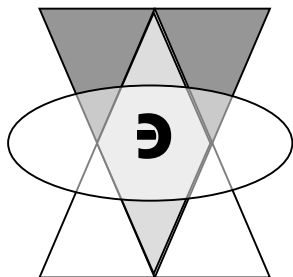
Ответственный секретарь К. В. Трыкина, начальник отдела научных и информационных изданий ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

#### Редакционный совет:

М. Ч. Залиханов, акад. РАН, проф., РАН; И. Н. Мешков, акад. РАН, проф., Объединенный 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. Амиранов, 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, ИГТУ им. Н. Э. Баумана; О. Д. Доронина, д-р биол. наук, проф., Академия труда и социальных отношений; Е. Ю. Дорохина, д-р экон. 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., ИГТУ 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. Тенев, 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 экон. наук, проф., АО "ЦНИИ экономики, информатики и систем управления"



# Обезвреживание, утилизация и переработка промышленных отходов

УДК 504.064.47:628.475.3-7:533.9.15  
DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_1\_2

## "Зеленые" технологии в плазменной переработке отходов. Получение и переработка глицерина

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

*Приведены данные о Комплексе плазменной переработки отходов, сопряженном с блоком алга-технологий: количестве вырабатываемых в Комплексе глицерина, биомассы и биодизельного топлива. Рассчитана степень внутреннего использования  $\text{CO}_2$  в Комплексе в зависимости от технологических параметров. Предложена технология паровой конверсии глицерина с образованием водорода и  $\text{CO}_2$ . Показана перспективность синтеза триацетина этерификацией глицерина уксусной кислотой. Сделан вывод об экономической и экологичности предложенных технических решений.*

**Ключевые слова:** плазменная переработка отходов, биодизель, глицерин, триацетин.

Вариант плазменной переработки отходов производства и потребления (ОПП) в Комплексе высокотемпературного плазменного конвертера (ВТПК), сопряженного с блоком алга-технологий (БАТ), позволяет производить в Комплексе не только тепловую и электрическую энергию и базальтоподобный шлак (БПШ) [1], но и дополнительно получать биомассу (БМ), которая, в свою очередь, является первоклассным источником природного пищевого белка и хлорофилла, биодизельное топливо (БД) и глицерин (ГЛ).

При этом степень внутреннего использования вырабатываемого в самом Комплексе ВТПК + БАТ  $\text{CO}_2$  ( $\omega$ ) увеличивается с 0,05 до 0,21 (возрастает более чем в 4 раза) при использовании площади БАТ 4 га и может

быть увеличена до  $\omega = 0,88$  при увеличении площади БАТ до 20 га. Вырабатываемый БД вместе с  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{CH}_4$ , содержащимися в пирогазе, позволяет в значительной степени (вплоть до 98 %) заменить природный газ в газотурбинной установке (ГТУ). Приведенные показатели значительно увеличивают экологическую привлекательность этой технологии. Использование сопряженной технологии позволяет сделать ее и экономически привлекательной: годовая прибыль от работы Комплекса ВТПК + БАТ составляет более 5 млрд руб. при сроке окупаемости 3 г. (производительность по отходам 25 000 т/г.). Кроме того, как видно из таблицы, при площади БАТ 20 га происходит полное замещение природного газа биодизелем. Тем самым решается проблема использования углеводородного топлива при переработке отходов.

Настоящая работа является продолжением [1] и посвящена оценке количества вырабатываемого в Комплексе ВТПК + БАТ ГЛ и поиску путей его рациональной переработки. Выбор в качестве объекта исследования ГЛ не случаен. Он основывался на том, что в процессе плазменного пиролиза ОПП в Комплексе ВТПК + БАТ дальнейшая переработка или использование всех (кроме ГЛ) получаемых продуктов определены применением:

- БПШ для производства базальтового волокна [2];
- БД либо в самом Комплексе как замены природного газа, либо для продажи на внешнем рынке [1];
- БМ в сельском хозяйстве, животноводстве, рыбоводстве, пищевой и пищевкусовой промышленности [1];

**Артемов Арсений Валерьевич**, профессор, ведущий научный сотрудник.

E-mail: arsenyart@icloud.com

**Переславцев Александр Васильевич**, начальник лаборатории.

E-mail: pereslavitsev\_av@nrcki.ru

**Вощинин Сергей Александрович**, главный специалист.

E-mail: vossergey@gmail.com

**Тресвятский Сергей Сергеевич**, начальник группы.

E-mail: arsenyart@mail.ru

**Коробцев Сергей Владимирович**, заместитель руководителя ККФХТ по научной работе.

E-mail: korobtsev\_sv@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 15 октября 2021 г.

© Артемов А. В., Переславцев А. В., Вощинин С. А., Тресвятский С. С., Коробцев С. В., 2022

- пирогаза после выделения водорода методом короткоциклового адсорбции (КЦА) [3] и выделения  $\text{CO}_2$ , который используется в качестве плазмообразующего газа в ВТПК, а также в качестве питательной среды для выращивания микроводорослей в фотобиореакторе (используется как одна из компонент топливной смеси для газовых турбин Комплекса).

ГЛ, получаемый в Комплексе ВТПК + БАТ, количество которого определяется в основном площадью БАТ (см. таблицу), рассматривали как продукт, реализуемый исключительно на внешнем рынке.

Из-за повышенного интереса к "зеленым" технологиям, в том числе и к производству БД, на внешнем рынке сложилась ситуация перепроизводства ГЛ. Объем производства БД в Европе в последние годы вырос в 25 раз и достиг уровня 23 млн т/г. [4]. Поэтому конверсия ГЛ в продукты с высокой добавленной стоимостью является важным вопросом производства БД и "зеленых" технологий, сопровождающих эти производства, в том числе и плазменных технологий, реализующих процесс ВТПК + БАТ. Появился интерес к технологиям, перерабатывающим ГЛ-содержащее сырье [5]. Учитывая это, а также принимая во внимание наличие в Комплексе избыточной тепловой и электрической энергии, представляет определенный интерес рассмотреть возможность переработки ГЛ в самом Комплексе ВТПК + БАТ с получением продукции, пользующейся стабильным спросом.

В качестве справочной информации укажем, что по областям применения различают аптечный, пищевой, медицинский, парфюмерный и промышленный ГЛ. ГЛ впервые был получен при омылении жиров. Сырьем для получения ГЛ служит пропилен. Его хлорируют при 450—500 °С, получают аллилхлорид, далее присоединяют хлорноватистую кислоту. Образуются хлоргидрины, которые при омылении щёлочью превращаются в ГЛ. Есть и другие методы, которые основаны на превращениях аллилхлорида в ГЛ через дихлоргидрин или аллиловый спирт. Известен метод получения ГЛ окислением пропилена в акролеин. При пропускании смеси паров акролеина и изопропилового спирта через катализатор образуется аллиловый спирт, который при 190—270 °С в водном растворе пероксида водорода превращается в ГЛ. ГЛ можно получить также из продуктов гидролиза крахмала, древесной муки, гидрированием образовавшихся моносакхаридов или гликолевым брожением сахаров. Также ГЛ получается в качестве побочного продукта при производстве биотоплива, в частности биотоплива из микроводорослей.

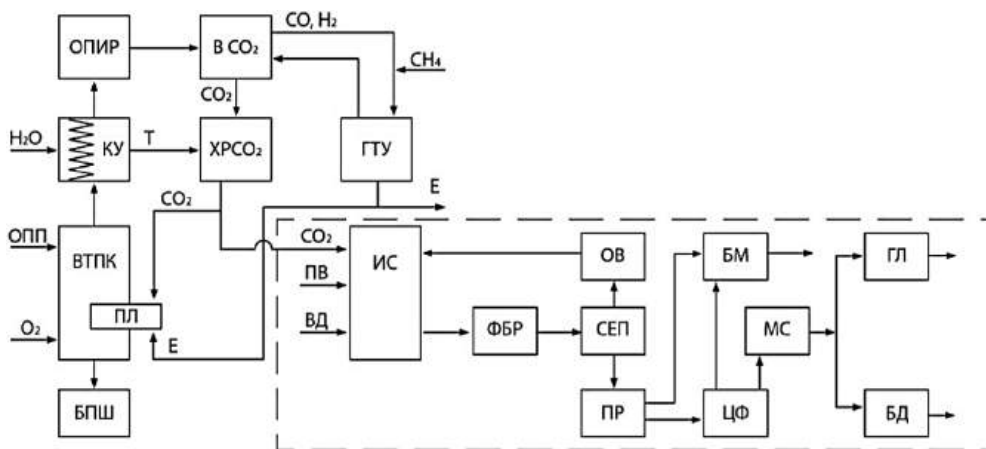
## Аналитическая часть

Результаты аналитического исследования были приведены в таблице. Процесс проводили в соответствии с принципиальной технологической схемой переработки ОПП в Комплексе ВТПК + БАТ, приведенной на рис. 1.

### Сравнение результатов работы Комплекса ВТПК + БАТ при различной площади БАТ\*

[illegible]

Примечание. Производительность Комплекса по отходам 25 тыс. т/г. Состав отходов (масс. %): ТКО — 70; ТНО — 5; ОПМ — 5; АП — 7; ОД — 6; БО — 2; МО — 5. Поток плазмообразующего газа (CO<sub>2</sub>) 1704 кг/ч. Поток CO<sub>2</sub> от ГТУ 37005 кг/ч. Содержание CO<sub>2</sub> в пирогазе 1516 кг/ч. Дополнительное дутье O<sub>2</sub> в зону пиролиза ВТПК 192 кг O<sub>2</sub> на 1 т ОПП. Содержание водорода в пирогазе 105 кг/ч (ТКО — твердые коммунальные отходы; ТНО — тяжелые нефтяные отходы; ОПМ — отходы полимерных материалов; АП — автомобильные покрышки; ОД — отходы деревопереработки; БО — биологические отходы; МО — медицинские отходы).

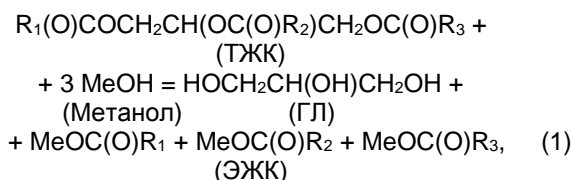


**Рис. 1. Принципиальная технологическая схема переработки отходов производства и потребления в Комплексе ВТПК + БАТ:**  
 ОПП — отходы производства и потребления; ВТПК — высокотемпературный плазменный реактор; ПЛ — плазматрон; БПШ — базальто-подобный шлак; КУ — котел-утилизатор; ОПИР — очистка пирогаза; Е — электроэнергия; Т — теплоноситель (пар); ВСО<sub>2</sub> — выделение CO<sub>2</sub>; ХРСО<sub>2</sub> — хранилище CO<sub>2</sub>; ГТУ — газотурбинная установка; ИС — инкубатор-смеситель; ПВ — питательные вещества; ВД — водоросли; ФБР — фотобиореактор; ОВ — оборотная вода; СЕП — сепаратор; ПР — пресс; БМ — биомасса; ЦФ — центрифуга; МС — масло; ГЛ — глицерин; БД — биодизель. Штриховой линией выделен БАТ

ОПП поступают в верхнюю часть ВТПК, в нижней части которого в зоне пиролиза расположены плазматроны (ПЛ). Рабочим газом в ПЛ является  $\text{CO}_2$ , подаваемый в ПЛ из хранилища  $\text{CO}_2$  ( $\text{ХРСО}_2$ ). Электроэнергию (Е) ПЛ получают от ГТУ. В зону пиролиза ВТПК подают строго расчетное количество кислорода для обеспечения полного превращения неорганических компонентов ОПП в БПШ, который выводится из нижней части ВТПК. Пирогаз из ВТПК поступает в котел-утилизатор (КУ), где отдает свое тепло с выработкой теплоносителя (Т) — пара, который используется внутри Комплекса ВТПК + БАТ (на рис. 1 не показано). Избыток Т передается внешним потребителям или на паротурбинную установку (на рис. 1 не показано). Охлажденный пирогаз из КУ направляют на стадию очистки пирогаза (ОПИР), а после стадии ОПИР очищенный пирогаз направляют на стадию абсорбционного выделения  $\text{CO}_2$  ( $\text{BCO}_2$ ) с использованием в качестве абсорбента метилдиэтанолamina (МДЭА) [3]. Выделенный на стадии  $\text{BCO}_2$  углекислый газ направляется в  $\text{ХРСО}_2$ . Оставшаяся (после выделения  $\text{CO}_2$ ) часть пирогаза, содержащая в основном  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$ , направляется в ГТУ в качестве низкокалорийной добавки для смешивания с природным газом. При необходимости из этой оставшейся части пирогаза может быть выделен водород методом КЦА [3] (на рис. 1 не показано).  $\text{CO}_2$  выделяется также и из газообразных продуктов ГТУ.

Из  $\text{ХРСО}_2$  некоторая часть  $\text{CO}_2$  поступает в качестве плазмообразующего газа в ПЛ, а большая часть — в БАТ (на рис. 1 БАТ выделен штриховой линией): сначала в инкубатор-смеситель (ИС), в котором происходит смешивание  $\text{CO}_2$  с оборотной водой (ОВ), питательными веществами (ПВ) и водорослями (ВД) (*CHLORELLA VULGARIS* и/или *SPIRULINA PLATENSIS*). Из ИС смесь направляют в фотобиореактор (ФБР), в котором происходит выращивание (увеличение массы) водорослей. Полученные водоросли поступают в сепаратор (СЕР), где ОВ отделяют и направляют ее в ИС, а оставшуюся часть направляют под пресс (ПР) для выделения биомассы (БМ), которую поставляют потребителю. Жидкую фазу после ПР дополнительно центрифугируют (ЦФ), отделяют жидкую фазу — масло (МС), а твердую фазу объединяют с БМ.

Полученное МС представляет собой триглицериды жирных кислот (ТЖК), переэтерификацией которых метанолом в мягких условиях (50—80 °С) получают ГЛ и метиловые эфиры жирных кислот (ЭЖК) — эффективные добавки к традиционным дизельным топливам — БД:



где  $\text{R}_1\text{—R}_3$  — углеводородный остаток (для ТЖК водорослей обычно  $\text{C}_{14}\text{—C}_{19}$  [6]). Подробно процесс переэтерификации ТЖК описан в обзорной статье [7]. Перед переэтерификацией метанолом ТЖК могут быть обогащены гидрированием водородом [8] в присутствии катализатора  $\text{Ni-Cu/CeO}_2\text{-ZrO}_2$  при давлении водорода 1,0 МПа в интервале температур 300—380 °С.

Метанол, необходимый для переэтерификации ТЖК, может быть получен из пирогаза после выделения из него синтез-газа ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) и превращения последнего в метанол с использованием синтеза Фишера—Тропша (СФТ).

Помимо известных методов химической переработки ГЛ [5] представляется весьма перспективным (особенно при наличии избыточной тепловой энергии в Комплексе) переработка ГЛ с водяным паром в присутствии катализатора на основе никеля, оксида магния и титана [9] с получением смеси  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$ :



При 650 °С максимальный выход водорода составляет 56,5 %. Этот процесс хорошо сочетается с технологией ВТПК + БАТ: полученный  $\text{CO}_2$  после абсорбционного выделения может быть рециркулирован на стадию БАТ, а необходимый пар получен в блоке ВТПК в КУ. Водород является одним из наиболее востребованных энергоносителей. Из 6500 т/г. глицерина (см. таблицу) при 50%-м выходе водорода может быть получено около 500 т/г. водорода. С учетом водорода, выделяемого из пирогаза (80 кг/ч, или 596 т/г. при реальном времени эксплуатации Комплекса в течение года 7446 ч при годовой загрузке по времени 85 %), годовая производительность по водороду в Комплексе ВТПК + БАТ может достигать более 1000 т/г. Этот процесс может быть реализован в стандартном трубчатом реакторе [10] с непосредственным обогревом газообразными продуктами ГТУ (рис. 2).

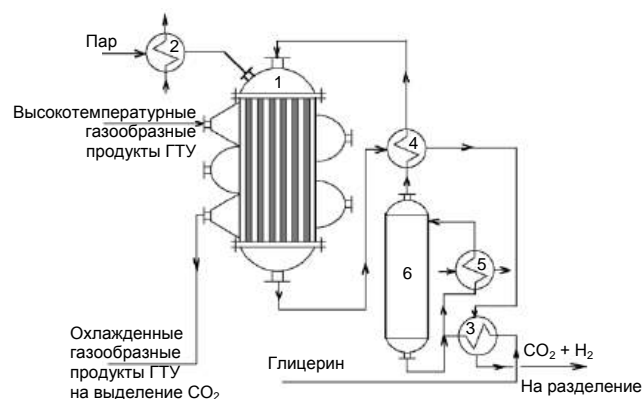
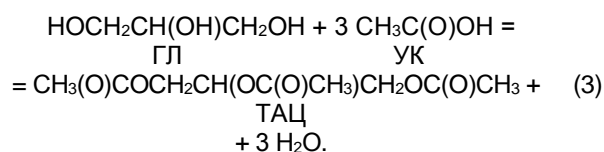


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема паровой конверсии глицерина:

1 — трубчатый реактор; 2 — пароперегреватель; 3—5 — теплообменники; 6 — сепаратор

Еще одним перспективным методом химической переработки ГЛ является получение триацетина (ТАЦ) по реакции ГЛ с уксусной кислотой (УК):



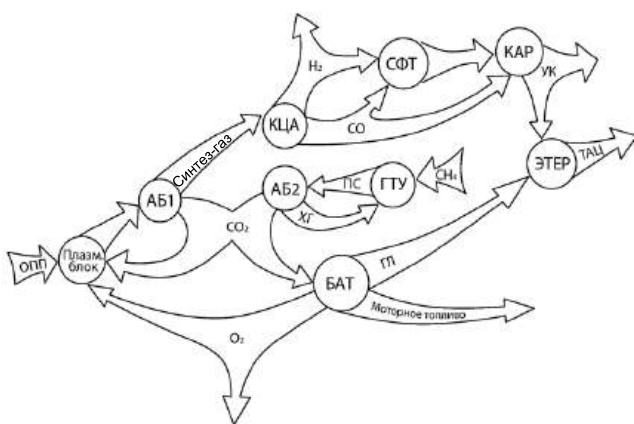
ТАЦ известен как вещество с широким спектром применения:

- в качестве безопасной пищевой добавки (Е1518), в том числе и как возможный источник питания для систем искусственного питания при длительных космических перелетах;

- в косметической и фармацевтической промышленности в качестве увлажняющего агента, пластификатора и растворителя;
- в качестве добавки к топливу как антидетонационной присадки, снижающей стук двигателя при использовании бензина, улучшающей устойчивость к низким температурам и вязкостные характеристики биодизеля. Является связующим веществом твердого ракетного топлива;
- в химической промышленности в качестве пластификатора и отвердителя при литье пластиков и в производстве различных смол.

Выбор синтеза ТАЦ в качестве метода переработки ГЛ, полученного при плазменной переработке ОПП в Комплексе ВТПК + БАТ, предусматривающий взаимодействие ГЛ с УК, обусловлен также тем, что наиболее распространенным способом промышленного синтеза уксусной кислоты является каталитическое карбонилирование метанола монооксидом углерода. Используемые в качестве реагентов этого процесса метанол и монооксид углерода являются продуктами плазменной переработки ОПП [3]. В качестве катализатора карбонилирования используют иодид кобальта. Процесс заключается в барботаже монооксида углерода при температуре 180 °С и повышенном давлении через смесь реагентов. Выход уксусной кислоты достигает 90 % по метанолу и 70 % по СО. В настоящее время для получения УК используют усовершенствованный процесс карбонилирования метанола — гомогенный процесс, в котором в качестве катализатора используют соли родия, а в качестве промотора иодид-ионы. Важной особенностью этого усовершенствованного метода являются большая скорость и высокая конверсия: 99 % по метанолу и 90 % по СО. Этим методом получают более 50 % всей промышленной УК.

Принципиальная схема газовых потоков при реализации непосредственно в Комплексе стадий получения метанола из синтез-газа с использованием технологии Фишера—Тропша (СФТ), карбонилирования метанола с получением УК и использованием ее на стадии синтеза ТАЦ приведена на рис. 3.



**Рис. 3. Принципиальная схема газовых потоков в Комплексе:** ОПП — отходы производства и потребления; АБ1 и АБ2 — абсорбционные блоки выделения  $\text{CO}_2$ ; ГТУ — газотурбинная установка; ХГ — хвостовые газы; ГЛ — глицерин; ЭТЕР — стадия этерификации с получением ТАЦ; УК — уксусная кислота; ПС — продукты сгорания; КЦА — короткоцикловая адсорбция; СФТ — синтез Фишера—Тропша; КАР — стадия карбонилирования с получением уксусной кислоты; ТАЦ — триацетин

Получение ТАЦ обычно осуществляют в присутствии кислотных гомогенных [11, 12] или гетерогенных [13] катализаторов с использованием известных технологий.

### Заключение

Реализация технологии плазменной переработки ОПП в Комплексе ВТПК + БАТ позволит не только организовать экономически эффективную переработку отходов с выработкой тепловой и электрической энергии и водорода, но и при достаточно больших площадях БАТ полностью исключить использование углеводородного топлива (природного газа). Наличие дополнительных химических стадий в Комплексе позволит диверсифицировать плазменную переработку ОПП как в части производства энергетических компонентов (электрическая и тепловая энергия, водород, биодизель), так и в части востребованных самим Комплексом и внешним рынком химических продуктов: триацетина, уксусной кислоты, метанола и т. д. Это существенно увеличивает экономическую ценность предлагаемой технологии. Улавливание и переработка  $\text{CO}_2$  с использованием алга-технологий, с одной стороны, и декарбонизация применяемых технологий, с другой, делают предложенное техническое решение привлекательным не только с экономической, но и с экологической точек зрения.

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

### ЛИТЕРАТУРА

1. Артемов А. В., Переславцев А. В., Вошинин С. А., Тресвятский С. С., Коробцев С. В. "Зеленые" технологии в плазменной переработке отходов // Экология промышленного производства. 2021. № 3. С. 2—7.
2. Артемов А. В., Переславцев А. В., Вошинин С. А., Тресвятский С. С., Коробцев С. В. Получение неорганических волокон из продуктов плазменной переработки отходов // Химическая технология. 2021. Т. 22. № 7. С. 294—298.
3. Артемов А. В., Переславцев А. В., Вошинин С. А., Тресвятский С. С., Коробцев С. В. Получение водорода в процессе плазменной переработки отходов // Энергия: экономика, техника, экология. 2021. № 6. С. 30—35.
4. Lu L., Ye X. P., Bozell J. J. // ChemSusChem. 2012. V. 5. № 7. P. 1162—1180.
5. Зорин В. В., Петухова Н. И., Шахмаев Р. Н. Перспективные направления утилизации глицеринсодержащих отходов в производстве биодизельного топлива // Российский химический журнал. 2011. Т. 55. № 1. С. 77—88.
6. Сорокина К. Н., Яковлев В. Я., Пилигаев А. В., Кукушкин Р. Г., Пельтек С. Е., Колчанов Н. А., Пармон В. Н. Потенциал применения микроводорослей в качестве сырья для биоэнергетики // Катализ в промышленности. 2012. № 2. С. 63—72.
7. Яковлев В. А., Хромова С. А., Бухтияров В. И. Гетерогенные катализаторы процессов превращения триглицеридов жирных кислот и их производных в углеводороды топливного назначения // Успехи химии. 2011. Т. 80. № 10. С. 955—970.
8. Селищева С. А., Лебедев М. Ю., Решетников С. И., Трусов Л. И., Яковлев В. А. Кинетика процесса гидрооблагораживания триглицеридов жирных кислот рапсового масла в мягких условиях // Катализ в промышленности. 2013. № 5. С. 73—80.

9. Adhikari S., Fernando S. D., Haryanto A. Hydrogen production from glycerol by steam reforming over nickel catalysts // Renewable Energy. 2009. № 33. P. 109.
10. Производство капролактама / под ред. Овчинникова В. И., Ручинского В. Р. — М.: "Химия", 1977. С. 113—119.
11. Mufrodi Z., Rochmadi S., Budiman A. Chemical Kinetics for Synthesis of Triacetin from Biodiesel Byproduct // Int. J. Chem. 2012. V. 4. № 2. P. 101—107.
12. Heng Wepoh. Synthesis of Triacetin from Glycerol. Faculty of Eng. And Green Tech. University Tunku Abdul Rahman, 2015 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://eprints.utar.edu.my/1766/1/Synthesis\\_of\\_Triacetin\\_from\\_Glycerol.pdf](http://eprints.utar.edu.my/1766/1/Synthesis_of_Triacetin_from_Glycerol.pdf)
13. Rifle S., Armbruster U., Umbarkar S., Dongare M., Martin A. Esterification of glycerol with acetic acid for improved production of triacetin using toluene as an entrainer: 10-th Green Chemistry Conference, Barselona, Spain, 2013.

## "Green" technologies in plasma treatment of solid wastes. Produce and recycle of glycerol

A. V. ARTEMOV, A. V. PERESLAVTSEV, S. A. VOSHCHININ,  
S. S. TRESVYATSKY, S. V. KOROBTSSEV  
National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

*The article is devoted to the plasma treatment by the using of high-temperature plasma converter, coupled with the alga-technologies unit. The basic technological schemes of the process of plasma treatment of wastes and alga technologies unit are presented. The technology provides to produce the basalt-like slag, electric and thermal energy, biomotor fuel, alga-biomass and glycerol. Producing and recycling of glycerol, esterification of glycerol with acetic acid to triacetin are describe.*

**Keywords:** plasma treatment of wastes, biodiesel, glycerol, triacetin.

**Bibliography** — 13 references.

*Received October 15, 2021*



УДК 678

DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_1\_7

## Полимерстеклянный строительный материал на основе отходов

Е. С. ПИКАЛОВ, канд. техн. наук

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

*Представлены результаты разработки состава сырьевой смеси для получения строительного композиционного материала, в котором дисперсным наполнителем является измельченный стекольный бой, а связующим — вторичный полистирол. Вторичный полистирол предлагается получать путем растворения изделий из пенополистирола в метиленхлориде с последующим перемешиванием раствора с наполнителем, прессованием и термообработкой для удаления растворителя. Приведены зависимости основных свойств материала от соотношения компонентов в составе сырьевой смеси с выбором состава для получения материала, соответствующего требованиям, которые предъявляются к облицовочным изделиям для зданий и сооружений.*

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

С развитием человеческого общества и производства неизменно повышается антропогенное воздействие на окружающую среду, основными видами которого являются добыча и переработка природных ресурсов. С одной стороны, это приводит к истощению природных ресурсов, а с другой — является причиной образования отходов, газовых выбросов и сточных вод от добычи природных ресурсов, от производства из этих ресурсов продукции и от ее потребления. Кроме того, процессы добычи природных ресурсов и накопления отходов приводят к деградации и загрязнению окружающей среды.

Для решения проблем истощения природных ресурсов и загрязнения окружающей среды отходами необходимо рациональное использование сырья и энергии в производственных процессах, развитие экологически безопасных и малоотходных технологий. При этом основной задачей является уменьшение расхода сырья и объемов образования отходов, что возможно за счет возврата отходов производства и потребления их в производственных циклах в качестве вторичных ресурсов.

Актуальными направлениями развития технологий по утилизации отходов являются комплексная переработка разнородных отходов, в том числе в производстве композиционных материалов, применение отходов в качестве функциональных добавок для повышения качества продукции, уменьшение количества первичных ресурсов и возможность получения продукции только на основе отходов, применение

низковостребованных отходов, низкая стоимость и простота производственных процессов [1—3]. Реализация перечисленных направлений позволит уменьшить количество образующихся отходов, снизить себестоимость производства, расширить ассортимент и повысить качество получаемой продукции.

В наибольшей степени все эти направления могут быть реализованы при использовании отходов в производстве строительных материалов и изделий [4—6]. Дополнительными преимуществами утилизации отходов в данной области являются большие объемы производства и высокая востребованность строительных материалов и изделий, связанные с потребностями в возведении новых, ремонте и реконструкции существующих зданий и сооружений в жилищной и производственной сферах. Кроме того, строительные материалы и изделия отличаются широким ассортиментом по форме выпуска, областям применения и нормативным требованиям к эксплуатационным свойствам, что позволяет использовать разнородные отходы для получения необходимой продукции строительного назначения.

Для оценки возможности применения отходов в качестве сырьевых материалов в производстве продукции строительного назначения, как и в случае с другими сырьевыми компонентами, проводятся исследования по их влиянию на основные эксплуатационные свойства получаемого материала с выбором количественного и качественного состава сырьевой смеси.

Цель данной работы — исследование зависимости основных свойств композиционного материала на основе стекольных и полимерных отходов от состава сырьевой смеси и определение состава сырьевой смеси для получения материала, соответствующего нормативным требованиям для облицовочных материалов.

**Пикалов Евгений Сергеевич**, доцент кафедры "Химические технологии".

E-mail: evgeniy-pikalov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2021 г.

© Пикалов Е. С., 2022

### Сырьевые материалы и методы исследования

В данной работе для получения наполнителя применяли бой листового оконного стекла, собранный из различных источников, преимущественно в составе строительных отходов, которые образуются при строительстве и ремонте зданий и сооружений, а также при демонтаже старых окон. В то время как отходы производства листового оконного стекла могут быть успешно переработаны на заводах по его производству, для отходов потребления характерно наличие примесей, которые снижают степень чистоты стекла и делают невозможным его возврат в производство. Такой стеклобой используют в производстве стеклотары [7], стекловаты и стекловолокна [8], пеностекла, вяжущих, стеклокристаллических и стеклокерамических материалов [9—11], а также полимерных композиционных изделий [10, 12]. Применение стеклобоя в качестве наполнителя для полимерных композиционных материалов позволяет повысить твердость и прочность, снизить усадку изделий [12]. Перед использованием стеклобой измельчали до фракции с размером частиц не более 0,63 мм, смешивали фракции из разных источников для усреднения состава и высушивали до постоянной массы.

Для получения связующего в данной работе применяли отходы изделий из пенополистирола, в частности отработанные элементы упаковки бытовой техники, оборудования и т. п., отобранные из общей массы отходов потребления. Для отходов потребления изделий из пенополистирола характерны большие объемы накопления, связанные со сравнительно небольшим сроком эксплуатации и низкой плотностью изделий [13, 14]. Переработка данных отходов экономически невыгодна из-за низкой стоимости производства данного полимера из первичного сырья, а также наличия примесей и частичной деструкции [15], которые характерны для любых полимерных отходов потребления и снижают качество полимерных изделий, получаемых с их использованием [16, 17]. В то же время автор данной работе путем растворения отходов из пенополистирола ранее получали полистирольное связующее, которое повышает прочность и снижает водопоглощение при высокой адгезии к различным наполнителям [13, 15]. Перед использованием отходы из пенополистирола измельчали до размера частиц не более 6 см, а затем, как и в случае со стеклобоем, смешивали фракции из разных источников для усреднения состава и высушивали до постоянной массы.

Для растворения отходов из пенополистирола использовали технический метиленхлорид первого сорта по ГОСТ 9968-86 с содержанием основного вещества не менее 98,8 масс. %. Метиленхлорид быстро растворяет пенополистирол за счет высокой проникающей способности и может быть легко удален из сырьевой смеси после формования за счет низкой температуры кипения и высокой летучести. При этом низкая температура кипения метиленхлорида (39,6 °C), в пределах которой проводилась термообработка образцов получаемого материала, позволила исключить термодеструкцию полистирола, кото-

рая начинается при более высоких температурах (около 200 °C). Кроме того, в отличие от большинства растворителей метиленхлорид отличается низкой токсичностью (4-й класс опасности), пониженной горючестью, высокой распространенностью и низкой стоимостью. Применение растворения полимера является альтернативным вариантом плавлению и не только исключает термодеструкцию полимера, но и позволяет проводить холодные перемешивание и прессование, что уменьшает энергоемкость процесса переработки. Главным недостатком растворения полимеров являются большие потери растворителя при улетучивании, но их можно свести к минимуму за счет герметизации оборудования и конденсации образующихся паров для повторного использования.

Как было установлено ранее [15], раствор с оптимальной для получения композиционного материала с алюмосиликатным наполнителем вязкостью может быть получен при соотношениях полистирол : метиленхлорид от 1 : 1,2 до 1 : 1,8. Также было установлено, что количество алюмосиликатного наполнителя, позволяющее получать полимерные композиционные материалы строительного назначения, составляет от 35 до 75 масс. % от состава сырьевой смеси [12, 15]. В связи с этим в данной работе исследования проводили в указанных интервалах изменения количества компонентов сырьевой смеси.

Образцы разрабатываемого композиционного материала получали путем растворения подготовленных отходов из пенополистирола в метиленхлориде до получения однородного раствора связующего с его последующим перемешиванием с подготовленным наполнителем до однородной сырьевой смеси при заданных массовых соотношениях между ее компонентами. После этого из смеси одноступенчатым холодным прессованием при давлении 8 МПа, которое обеспечивает оптимальное уплотнение смеси с раствором полистирола [15], формовали образцы с их последующей термообработкой при температуре 45—50 °C в течение 45 мин для удаления растворителя. Образцы по каждому исследуемому в работе составу сырьевой смеси изготавливали сериями по пять образцов с последующим определением средних арифметических значений исследуемых свойств.

У серий образцов по стандартным для строительных материалов методикам определяли прочность на сжатие ( $\sigma_{сжат}$ , МПа) и изгиб ( $\sigma_{изг}$ , МПа), водопоглощение (В, %), общую ( $P_{об}$ , %), открытую ( $P_{от}$ , %) и закрытую ( $P_{зак}$ , %) пористости, плотность ( $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>), морозостойкость (М, циклы) и теплопроводность ( $\lambda$ , Вт/(м·°C)).

### Результаты экспериментов и их обсуждение

На первом этапе экспериментальных исследований были выявлены зависимости прочности на изгиб и водопоглощения, являющихся основными свойствами для облицовочного материала, от соотношения полимер : растворитель в растворе связующего при разном количестве наполнителя в составе сырьевой смеси.

По результатам экспериментов установлено, что при соотношениях полистирол : метиленхлорид от 1 : 1,2 до 1 : 1,6 происходит увеличение прочности на изгиб материала (рис. 1).

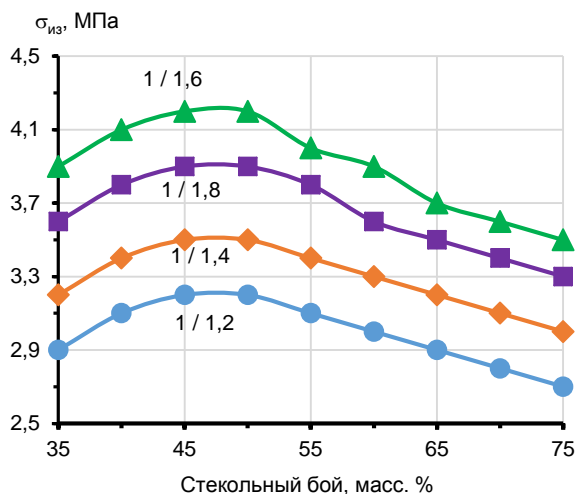


Рис. 1. Зависимость прочности на изгиб композиционного материала от состава сырьевой смеси (цифры на кривых — соотношения полистирол / метиленхлорид)

Данная зависимость объясняется тем, что с увеличением количества растворителя вязкость раствора связующего снижается, поэтому в результате перемешивания может быть получена более однородная смесь с хорошей формуемостью, которая позволит при прессовании достичь более высокой степени уплотнения. Это способствует формированию в объеме образцов однородного каркаса из частиц наполнителя, связанных между собой через слои связующего с толщиной, обеспечивающей высокую прочность связи между частицами и прочность всего образца в целом. В то же время при соотношении полистирол : метиленхлорид, равном 1 : 1,8, в растворе связующего наблюдается избыток растворителя, что приводит к излишней текучести раствора, возможной перепрессовке образцов, снижающей их прочность из-за напряжений при прессовании и после снятия нагрузки, а также к недостатку связующего в объеме материала, что не позволяет создать слои связующего с эффективными для создания прочного каркаса толщиной и площадью контакта с частицами стекольного боя.

Из полученной для прочности на изгиб зависимости также следует, что рассматриваемое свойство повышается при увеличении количества наполнителя в составе сырьевой смеси до 45—50 масс. %, а при более высоком содержании стекольного боя прочность на изгиб начинает снижаться. Рост прочности на изгиб связан с эффективным заполнением объема материала частицами наполнителя, которые выполняют упрочняющую функцию за счет создания внутри образцов упомянутого каркаса. Снижение прочности происходит при избытке наполнителя, который возникает при 55—75 масс. % стекольного боя от состава сырьевой смеси и приводит к недостатку связующего, проявляющемуся не только в уменьшении толщины слоев связующего, но и в появлении частиц

наполнителя, несвязанных с другими частицами через слои связующего. Это снижает прочность и нарушает целостность каркаса из частиц наполнителя, что проявляется в уменьшении прочности образца, в осыпании его ребер и поверхностных слоев.

По результатам исследования зависимости для водопоглощения установлено, что при соотношениях полистирол : метиленхлорид от 1 : 1,2 до 1 : 1,6 водопоглощение снижается (рис. 2), а при соотношении 1 : 1,8 и с увеличением количества наполнителя значения данного свойства повышаются.

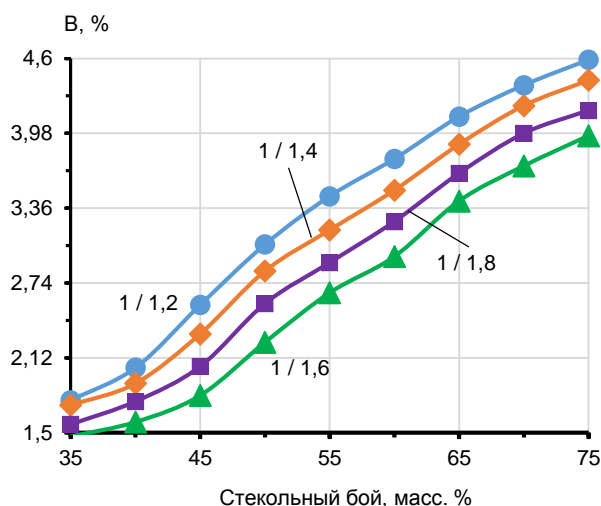


Рис. 2. Зависимость водопоглощения композиционного материала от состава сырьевой смеси (цифры на кривых — соотношения полистирол / метиленхлорид)

Полученная зависимость объясняется тем, что частицы стекольного боя характеризуются практически полным отсутствием микропористости, а следовательно, проникновение воды внутрь образца возможно только через открытые поры между частицами наполнителя. Как уже упоминалось, при увеличении количества метиленхлорида образуется более однородная структура материала с высокой степенью уплотнения, что снижает количество пор и уменьшает их размер, способствуя снижению водопоглощения. Недостаток связующего, возникающий при соотношении полистирол : метиленхлорид, равном 1 : 1,8, и повышение количества наполнителя приводят к увеличению количества пор и увеличению их размеров, что, в свою очередь, приводит к росту водопоглощения.

В связи с полученными зависимостями было принято решение при дальнейших экспериментах применять раствор связующего с соотношением полистирол : метиленхлорид, равным 1 : 1,6, для получения максимальных значений прочности и минимальных значений водопоглощения.

На втором этапе экспериментальных исследований изучены зависимости основных свойств разрабатываемого материала от количества наполнителя в составе сырьевой смеси. Как следует из полученных данных, общая и открытая пористости повышаются с увеличением количества стекольного боя во всем

исследуемом интервале, закрытая пористость повышается при увеличении содержания наполнителя до 40–45 масс. %, а с дальнейшим повышением количества стеклового боя начинает снижаться (рис. 3).

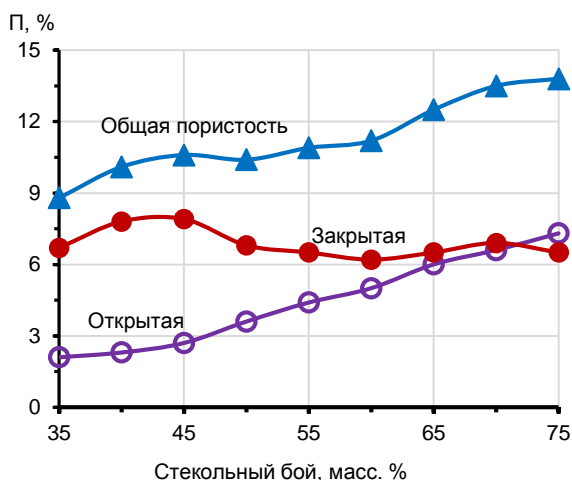


Рис. 3. Зависимость пористости композиционного материала от содержания стеклобоя в составе сырьевой смеси

Повышение пористости в интервале от 35 до 45 масс. % от состава сырьевой смеси объясняется неидеальной адгезией между связующим и наполнителем и неправильной формой частиц стеклового боя, которые приводят к образованию пор в местах контакта полистирола с поверхностью частиц наполнителя. Кроме того, при кипении и улетучивании растворителя происходит образование пор в объеме и на поверхности слоев связующего. При увеличении количества наполнителя свыше 45 масс. % от количества сырьевой смеси наблюдается недостаток связующего, которое заполняет всё меньший объем пор и пустот в материале. При этом закрытая пористость снижается, т. к. связующего оказывается недостаточно для создания сплошных слоев полистирола и закрытые при меньшем количестве наполнителя поры становятся открытыми. Всё это способствует снижению прочности, росту водопоглощения, что отмечено на первом этапе исследований в данной работе.

По результатам экспериментов также установлено, что плотность материала с увеличением количества наполнителя повышается (см. рис. 4). Это связано с тем, что несмотря на повышение пористости материала, средняя плотность оконного стекла (2500–2600 кг/м<sup>3</sup>) существенно выше средней плотности полистирола (1040–1060 кг/м<sup>3</sup>).

Зависимость для прочности на сжатие, как и для прочности на изгиб, имеет выраженный максимум, соответствующий 45 масс. % стеклового боя от количества сырьевой смеси (см. рис. 4). Как и в случае с прочностью на изгиб, данный максимум объясняется недостатком связующего при более высоком содержании наполнителя.

Из рис. 5 видно, что с увеличением количества стеклового боя в составе смеси происходят снижение морозостойкости и увеличение теплопроводности.

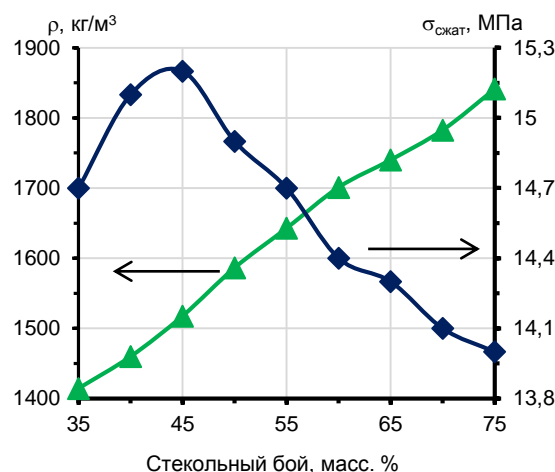


Рис. 4. Зависимость плотности и прочности на сжатие композиционного материала от содержания стеклового боя в составе сырьевой смеси

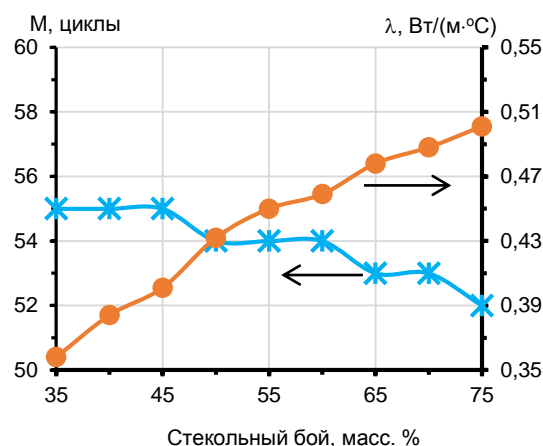


Рис. 5. Зависимость морозостойкости и теплопроводности композиционного материала от содержания стеклового боя в составе сырьевой смеси

Уменьшение морозостойкости связано с повышением водопоглощения, которое, в свою очередь, связано с увеличением открытой пористости. Вода, проникающая в открытые поры, при отрицательных температурах превращается в лед и увеличивается в объеме, что создает напряжение внутри открытых пор в материале. Чем больше открытых пор и проникающей в них воды, тем выше напряжение и тем меньшее количество циклов замораживания-оттаивания может выдержать материал без разрушения. Повышение теплопроводности материала происходит из-за того, что средняя теплопроводность оконного стекла (0,65–0,76 Вт/(м·°C)) существенно выше средней теплопроводности полистирола (0,09 Вт/(м·°C)), а пористости материала недостаточно для значительного снижения рассматриваемого свойства.

На основании экспериментальных результатов для получения разрабатываемого материала выбрано содержание стеклового боя, равное 45 масс. % от состава сырьевой смеси. Свойства разрабатываемого материала при данном количестве наполнителя представлены в таблице.



Свойства облицовочного композиционного материала

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	В, %	Пот, %	Пзак, %	Поб, %	$\sigma_{сжат}$ , МПа	$\sigma_{из}$ , МПа	М, циклы	$\lambda$ , Вт/(м·°С)
1517,6	1,81	2,7	7,9	10,6	15,2	4,2	55	0,401

Из таблицы следует, что в результате данной работы получен композиционный материал, который характеризуется низким водопоглощением, относительно высокой морозостойкостью и средними для строительных материалов значениями плотности, прочности и теплопроводности.

### Заключение

В результате выполнения исследований разработан состав сырьевой смеси, включающий 45 масс. % стекольного боя в качестве наполнителя и раствор связующего, в котором соотношение полистирол : метиленхлорид составляет 1 : 1,6. Данный состав позволяет получить композиционный материал со степенью наполнения 64,3 масс. %.

Полученный материал отличается низким водопоглощением, соответствует требованиям ГОСТ 530-2012 для лицевых изделий по морозостойкости (не менее 50 циклов) и может быть отнесен к марке F50, а также соответствует требованиям ГОСТ 530-2012 для полнотелых керамических кирпичей и камней марки М150 по прочности на сжатие (15 МПа) и изгиб (2,8 МПа). Теплопроводность материала позволяет использовать его для получения условно эффективной по теплотехническим характеристикам кладки в соответствии с ГОСТ 530-2012 ( $\lambda = 0,36—0,46$  Вт/(м·°С)). Плотность материала относится к классу 2,0 в соответствии с ГОСТ 530-2012.

Таким образом, разработанный материал соответствует требованиям для лицевых полнотелых керамических кирпичей и камней. Кроме того, полученный материал сравним по всем рассмотренным свойствам с предыдущими разработками автора данной статьи по получению облицовочных композиционных материалов на вторичных полимерных связующих с вторичными алюмосиликатными наполнителями (стекольный бой, кирпичный бой) [12, 15]. Следовательно, полученный материал при отсутствии высоких механических нагрузок может быть применен в качестве облицовочного материала для зданий и сооружений.

Разработанный состав сырьевой смеси и полученный на ее основе композиционный материал могут способствовать дополнительному расширению ассортимента облицовочных строительных изделий и позволят комплексно утилизировать стекольные и полимерные отходы в качестве функциональных добавок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З. Использование отходов цветной металлургии в производстве кислотоупоров без применения природного традиционного сырья // Экология промышленного производства. 2014. № 2. С. 13—16.
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(95). С. 14—17.
3. Фоменко А. И. Использование техногенного сырья в производстве строительных материалов // Вестник вологодского государственного университета. 2015. № 1. С. 17—21.
4. Усов Б. А., Окольников Г. Э., Акимов С. Ю. К вопросу состояния инновационных направлений развития производства строительных материалов из отходов промышленности // Экология и строительство. 2017. № 1. С. 14—25.
5. Чулкина И. Л., Пастушенко И. В., Парфёнов А. С. Строительные композиты на основе местного техногенного сырья // Технологии бетонов. 2014. № 3(92). С. 12—13.
6. 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.
7. Никищечкин А. П., Барабошкин А. И. Моделирование и реализация автоматизированной системы подготовки и использования стеклобоя в производстве стеклотары // Промышленные АСУ и контроллеры. 2017. № 12. С. 10—15.
8. Бердюгин И. А. Теплоизоляционные материалы в строительстве. Каменная вата или стекловолокно: сравнительный анализ // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 1. С. 26—31.
9. Павлушкина Т. К., Кисленко Н. Г. Использование стекольного боя в производстве строительных материалов // Стекло и керамика. 2011. № 5. С. 27—34.
10. Баранов Е. В., Шелковникова Т. И., Черкасов С. В., Пряженцева Е. А. Стеклобой — техногенное сырье для производства строительных материалов // Высокие технологии в строительном комплексе. 2018. № 1. С. 38—42.
11. 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.
12. 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.
13. Колосова А. С., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Теплоизоляционный композиционный материал на основе древесных и полимерных отходов // Экология и промышленность России. 2020. № 2. С. 28—33.
14. Шинский О. И., Стрюченко А. А., Дорошенко В. С. Два направления в области рециклинга отходов пенополистирола // Экологический вестник России. 2012. № 12. С. 45—49.
15. Уварова А. С., Виткалова И. А., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Влияние кирпичного боя на свойства облицовочного композиционного материала на основе вторичного полимерного связующего // Экология промышленного производства. 2021. № 2. С. 13—17.
16. Перовская К. А., Петрина Д. Е., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Применение полимерных отходов для повышения энергоэффективности стеновой керамики // Экология промышленного производства. 2019. № 1. С. 7—11.
17. Каблуков В. И., Тороян Р. А. Переработка отходов пластмасс в строительный материал // Экология и промышленность России. 2007. № 1. С. 20—21.

## Polymer-glass construction material based on waste

E. S. PIKALOV

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

*This article presents the results of the development of the composition of the raw material mixture for the production of a building composite material, in which the dispersed filler is a cullet, and the binder is a secondary polystyrene. Secondary polystyrene is proposed to be obtained by dissolving polystyrene foam products in methylene chloride, followed by mixing the solution with the filler, pressing and heat treatment to remove the solvent. The paper presents the dependences of the main properties of the material on the ratio of the components in the composition of the raw material mixture with the choice of composition for obtaining a material that meets the requirements for facing products for buildings and structures.*

**Keywords:** polymer waste, cullet, recycling of wastes, polymer composite material, cladding material, polymer dissolution, methylene chloride.

Bibliography — 17 references.

Received September 10, 2021

УДК 665.775.4

DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_1\_13

## Снижение нагрузки на окружающую среду с утилизацией нефтешламов на дорожный битум

А. Н. БОРАНБАЕВА; А. К. СЕРИКБАЕВА, канд. техн. наук; Е. И. ИМАНБАЕВ;  
А. Ч. БУСУРМАНОВА, канд. хим. наук; А. Ш. АККЕНЖЕЕВА, канд. техн. наук  
Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова,  
г. Актау, Мангистауская обл., Казахстан

*Исследованы нефтешламы с различных объектов нефтяных месторождений Мангистауской области в качестве частичного заменителя битумной основы при получении модифицированных битумов.*

**Ключевые слова:** нефтешлам, дорожный битум, модификация, модификаторы, утилизация нефтешламов.

Из отходов, образующихся на предприятиях, самые экологически опасные — нефтешламы, которые накапливаются в резервуарах и являются существенной нагрузкой для окружающей среды не столько своим существованием, сколько расширяющимся масштабом их образования. При естественном испарении влаги в открытых атмосферных шламонакопителях-резервуарах на месторождении, удаляется жидкотекучая и легкая части нефтешлама. В итоге образуется вязкая, липкая паста с различной степенью пластичности, на поверхность которой садится песчаная пыль, что в дальнейшем создает определенные трудности при переработке [1]. В зависимости от происхождения нефтешламы могут отличаться по составу. Нефтяные шламы — это смесь нефтепродуктов, механических примесей и воды [2, 3]. Они имеют особую ценность как важный вид вторичного сырья для использования в различных отраслях хозяйственной деятельности, что позволяет кардинально снизить экологическую нагрузку в районах нефтепереработки, нефтедобычи. При интенсивном развитии технология переработки отходов нефтепроизводства приведет к рациональному использованию природных ресурсов [4]. При переработке нефтеотходов, утилизации и нейтрализации высокотоксичных отходов, в первую очередь образующихся на крупных месторождениях и на предприятиях нефтепереработки, в городах возникает проблема экологической безопасности, так как нефтешламы являются огромной нагрузкой для окружающей среды. Выбор технологии и адаптация технологии для

определенного региона или территории во многом определяются логистической доступностью источников вторичного сырья и наличием потребителей, морфологическим и количественным составом образующихся отходов [4, 5]. Широкое применение нефтешламов делает не только возможным сокращение расхода видов традиционного сырья, используемого в дорожном строительстве (битума и нефти), но и позволяет получать в строительной отрасли материалы с более высокими физико-механическими свойствами [6].

В результате возникает необходимость проведения сравнительного мониторинга и анализа направлений применения нефтеотходов для выявления граничных условий и основных факторов, позволяющих определить пригодность нефтешламов для использования в качестве сырья для дорожных битумов. Актуальным является изучение способа получения битумов с использованием нефтешламов.

Предметом исследования является использование нефтешламов в качестве сырья для получения модифицированного битума.

### Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования использовали нефтешламы месторождения Узень (рис. 1, а) и Жетибай Мангистауской области (рис. 1, б). Определены физико-химические характеристики нефтешламов (НШ), отобранных с различных месторождений. Результаты анализов приведены в табл. 1.

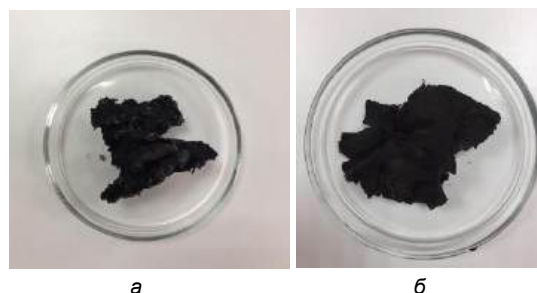


Рис. 1. Образцы нефтешламов месторождений Узень (а) и Жетибай (б)

Боранбаева Асия Нурлыбаевна, докторант.

E-mail: assiya.borانبayeva@yu.edu.kz

Серикбаева Акмарал Кабылбековна, профессор.

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

Иманбаев Ержан Иманбаевич, начальник отдела науки и предпринимательства, PhD.

E-mail: yerzhan.imanbayev@yu.edu.kz

Бусурманова Аккенже Чанчаровна, доцент.

E-mail: akkenzhe.bussurmanova@yu.edu.kz

Аккенжеева Анар Шнабаевна, доцент.

E-mail: anar.akkenzheyeva@yu.edu.kz

Статья поступила в редакцию 9 ноября 2021 г.

© Боранбаева А. Н., Серикбаева А. К., Иманбаев Е. И.,  
Бусурманова А. Ч., Аккенжеева А. Ш., 2022

Таблица 1

Физико-химические характеристики нефтешлама месторождений Узень и Жетибай

Наименование показателя	Нефтешлам месторождений Узень	Нефтешлам месторождений Жетибай	Метод испытания
Содержание воды, масс. %	0,3	38,9	ГОСТ 2477
Содержание органической части (углеводородов), масс. %, из них:	68,9	31,4	ГОСТ 11851
• парафинов, масс. %;	16,0	22,5	
• асфальто-смолистых веществ, масс. %;	11,6	8,9	
• других углеводородов, масс. %	41,3	—	
Содержание солей, растворимых в воде, масс. %	23,7	23,4	—
Содержание механических примесей, масс. %	7,1	37,8	ГОСТ 6370

По данным табл. 1, нефтешлам с месторождений Узень в основном состоит из органической части (углеводородов — 68,9 %), включающей 16,0 масс. % парафинов и 11,6 масс. % асфальто-смолистых веществ (обводненность 0,3 %), растворимых в воде солей (23,7 масс. %). Содержание механических примесей 7,1 масс. %. Они включают мелкозернистый песок и продукты коррозии. Содержание воды умеренное (0,3 масс. %). Она испаряется во время перекачки в установку модификации битума. В составе нефтешлама месторождения Жетибай преобладают механические примеси (37,8 %) и вода (38,9 %). Содержание нефти составляет 31,4 масс. %, из которых 22,5 масс. % парафинов и 8,9 масс. % асфальто-смолистых веществ. Содержание хлористых солей 2339,4 мг/дм<sup>3</sup>. Наличие солей в нефти вызывает особенно тяжелые и разнообразные осложнения при переработке. Происходит засорение аппаратуры. Соли откладываются главным образом в горячей аппаратуре. Растворенные в воде соли выделяются при испарении воды. Часть выкристаллизовавшихся солей прилипает к этим поверхностям, оседая в виде прочной корки. Иногда эти соляные корки отламываются, извлекаются потоком нефти и осаждаются в последующей аппаратуре.

В настоящем исследовании для приготовления модифицированного битума был использован битум марки БНД 100/130 производства ТОО "СП "CASPI BITUM". Характеристика битума "нефтяной дорожный" марки БНД 100/130 приведена в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика битума "нефтяной дорожный" марки БНД 100/130

Наименование показателя	Фактические значения	Метод испытания
Температура размягчения по кольцу и шару (КиШ), °С	44,0	СТ РК 1227
Пенетрация при температуре 25 °С, 10 <sup>-1</sup> мм	118,0	СТ РК 1226
Пенетрация при температуре 0 °С, 10 <sup>-1</sup> мм	31,0	
Растяжимость при температуре 25 °С, см	>150	СТ РК 1374
Температура хрупкости по Фраасу, °С	-22	СТ РК 1229
Температура вспышки, °С	280,0	СТ РК 1804
Индекс пенетрации	-0,6	

Для подготовки модифицированного битума экспериментально подбирается соотношение битум/нефтешлам (НШ)/модификатор (СБС). Для этого в смесь битума БНД 100/130 добавляют нефтешлам

(нефтешлам применяют в обычном виде и не требуется предварительной подготовки) и полимер.

Эксперимент проводили на установке, схема которой приведена на рис. 2.

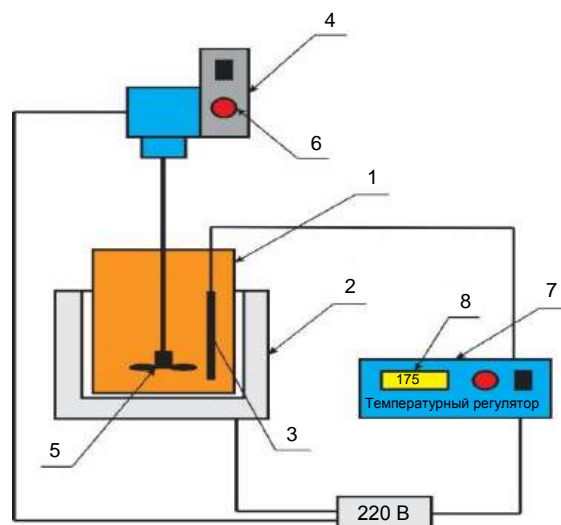


Рис. 2. Схема установки модификации битума

Установка состоит из цилиндрического реактора 1 длиной 20 см с внутренним диаметром 15 см. Реактор нагревается с помощью электрической печи 2. Для определения и поддержки температуры в реакторе имеется термометр, который подключен к температурному регулятору 3. Скорость перемешивания битума с полимером регулируется с помощью мешалки 4. Мешалка состоит из металлического пропеллера 5, регулятора скорости вращения пропеллера 6. Регулировку нагрева осуществляют увеличением напряжения питания печи через температурный регулятор 7. Температура процесса представлена на цифровом дисплее 8.

Навеска битума составляла в среднем 200 г. Для проведения анализа пробоподготовка проходила в следующем порядке. Перед проведением процесса модификации образец битума расплавляли до подвижного состояния (при температуре не выше 105 °С) и медленно добавляли нефтешлам. Затем полимер добавляли в битум и нефтешлам, смесь нагревали при постоянном перемешивании до однородного состояния. Температура поддерживалась в пределах 165—170 °С. Материалы смешивались от 60 до 180 мин, в зависимости от вида модификатора.

В результате проведенных экспериментов были получены образцы модифицированных битумов из битума марки БНД 100/130 и двух образцов



нефтешлама. В качестве модификатора использовали готовый высокоэластичный полимер СБС-01-10 (стирол—бутадиен—стирол) и латекс готовой эмульсии. Подготовка модифицированного битума из обычного битума происходит в результате добавления в него искусственных полимеров, улучшающих его свойства. Одним из самых распространенных полимеров, используемых для модификации битума, является стирол—бутадиен—стирол (СБС). При введении данного модификатора в битум полимер-битумная смесь становится мягкой и более гибкой при низкой температуре и более вязкой при высокой. Соответственно адгезия модифицированного битума увеличивается.

В качестве модификатора постепенно и равномерно вводится латекс. Скорость введения модификатора зависит от того, как интенсивно будет испаряться вода. При большей скорости ввода вода, которая содержится в латексах, может образовывать пласт пены на поверхности битума. Согласно результатам проведенных ранее исследований [7] выбрана температура диспергирования 170 °С в течение 180 мин (при модификации битума менее 180 мин не полностью растворяется высокомолекулярное соединение) и 60 мин при добавлении полимерного латекса.

В целях проверки соответствия полученного модифицированного битума требованиям нормативной документации проведен комплексный анализ полученных образцов модифицированных битумов с применением двух образцов нефтешлама и модификатора с учетом различного времени смешивания. Для всех образцов полученного модифицированного битума определены температура размягчения и глубина проникания иглы.

## Результаты и их обсуждение

В табл. 3 приведены физико-механические характеристики полученных образцов модифицированных битумов с модификатором СБС и нефтешламами месторождений Узень (НШ) и Жетибай (КЭГ).

Соотношение битум/шлам/модификатор выбирали в зависимости от типа модификатора и характеристик битума, которые нуждаются в улучшении. Полимер СБС как лучшую добавку к битуму применяли при подготовке образцов модифицированных битумов в соотношении 100/5. Путем изменения процентного отношения битум:нефтешлам было подобрано оптимальное соотношение битума к нефтешламу при постоянном значении модификатора. Испытания на температуру размягчения битумов и глубину проникания иглы были проведены на всех образцах.

Результаты испытаний показали, что из полученных образцов полимерно-модифицированных битумов (ПМБ) с нефтешламом из месторождений Узень при соотношении 75/25/5 (БНД100/130/НШ/СБС) соответствует фактическим показателям полимерно-модифицированного битума ПМБ 70/100 (пенетрация при температуре 25 °С составляет  $86 \cdot 10^{-1}$  мм, температура размягчения по кольцу и шару 63 °С), который отвечает требованиям по СТ РК 2534-2014.

Таким образом оптимальное соотношение битум/шлам выбрано равным 75/25 и 80/20. Увеличение количества добавляемого нефтешлама до 30 % и более не привело к положительным результатам, так как результаты анализа не соответствуют требованиям по СТ РК 2534-2014.

Также проведены исследования по подбору оптимального соотношения битум/шлам/полимер (табл. 4).

Таблица 3

Характеристика модифицированного битума с модификатором СБС

Наименование показателя	Подготовка модифицированного битума					Метод испытания
	БНД100/130/НШ/СБС					
Процентное соотношение	60/40/5	65/35/5	70/30/5	75/25/5	80/20/5	
Температура размягчения по КиШ, °С	59,0	46,0	58,0	63,0	71,0	СТ РК 1227
Пенетрация при температуре 25 °С, 10 <sup>-1</sup> мм	40,0	96,0	100,0	86,0	87,0	СТ РК 1226
	БНД100/130/КЭГ/СБС					
Температура размягчения по КиШ, °С	85,0	78,0	73,65	73,0	57,0	СТ РК 1227
Пенетрация при температуре 25 °С, 10 <sup>-1</sup> мм	46,0	51,0	57,0	61,0	79,30	СТ РК 1226

Примечание: БНД — битум нефтяной дорожный; НШ — нефтешлам; КЭГ — комплексный экологический замазученный грунт; СБС — стирол—бутадиен—стирол.

Таблица 4

Подбор оптимального соотношения битум/шлам/полимер

Наименование показателя	Подготовка модифицированного битума			Метод испытания
	БНД100/130/НШ/СБС			
Процентное соотношение	75/25/5	75/25/4	75/25/3	
Температура размягчения по КиШ не ниже, °С	63,00	57,20	51,00	СТ РК 1227
Пенетрация при температуре 25 °С, 10 <sup>-1</sup> мм	86,00	81,00	69,00	СТ РК 1226

Нефтешлам месторождений Жетібай (КЭГ) диспергировали в течение 180 мин при температуре 165—170 °С. Полученные образцы полимерно-модифицированных битумов по показателям соответствуют марке полимерно-модифицированного битума ПМБ 35/50 (табл. 3) при соотношении 80/20/5.

Таким образом, оптимальное соотношение битум/шлам выбрано равным 80/20. Также проведены исследования по подбору оптимального соотношения битум/шлам/полимер (табл. 5).

Как видно из табл. 5, оптимально соотношение 80/20/5, так как результаты анализа соответствуют требованиям по СТ РК 2534-2014.

Таким образом, на данной установке при температуре 165—170 °С с модификатором СБС можно получать полимерно-модифицированный битум марок ПМБ 35/50, ПМБ 70/100. Это подтверждает, что предложенный способ получения модифицированного битума предпочтительнее других известных способов.

Технические характеристики полученных образцов модифицированных битумов с модификатором латекс приведены в табл. 6.

Результаты испытаний показали, что из полученных образцов полимерно-модифицированных битумов с нефтешламом из месторождений Узень при

соотношении 80/20/5 (БНД100/130/НШ/латекс) отвечает фактическим показателям полимерно-модифицированного битума ПМБ 50/70, который соответствует требованиям по СТ РК 2534-2014.

Оптимальное соотношение битум/шлам/латекс выбрано равным 80/20/5. Также проведены исследования по подбору оптимального соотношения битум/шлам/латекс (табл. 7).

Из анализа результатов исследований видно, что уменьшение содержания полимера приводит к значительному ухудшению большинства показателей. В частности, глубина проникновения иглы при 25 °С увеличивается, растяжимость при 25 °С находится в пределах от 142 до 145 см. Температура размягчения по КиШ варьируется в пределах от 40 до 71 °С. Температура хрупкости находится в пределах нормы.

По физико-механическим характеристикам приходим к выводу, что для полимер-модифицированных битумов с содержанием нефтешлама до 25 % и полимера 1—5 % достигается наиболее оптимальное соотношение всех показателей.

Таким образом, анализ выполненных работ показал, что из образцов нефтешлама месторождений Узень и Жетібай можно получать полимерно-модифицированные битумы различных марок, такие как ПМБ 100/130, ПМБ 70/100, ПМБ 50/70, ПМБ 35/50.

Таблица 5

Подбор оптимального соотношения битум/шлам/полимер

Наименование показателя	Подготовка модифицированного битума			Метод испытания
	БНД100/130/КЭГ/СБС			
Процентное соотношение	80/20/5	80/20/4	80/20/3	
Температура размягчения по КиШ, °С	71,80	51,20	49,85	СТ РК 1227
Пенетрация при температуре 25 °С, 10 <sup>-1</sup> мм	52,0	82,60	66,0	СТ РК 1226
Растяжимость при 25 °С, см	72,0	69,0	65,55	СТ РК 1374
Температура хрупкости по Фраасу, °С	-19,4	-18,2	-20,1	СТ РК 1229

Таблица 6

Характеристика полимерно-модифицированного битума на основе латекса

Наименование показателя	Подготовка модифицированного битума					Метод испытания
	БНД100/130/НШ/латекс					
Процентное соотношение	60/40/5	65/35/5	70/30/3	75/25/5	80/20/5	
Температура размягчения по КиШ, °С	38,0	40,0	42,0	47,0	71,0	СТ РК 1227
Пенетрация при температуре 25 °С, 10 <sup>-1</sup> мм	143,0	150,0	195,0	157,0	68,0	СТ РК 1226

Таблица 7

Подбор оптимального соотношения битум/нефтешлам/латекс

Наименование показателя	Подготовка модифицированного битума			Метод испытания
	БНД100/130/НШ/латекс			
Процентное соотношение	80/20/5	80/20/3	80/20/1	
Температура размягчения по КиШ не ниже, °С	71,00	40,0	47,2	СТ РК 1227
Пенетрация при температуре 25 °С, 10 <sup>-1</sup> мм	68,0	106,3	102,6	СТ РК 1226
Растяжимость при 25 °С, см	142,0	более 150	35,5	СТ РК 1374
Температура хрупкости по Фраасу, °С	-23,7	-23,7	-18,5	СТ РК 1229
БНД100/130/КЭГ/латекс				
Процентное соотношение	80/20/5	80/20/3	80/20/1	
Температура размягчения по КиШ, °С	56,9	45,6	41,7	СТ РК 1227
Пенетрация при температуре 25 °С, 10 <sup>-1</sup> мм	79,3	88,0	106,3	СТ РК 1226
Растяжимость при 25 °С, см	145,0	86,5	142,2	СТ РК 1374
Температура хрупкости по Фраасу, °С	-19,2	-20,2	-19,4	СТ РК 1229

## Вывод

Проведено исследование применения нефтешламов в целях получения модифицированных битумов с добавлением полимеров. Экспериментально установлено, что образцы полимер-модифицированных битумов с модификатором СБС немного уступают модификатору латекс по отдельным параметрам. Однако следует отметить, что значения параметров рассматриваемых образцов полимерно-модифицированных битумов лучше соответствуют допустимым значениям, установленным в СТ РК 2534-2014.

Немаловажным достоинством получаемого подобным путём битума является экономическая целесообразность его производства. Содержание нефтешлама в полимерно-модифицированных битумах в пределах 15—20 % принято считать экономически целесообразным. Поскольку же в испытаниях полимер-модифицированных битумов оптимальное содержание нефтешлама определено в пределах 20—25 %, их применение можно считать экономически оправданным.

*Исследование финансируется Комитетом науки  
Министерства образования и науки  
Республики Казахстан (грант № AP08856022).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иманбаев Е. И., Серикбаева А. К., Бусурманова А. Ч., Ибрашева Д. Б., Елдосова А. Е. К вопросу применения нефтешламов при модификации битума: мат. Междунар. науч.-практ. конф. "Наука и образование: теория и практика". 18 декабря 2020 г. — Нефтекамск, 2020. С. 56—60.
2. Черных О. В., Пурыгин П. П., Котов С. В., Шаталов И. Ф., Шарипова С. Х., Мадумарова З. Р. Исследование возможности получения дорожного битума путем окисления нефтешламов // Изв. Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11. № 1. С. 233—236.
3. Лофлер М., Шелегов В. Г., Слободчикова Н. А. Направления использования нефтешламов в дорожном строительстве // Изв. вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2018. Т. 8. № 4. С. 98—104.
4. Гохман Л. М., Гурарий Е. М., Давыдов А. Р., Давыдова К. И. Полимерно-битумные вяжущие материалы на основе СБС для дорожного строительства. — М.: Информавтодор, 2002. Вып. 4. — 112 с.
5. Котов С. В., Леванова С. В., Мадумарова З. Р. Влияние группового углеводородного состава гудронов на физикохимические свойства битумов // Нефтехимия. 2008. Т. 48. № 1. С. 45—49.
6. Шипигузов Л. М., Герин Ю. Г. Возможные методы комплексной переработки и утилизации нефтешламов: тр. Междунар. конф. "Актуальные проблемы экологической безопасности территорий и населения". — Пермь, 2000. С. 201—203.
7. Аккензеева А. Ш., Сыдыков С. У. Модифицирование битума с использованием стирол-бутадиен-стирольного блока сополимера // Yessenov Science J Yessenov Science Journal. 2018. № 1(33). С. 71—76.

## Reducing the burden on the environment with the disposal of oil sludge on road bitumen

A. N. BORANBAEVA, A. K. SERIKBAEVA, E. I. IMANBAEV, A. Ch. BUSURMANOVA,  
A. Sh. AKKENZHEEVA

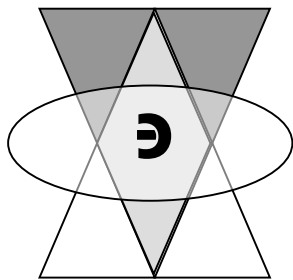
Caspian University of Technology and Engineering named after Sh. Yessenov,  
Aktau, Mangistau region, Kazakhstan

*Oil sludge from various objects of oil fields in the Mangistau region has been investigated as a partial substitute for the bitumen base when obtaining modified bitumen.*

**Keywords:** oil sludge, road bitumen, modification, modifiers, utilization of oil sludge.

Bibliography — 7 references.

Received November 9, 2021



# Водоподготовка и водоочистка

УДК 628.16:544.723

DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_1\_18

## Адсорбенты из отходов пищевой промышленности для очистки воды

**Е. Ю. РУДЕНКО**, д-р биол. наук; **Е. А. ЦАРЕВА**; **М. З. ДАВЛЯТШИНА**  
ФГБОУ ВО "Самарский государственный технический университет", г. Самара, Россия

**Е. С. ТЕМНИКОВА**  
МБОУ СОШ № 161, г. Самара, Россия

*Изучены возможности использования отходов пищевой промышленности в качестве адсорбентов для очистки воды. Исследования показали, что яблочные и виноградные выжимки, пивную дробину, отработанный кизельгур, подсолнечную лузгу можно использовать в качестве адсорбентов для очистки воды от синтетического органического красителя метиленового синего и сырой нефти. Для удаления из водных растворов метиленового синего предпочтительно использовать подсолнечную лузгу, а для очистки воды от сырой нефти лучше всего применять отработанный кизельгур.*

**Ключевые слова:** выжимки, дробина, кизельгур, лузга, вода, очистка, метиленовый синий, нефть.

Постоянно возрастающие масштабы антропогенного воздействия на окружающую среду, повышение требований к качеству сбрасываемой в водоемы и потребляемой человеком воды вызывают необходимость разработки эффективных способов ее очистки [1]. Одним из наиболее экологически безопасных и экономически выгодных способов удаления загрязнений из воды является ее сорбционная очистка. Преимущества сорбционного метода очистки воды: возможность удаления большого спектра загрязнений различной химической природы практически до любой остаточной концентрации независимо от хими-

ческой устойчивости загрязняющих веществ, отсутствие вторичных загрязнений и легкое управление процессом очистки [2].

Для очистки воды от различных загрязнений используют различные сорбенты с большой площадью поверхности, чаще всего активные угли [2]. Большинство исследователей стремятся заменить достаточно дорогой активный уголь на побочные продукты и отходы различных видов деятельности человека, таких, как сельское хозяйство и промышленность. Различные отрасли промышленности производят огромное количество отходов, которые трудно утилизировать, поэтому они загрязняют окружающую среду. Побочные продукты и отходы из-за больших объемов образования, особенностей химического состава и физических свойств создают множество проблем, связанных с их утилизацией. Некоторые из отходов и побочных продуктов промышленности и сельского хозяйства обладают большим потенциалом для применения в очистке воды и сточных вод от различных загрязнений [3]. Использование отходов в качестве недорогих адсорбентов, позволит частично сократить объем побочных продуктов или отходов. Кроме того, созданные дешевые адсорбенты смогут снизить загрязнение воды при разумных затратах на их производство и осуществление процесса очистки.

Цель исследования — изучение возможности использования отходов пищевой промышленности в качестве адсорбентов для очистки воды.

---

**Руденко Елена Юрьевна**, доцент, профессор кафедры "Технология пищевых производств и биотехнология".

E-mail: e\_rudenko@rambler.ru

**Царева Елена Алексеевна**, студентка 3-го курса факультета пищевых производств.

E-mail: elena.tsareva.978@mail.ru

**Давлятшина Марьям Зефяровна**, студентка 3-го курса факультета пищевых производств.

E-mail: m.davlyatshina@mail.ru

**Темникова Елена Сергеевна**, учитель биологии и химии высшей категории.

E-mail: el.temnikova@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2021 г.

---

© Руденко Е. Ю., Царева Е. А., Давлятшина М. З.,  
Темникова Е. С., 2022



Задачи исследования — изучение гранулометрического состава яблочных и виноградных выжимок, пивной дробины, отработанного кизельгура и подсолнечной лузги, адсорбционной активности отходов пищевой промышленности по метиленовому синему, метиловому оранжевому и йоду, а также изучить влагоемкость и нефтеемкость различных отходов пищевой промышленности для оценки возможности и эффективности их использования в качестве адсорбентов для очистки воды от сырой нефти.

### Объекты и методы исследований

Объектами исследования являлись яблочные и виноградные выжимки, полученные в лаборатории "Бродильные процессы" ФГБОУ ВО "Самарский государственный технический университет", пивная дробина и отработанный кизельгур, полученные на одном из пивоваренных предприятий Самарской области, подсолнечная лузга, полученная в ЗАО "Самараагропромпереработка". Влажные отходы высушивали при температуре 105 °С в сушильном шкафу ЭКРОС до постоянной массы. Яблочные и виноградные выжимки измельчали на лабораторной мельнице, отработанный кизельгур растирали в фарфоровой ступке фарфоровым пестиком. Сухие отходы пищевой промышленности использовали для дальнейших исследований.

Анализ гранулометрического состава отходов проводили путем просеивания через сита различного калибра с диаметром ячеек от 0,5 до 2,5 мм по ГОСТ Р 51641-2000 [4]. Показатели адсорбционной активности отходов по метиленовому синему и метиловому оранжевому определяли по ГОСТ 4453-74 [5]. Определение адсорбционной активности по йоду проводили по ГОСТ 6217-74 [6]. Влагоемкость и нефтеемкость отходов определяли по ТУ 214-10942238-03-95 [2]. При проведении исследований использовали высокосернистую нефть средней плотности, полученную на ОАО "Оренбургнефть".

Эксперименты проводили в трехкратной повторности, исследования каждой пробы осуществляли в трех повторностях. Математическую обработку результатов проводили с применением программы Excel.

### Результаты исследований и их обсуждение

Результаты анализа гранулометрического состава отходов представлены на рис. 1. В составе яблочных выжимок преобладает фракция с размером частиц от 1,0 до 1,6 мм, составляющая 23,29 % данного вида отходов. Около 15 % яблочных выжимок составляют фракции, имеющие размер частиц менее 0,5, 0,5—0,8 и 1,6—2,0 мм. По 11—12 % приходится на фракции с размерами частиц 0,8—1,0 и 2,0—2,5 мм. Минимальная массовая доля, равная 8,22 %, обнаружена у фракции, имеющей частицы с размером более 2,5 мм.

В случае виноградных выжимок 21,47 и 20,05 % приходится на фракции, имеющие размер частиц 1,0—1,6 и 0,5—0,8 мм соответственно. В составе виноградных выжимок 13,76 и 15,57 % составляют фракции с размерами частиц 0,8—1,0 и менее 0,5 мм соответственно. От 11 до 12 % от массы всех исследованных виноградных выжимок составляют фракции частиц с размерами 1,6—2,0 и 2,0—2,5 мм. Наименее многочисленна фракция частиц с размерами от 2,0 до 2,5 мм, составляющая 6,74 % от массы всех исследованных виноградных выжимок.

В составе пивной дробины от 19,56 до 24,1 % приходится на фракции, имеющие размер частиц 1,0—1,6, 2,0—2,5 и более 2,5 мм. Немногом более 13 % пивной дробины составляет фракция с размером частиц от 1,6 до 2,0 мм. Около 8,5 % пивной дробины приходится на фракции, имеющие размер частиц 0,5—0,8 и 0,8—1,0 мм. Менее 5 % пивной дробины составлено фракцией с размерами частиц менее 0,5 мм.

В подсолнечной лузге преобладают крупные фракции, имеющие размер частиц 1,0 мм и более. Свыше 50 % подсолнечной лузги составляет фракция с размером частиц 2,5 мм и более. Около четверти подсолнечной лузги имеет размер частиц от 2,0 до 2,5 мм. Фракции, имеющие размер частиц 1,0—1,6 и 1,6—2,0 мм, составляют 5,6 и 17,8 % подсолнечной лузги соответственно. Фракции с размером частиц 0,8 мм и менее составляют не более 0,5 % подсолнечной лузги.

Гранулометрический анализ отработанного кизельгура не проводили, т. к. он представляет собой порошок, легко просеиваемый через сита с диаметром ячеек от 0,5 до 2,5 мм.

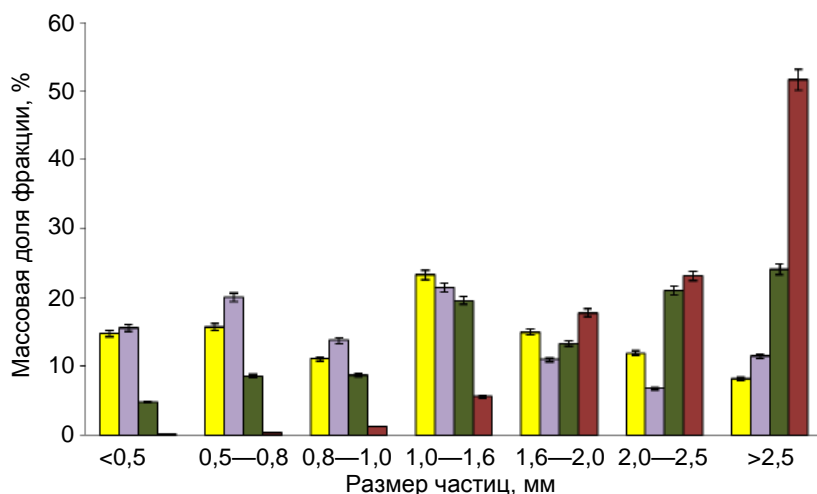


Рис. 1. Гранулометрический состав отходов:  
 ■ — яблочные выжимки; ■ — виноградные выжимки; ■ — пивная дробина;  
 ■ — подсолнечная лузга

Сравнение гранулометрического состава всех исследованных отходов показало, что наименьший размер частиц характерен для отработанного кизельгура, имеющего однородную пылевидную структуру. Крупные фракции с размерами частиц более 1 мм преобладают в составе подсолнечной лузги. Относительно равномерное распределение фракций с различными размерами частиц (от самых мелких до самых крупных) наблюдается в яблочных и виноградных выжимках, а также в пивной дробине.

Предварительные исследования адсорбционной способности различных фракций подсолнечной лузги и пивной дробины по метиленовому синему, метиловому оранжевому и йоду продемонстрировали, что показатель адсорбционной активности проявляет тенденцию к увеличению с уменьшением размера фракций. Различия в адсорбционной активности разных фракций не превышают по метиленовому синему десятых долей мг, по метиловому оранжевому — сотых долей мг на 1 г адсорбента, а по йоду — десятых долей %. С учетом полученных результатов и того, что отработанный кизельгур имеет однородную структуру и его нельзя разделить на фракции, принято решение исследовать отходы целиком без деления их на фракции.

Результаты исследований адсорбционных активностей отходов пищевой промышленности в отношении синтетических органических тиозинового красителя

метиленового синего и азокрасителя метилового оранжевого представлены на рис. 2.

Проведенные лабораторные опыты показали, что наибольшая адсорбционная способность, составляющая 29,67 мг/г, отмечена у подсолнечной лузги, а наименьшая, составляющая 13,0 мг/г, характерна для отработанного кизельгура. Пивная дробина и виноградные выжимки могут адсорбировать 25,92 и 24,25 мг/г метиленового синего соответственно. Виноградные выжимки способны адсорбировать 20,92 мг/г метиленового синего. Яблочные и виноградные выжимки, а также подсолнечная лузга проявляют примерно одинаковую адсорбционную активность в отношении метилового оранжевого, составляющую от 27,33 до 28,55 мг/г. Пивная дробина может адсорбировать 21,95 мг/г метилового оранжевого. Наименьшей способностью адсорбировать метиловый оранжевый (13,69 мг/г) обладает отработанный кизельгур.

Адсорбционная активность изученных отходов по йоду представлена на рис. 3. Наибольшую адсорбционную активность, равную 6,99 %, проявляет пивная дробина. Виноградные выжимки и подсолнечная лузга адсорбируют 5,08 и 5,40 % йода соответственно. Немного меньшую адсорбционную активность, равную 3,49 и 3,81 % йода, обнаруживают яблочные выжимки и отработанный кизельгур.

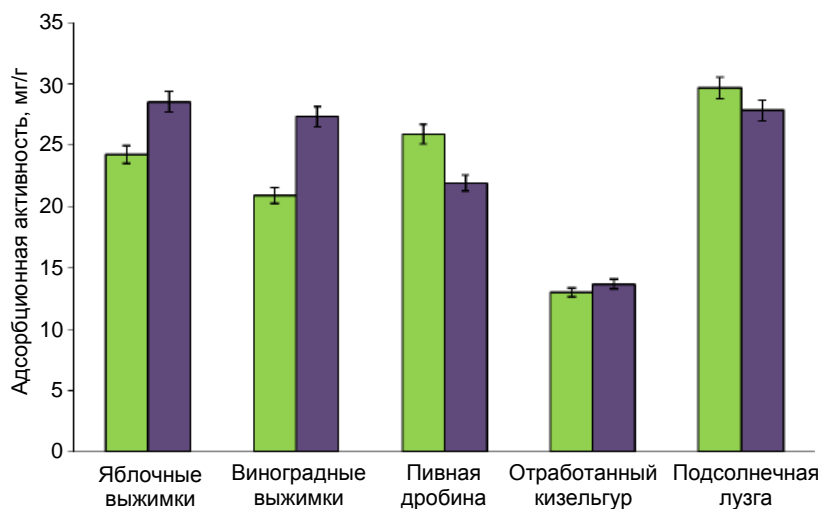


Рис. 2. Адсорбционная активность отходов по метиленовому синему и метиловому оранжевому:

■ — метиленовый синий;  
■ — метиловый оранжевый

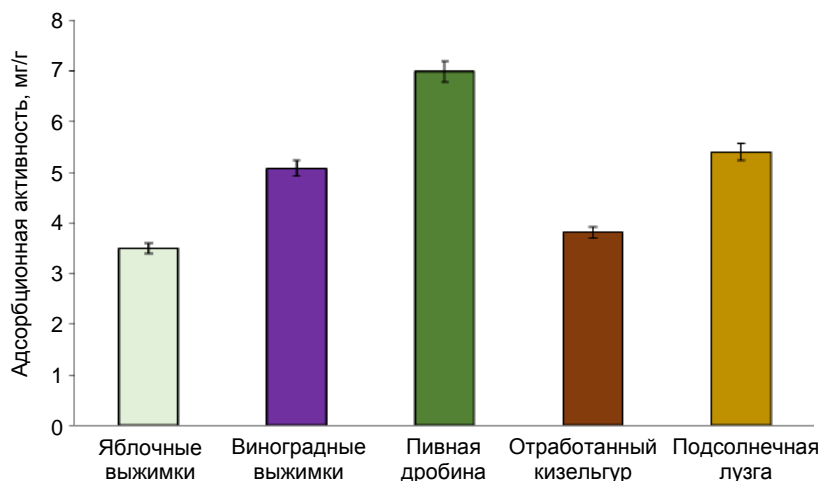


Рис. 3. Адсорбционная активность отходов по йоду

Сорбцию из водных растворов обычно определяют поры следующих минимальных размеров: по йоду и перманганату калия ~1,0 нм; по метиленовому синему — 1,5 нм; по эритрозину — 1,9 нм; по мелассе 2,8 нм [2]. Размеры молекул метилового оранжевого сопоставимы с размерами молекул метиленового синего. Результаты проведенных исследований показали, что в подсолнечной лузге, яблочных и виноградных выжимках преобладают поры, имеющие минимальный размер 1,5 нм. В пивной дробине преобладающими являются поры минимальных размеров около 1,0 нм. В отработанном кизельгуре обнаружено небольшое количество пор как с минимальными размерами около 1,0 нм, так и с минимальными размерами около 1,5 нм.

Согласно классификации сорбентов по пористой структуре [2] отработанный кизельгур является мезопористым сорбентом, а яблочные и виноградные выжимки, пивная дробина и подсолнечная лузга — гетеропористыми сорбентами, что подтверждают данные исследования адсорбционной активности изученных отходов по метиленовому синему, метиловому оранжевому и йоду.

Синтетический органический тиозиновый краситель метиленовый синий используют не только для оценки адсорбционной способности различных ад-

сорбентов. Его применяют в текстильной промышленности для окраски хлопка, шерсти и шелка [7]. Все исследованные отходы пищевой промышленности можно использовать в качестве адсорбентов для очистки воды от метиленового синего. Исследования показали, что у отработанного кизельгура адсорбцию метиленового синего, кроме самого диатомита, обеспечивают органические материалы (например, белки и клетки пивных дрожжей), уловленные в процессе фильтрации и содержащиеся в данном отходе пивоварения [8]. На пивной дробине, имеющей высокое содержание углерода и неоднородную морфологию с присутствием мезо- и макропор, метиленовый синий удерживается преимущественно за счет хемосорбции [7], которую можно описать моделями изотерм Ленгмюра и Фрейндлиха. Кинетику процесса адсорбции хорошо описывает модель псевдотортого порядка [9]. Вероятно, на других адсорбентах растительного происхождения, таких, как яблочные и виноградные выжимки, а также подсолнечная лузга, адсорбция метиленового синего происходит сходным образом.

Для оценки возможности и эффективности использования различных отходов пищевой промышленности в качестве адсорбентов для очистки воды от сырой нефти определяли их влагоемкость (рис. 4) и нефтеемкость (рис. 5).

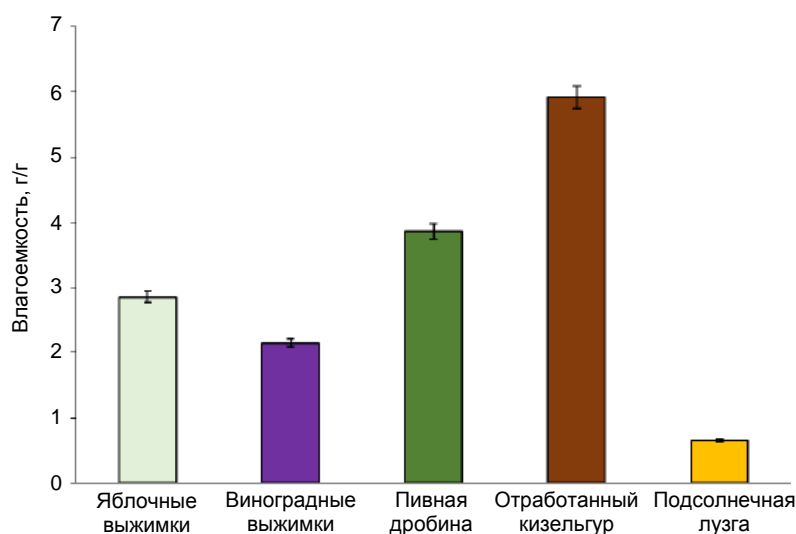


Рис. 4. Влагоемкость отходов

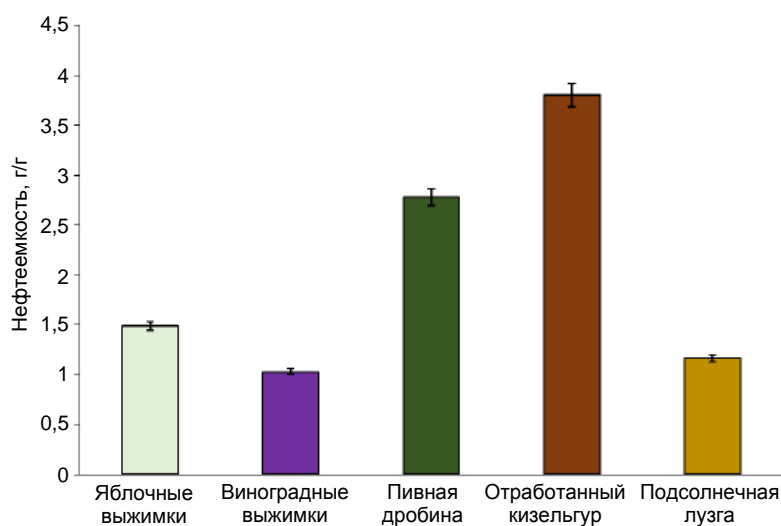


Рис. 5. Нефтеемкость отходов

Среди всех исследованных отходов наибольшей влагоемкостью, составляющей 5,92 г/г, обладает отработанный кизельгур. Кизельгур должен обладать хорошей смачиваемостью, т. к. его часто используют в качестве фильтрующего материала. Вещества, осевшие на кизельгур в процессе фильтрации пива, не повышают его гидрофобные свойства. Наименьшая влагоемкость, равная 0,65 г/г, обнаружена у подсолнечной лузги, что может быть обусловлено наличием в подсолнечной лузге относительно большого количества восков [10]. Влагоемкость пивной дробины составляет 3,86 г/г. Относительно высокую влагоемкость пивной дробины можно объяснить отсутствием в ее составе восков и воскоподобных веществ. Яблочные и виноградные выжимки способны поглотить 2,85 и 2,15 г/г воды соответственно. Плоды и ягоды многих растений снаружи покрыты восками и воскоподобными веществами, поэтому большой показатель влагоемкости виноградных выжимок может быть обусловлен относительно высоким содержанием в их составе кожицы ягод винограда по сравнению с относительно небольшим содержанием кожуры яблок в составе яблочных выжимок. Наибольшая нефтеемкость, равная 3,8 г/г, обнаружена у отработанного кизельгура, а наименьшая, равная 1,03 г/г, — у виноградных выжимок. Нефтеемкости подсолнечной лузги и яблочных выжимок немного выше, чем у виноградных выжимок, и составляют 1,03 и 1,49 г/г соответственно. Нефтеемкость пивной дробины, равная 2,78 г/г, на 1,02 г/г меньше, чем у отработанного кизельгура, но в 1,85—2,7 раз больше, чем у других исследованных отходов пищевой промышленности. Большую нефтеемкость отработанного кизельгура можно объяснить преобладанием в нем неорганических веществ, представленными в основном диоксидом кремния, а также мезопористой структурой адсорбента. Яблочные и виноградные выжимки, пивная дробина и подсолнечная лузга являются отходами растительного происхождения, т. е. гетеропористыми сорбентами. Пивная дробина обладает большей нефтеемкостью, возможно вследствие того, что при производстве пива из нее частично удалены водорастворимые вещества и таким образом увеличена пористость отхода, отвечающая за адсорбцию углеводородов сырой нефти.

### Заключение

Результаты проведенных исследований позволили сделать следующие выводы.

Исследованные отходы пищевой промышленности имеют различный гранулометрический состав: крупные частицы преобладают в подсолнечной лузге; относительно равномерное соотношение частиц

различных размеров выявлено в яблочных и виноградных выжимках, пивной дробине; наименьший размер частиц характерен для отработанного кизельгура, имеющего однородную пылевидную структуру.

Яблочные и виноградные выжимки, пивную дробину, отработанный кизельгур, подсолнечную лузгу можно использовать в качестве адсорбентов для очистки воды от синтетического органического тиозинового красителя метиленового синего и сырой нефти.

В отношении метиленового синего наибольшей адсорбционной активностью обладает подсолнечная лузга, а в отношении метилового оранжевого — яблочные выжимки, подсолнечная лузга и виноградные выжимки. Наименьшая адсорбционная активность по метиленовому синему и метиловому оранжевому отмечена у отработанного кизельгура.

Максимальную адсорбционную активность по йоду проявляет пивная дробина, а минимальную — яблочные выжимки.

Наибольшую влагоемкость и нефтеемкость выявлены у отработанного кизельгура. Наименьшей влагоемкостью обладает подсолнечная лузга, а нефтеемкостью — виноградные выжимки.

Для удаления из водных растворов синтетического органического красителя метиленового синего предпочтительно использовать подсолнечную лузгу, а для очистки воды от сырой нефти лучше всего применять отработанный кизельгур.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Другов Ю. С., Родин А. А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов: практическое руководство. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.
2. Каменщиков Ф. А., Богомолов Е. И. Нефтяные сорбенты. — М.—Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003.
3. Karlović A., Jurić A., Čorić N., Habschied K., Krstanović V., Mastanjević K. By-Products in the Malting and Brewing Industries—Re-Usage Possibilities // *Fermentation*. 2020. V. 6. I. 3. P. 82. <https://doi.org/10.3390/fermentation6030082>
4. ГОСТ Р 51641—2000 Материалы фильтрующие зернистые. Общие технические условия. — М.: Госстандарт России, 2001.
5. ГОСТ 4453—74 Уголь активный осветляющий древесный порошкообразный. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1993.
6. ГОСТ 6217-74 Уголь активный древесный дробленый. Технические условия. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003.
7. de Araújo T. P., de Oliveira Tavares F., Vareschini D. T., Barros M. A. S. D. Biosorption mechanisms of cationic and anionic dyes in a low-cost residue from brewer's spent grain // *Environmental technology*. 2021. V. 42. I. 19. P. 2925—2940.
8. Tsai W. T., Hsu H. C., Su T. Y., Lin K. Y., Lin C. M. Removal of basic dye (methylene blue) from wastewaters utilizing beer brewery waste // *J. of Hazardous Materials*. 2008. V. 154. P. 73—78.
9. Kezerle A., Velić N., Hasenay D., Kovačević D. Lignocellulosic materials as dye adsorbents: adsorption of methylene blue and congo red on brewers' spent grain // *Croatia Chemica Acta*. 2018. V. 91. I. 1 P. 53—64.
10. Руденко Е. Ю. Переработка отходов производства растительных масел: учеб. пособие. — Самара: Самарский государственный технический университет, 2018.



## Adsorbents from a waste of the food—processing industry for water treatment

*E. Yu. RUDENKO; E. A. TSAREVA; M. Z. DAVLYATSHINA*  
Samara State Technical University, Samara, Russia

*E. S. TEMNIKOVA*  
School № 161, Samara, Russia

*Studied possibilities of recovery of the food-processing industry as adsorbents for water treatment. Researches have shown that apple and grape spews, the beer spent grain, the fulfilled diatomite, sunflower shuck it is possible to use as adsorbents for water treatment from synthetic organic dye of the methylene blue and crude oil. For removal from water solutions of the methylene blue it is preferable to use sunflower shuck, and to water treatment from crude oil is better to apply the fulfilled diatomite.*

**Keywords:** spews, spent grain, diatomite, shuck, water, treatment, methylene blue, oil.

Bibliography — 10 references.

*Received December 15, 2021*

УДК 628.54

DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_1\_24

## Экокомбайны в технологиях очистки сточных вод

Б. С. КСЕНОФОНТОВ, д-р техн. наук

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

*Рассмотрены способы очистки сточных вод с использованием нового вида оборудования в виде экокомбайнов. Показано, что такие комбинированные установки, как экокомбайны, позволяют получать высокие показатели качества очищенной воды, а также одновременно получать образующийся осадок в транспортабельном виде. Установлено, что эффективность процессов очистки воды и сгущения осадков, осуществляемых в экокомбайне, повышается при соблюдении технологических режимов согласно применению многостадийной и обобщенной моделей флотации и сопутствующих процессов.*

**Ключевые слова:** очистка сточных вод, экокомбайны, сгущение осадков, многостадийная и обобщенная модели флотации.

Разработка новой техники для очистки воды, воздуха и переработки отходов обусловлена необходимостью как повышения эффективности очистки, так и возможностью снижения удельных материало- и энергозатрат. В связи с этим идёт постоянное совершенствование существующей и разработка новой техники [1—21], в том числе экокомбайнов.

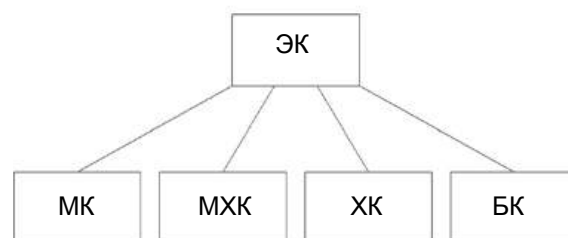
Например, для очистки сточных вод используют флотационную технику преимущественно напорного типа. Хотя процесс флотации известен давно, принципиально новых технических решений в этой области относительно мало. В качестве примера можно привести разработанный автором в 1989—1992 гг. способ напорной флотации с двумя рабочими жидкостями [16], из которых одна рабочая жидкость с труднорастворимым газом (воздухом), а другая — с легкорастворимым, например с углекислым газом. Этот способ был испытан и использован автором впервые в отечественной практике на биотехнологических предприятиях. В дальнейшем автор разработал способ с тремя рабочими жидкостями [20].

Другой пример — направление, связанное с использованием комбинированных установок, осуществленное под руководством автора начиная с 1995 г. на подмосковных машиностроительных предприятиях.

Проведенные автором [1, 19] исследования определили возможность аппаратного оформления этого способа с использованием комбинированной установки, названной автором флотокомбайном. Автором разработаны и другие способы и аппараты флотационной очистки сточных вод с учетом их конкретного состава.

Установки комбинированного типа разработаны и для очистки газовоздушных выбросов, а также для переработки отходов различных производств. Такую технику автор предлагает называть экокомбайнами. Ее отличительной особенностью является осуществление нескольких технологических операций в едином корпусе, причем режимы технологических операций согласованы в гидродинамическом отношении, что приводит к повышению эффекта очистки.

Более эффективно экологические процессы можно осуществлять в экокомбайнах, представляющих комбинированные установки, реализованные в едином корпусе. Использование экокомбайнов производится в зависимости от решаемой задачи. При этом в таких экокомбайнах очистка воды, воздуха или переработка отходов происходят с использованием нескольких последовательно осуществляемых способов очистки. Автором предложена классификация экокомбайнов, приведенная на рис. 1.



**Рис. 1. Классификация экокомбайнов:**  
МК — мехкомбайн; МХК — меххимкомбайн; ХК — химкомбайн; БК — биокомбайн

Рассмотрим в качестве примера разные варианты экокомбайнов.

Разработанный автором экокомбайн (рис. 2) имеет корпус 1, на внешней стороне которого установлен патрубок 2 для подачи загрязненного воздуха (стрелка в виде штриховой линии). На выходе из патрубка установлен рассекатель 3. На верхней части корпуса

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

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2021 г.

© Ксенофонов Б. С., 2022

расположены патрубки отвода очищенного воздуха 4 и подачи орошающей жидкости (воды), фильтр 6 доочистки воздуха с расщепителем 7. Выход грязной (отработанной) жидкости (воды) через патрубок 8 поступает на стадию доочистки в камеру флотации 9 с отделением уловленных загрязнений в пенном желобе 10 и со дна камеры флотации через патрубок 14 с последующей подачей их через патрубок 19 в шнековый сгуститель 16 со шнеком 17, имеющим выходы сгущенного продукта в резервуар 18, а осветленной жидкости — в резервуар 15.

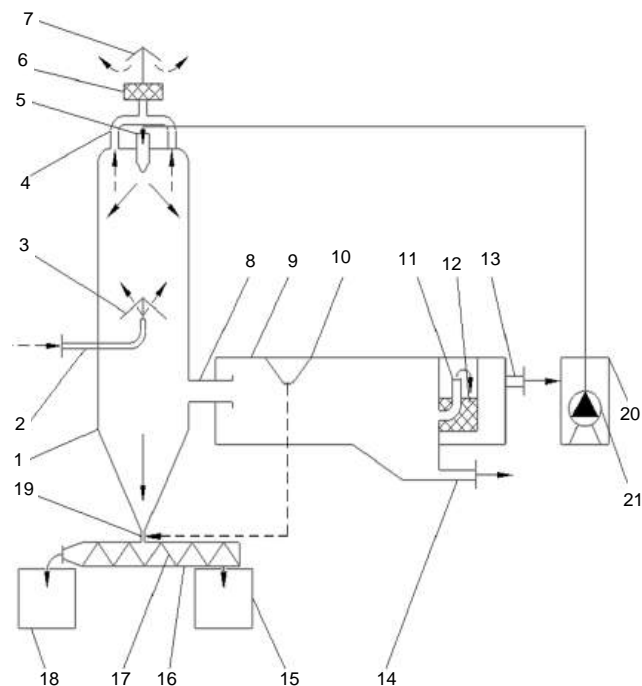


Рис. 2. Схема экомбайна

Очищенная вода из камеры флотации выводится через устройство регулирования уровня 11 и далее через фильтр 12, а затем через патрубок 13 — в резервуар 20, из которого с помощью насоса 21 подается в патрубок 5.

Принцип работы такого экомбайна заключается в следующем. Загрязненный воздух поступает через патрубок 2, расположенный на внешней стороне корпуса 1. Далее за счет контакта загрязненного воздуха с распыленной до мельчайших капель водой происходит очистка воздуха и затем его последующая доочистка в фильтре 6. Очищенный до нормативных показателей воздух выводится в атмосферу через расщепитель 7. Загрязненная в процессе контакта с воздухом вода предварительно очищается в камере флотации 9, а затем доочищается с помощью фильтра 12 и далее выводится через патрубок 13. При этом сгущение образующегося осадка происходит с использованием шнекового сгустителя 16, из которого выводится сгущенный продукт с остаточной влажностью примерно 80 % и собирается в резервуаре 18, а осветленная жидкость поступает в резервуар 15.

Таким образом, в экомбайне осуществляются комплексная задача очистки воздуха, воды и обработка осадка с высокими технико-экономическими показателями.

Другой вариант экомбайна представлен на рис. 3.

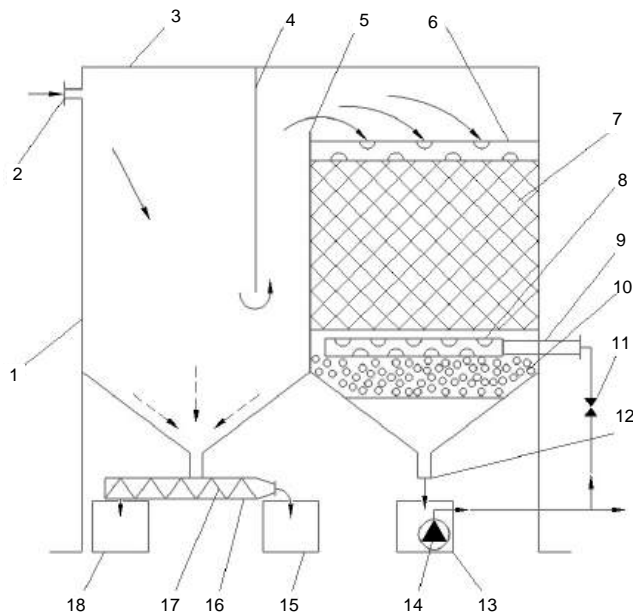


Рис. 3. Схема колонного экомбайна:

1 — корпус экомбайна; 2 — патрубок подачи грязной воды; 3 — крышка; 4 — полупогружная перегородка; 5 — биофильтр (фильтр); 6 — распределительная система; 7 — загрузка биофильтра; 8 — дренажная система; 9 — патрубок подачи промывной воды; 10 — крупнозернистая загрузка; 11 — вентиль; 12 — патрубок вывода очищенной воды; 13 — резервуар очищенной воды; 14 — насос; 15 — сборник концентрата; 16 — шнековый сгуститель; 17 — шнек; 18 — сборник осветленной жидкости

Интенсификация очистки сточных вод и сгущения осадка достигается при использовании экомбайна оригинальной конструкции (рис. 4).

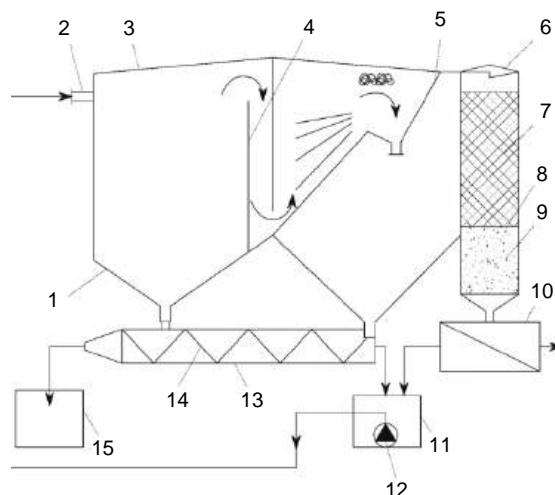
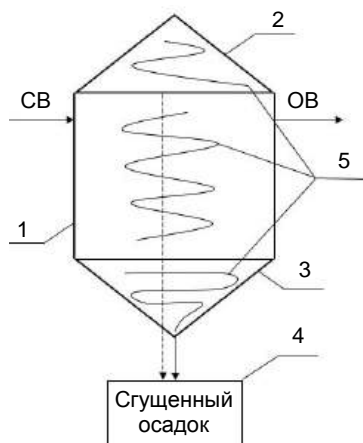


Рис. 4. Схема экомбайна с блоком сгущения осадка

Разработанный экомбайн включает корпус 1, на внешней стороне которого расположены патрубок подачи грязной воды 2, фильтр 6 с зернистой загрузкой 7, поддерживаемой решеткой 8, и поддерживающим слоем 9 и далее мембранным блоком 10 и узлом сгущения осадка, состоящим из шнекового сгустителя 13 со шнеком 14 с блоками сбора сгущен-

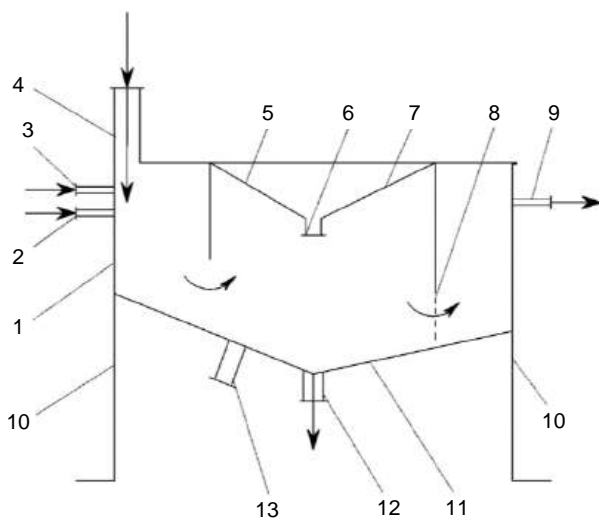




**Рис. 7. Принципиальная схема флотокомбайна с расположенными внутри корпуса функциональными элементами:**

1 — корпус флотокомбайна; 2 — пеноконцентратор; 3 — зона образования и сгущения осадка; 4 — узел сгущенного осадка; 5 — функциональные элементы, способствующие интенсификации процессов очистки воды; СВ — сточная вода; ОВ — очищенная вода

Пример реализации простейшего варианта флотокомбайна в виде флотоотстойника представлен на рис. 8. Основные стадии процессов, происходящих в рабочем пространстве такого флотоотстойника, связаны с использованием отстаивания, флотации и фильтрации.



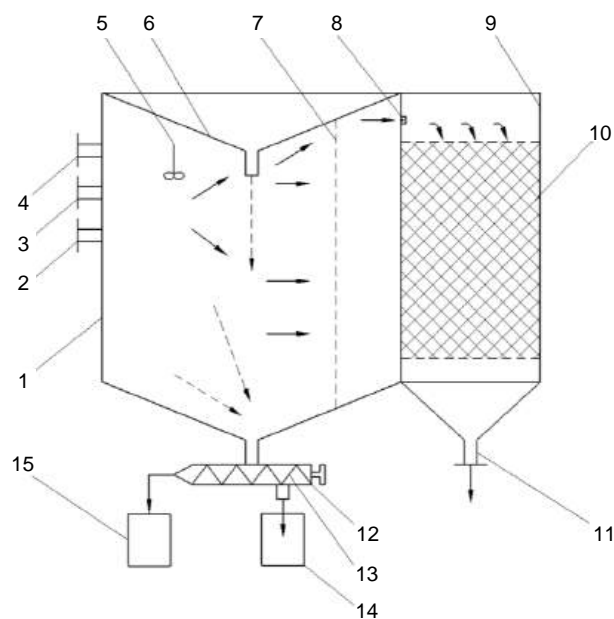
**Рис. 8. Схема простейшего флотокомбайна (флотоотстойника):**

1 — корпус флотокомбайна; 2 — патрубок для подачи 1-й рабочей жидкости; 3 — патрубок для подачи сточной воды; 4 — патрубок для подачи раствора реагента; 5 и 7 — полки пенистого желоба; 6 — выходной патрубок для выгрузки пены; 8 — сетка; 9 — патрубок для вывода осветленной воды; 10 — стойки; 11 — днище; 12 — патрубок для отвода осадка; 13 — патрубок для подачи 2-й рабочей жидкости

Для сравнения различных вариантов флотокомбайнов рассмотрим схему флотокомбайна, представленную на рис. 9.

Использование многостадийной и обобщенной моделей процесса указывает на целесообразность применения во флотокомбайне большего количества

элементов, в частности разделяющих перегородок, регулирующих скорости водного потока внутри аппарата, фильтрующей сетки и т. д., а также блока сгущения осадка.

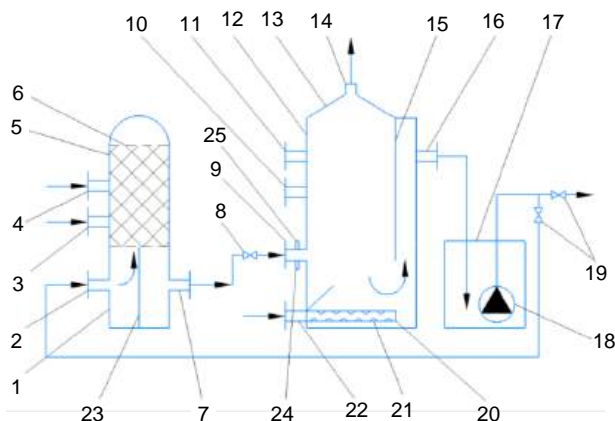


**Рис. 9. Схема флотокомбайна (разработка автора)**

Разработанный автором флотокомбайн имеет корпус 1, на внешней стороне которого расположены патрубки для подачи раствора 2, рабочей жидкости 3, исходной (грязной) воды 4, пенистый желоб 6, сорбционный фильтр 9 с фильтрующей загрузкой 10 и патрубком вывода чистой воды 11, шнековый сгуститель 12 со шнеком 13 внутри, соединенным со сборником осветленной жидкости 14 и со сборником сгущенного осадка 15, а внутри корпуса — мешалка 5, сетчатая перегородка 7 и обеззараживающее устройство 8.

Принцип работы флотокомбайна включает подачу грязной воды через патрубок 4 внутрь корпуса 1, а также подачу рабочей жидкости и раствора реагента, соответственно, через патрубки 3 и 2. Поступающие внутрь корпуса 1 потоки перемешиваются с помощью мешалки 5, что приводит к образованию флотокомплексов частица загрязнений—газовый пузырек и их дальнейшему всплыванию в пенистый слой, образующийся в пенистом желобе 6, из которого он далее подается наряду с осадком в шнековый сгуститель 12. Сгущенный продукт собирается в сборнике 15, а отделенная жидкость — в сборнике 14. Очищаемая в корпусе 1 флотокомбайна вода после отделения загрязнений преимущественно в виде флотокомплексов проходит последовательно через сетчатую перегородку 7, обеззараживающее устройство 8 (например, в виде ультрафиолетовой лампы или контактной камеры озонирования) и далее пропускается через угольную загрузку 10 фильтра 9 и выводится через патрубок 11. Такой флотокомбайн можно автономно использовать в качестве локальной очистной установки с площадью, меньшей, чем в случае использования сооружений-аналогов (до 1,6—2,2 раза).

Эффективный экомбайн предложен в новом техническом решении автора (рис. 10).

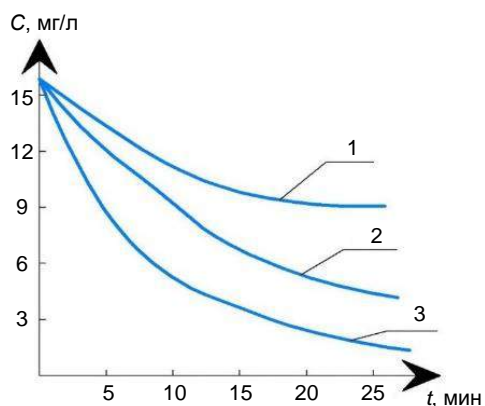


**Рис. 10. Схема экомбайна для улавливания углекислого газа с оборотной системой водопользования:**

1 — абсорбер; 2 — патрубок для подачи оборотной воды; 3 — патрубок для подачи отработанных газов; 4 — патрубок для подачи реагентов; 5 — загрузка абсорбера; 6 — решетка удерживающая; 7 — патрубок для вывода газовойоздушной смеси; 8 — вентиль; 9 — эжектор; 10 — патрубок для подачи подпиточной воды; 11 — патрубок для подачи реагентов; 12 — десорбер; 13 — коническая часть десорбера; 14 — патрубок для вывода очищенного газа; 15 — разделяющая перегородка; 16 — патрубок для вывода очищенной воды; 17 — резервуар для очищенной воды; 18 — насос; 19 — вентили; 20 — система аэрации; 21 — выходные отверстия для вывода газа; 22 — патрубок для подачи газа; 23 — разделяющая перегородка; 24, 25 — патрубки для подсоса воздуха

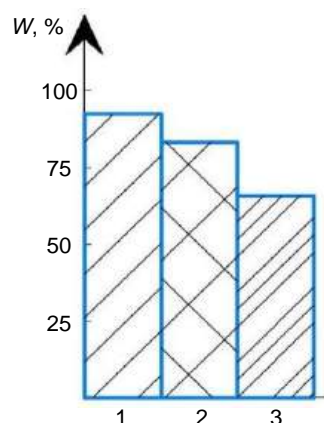
Анализ предложенного технического решения указывает на его эффективность.

Сравнительная эффективность очистки сточных вод при использовании разных способов обработки с применением в том числе флотокомбайнов приведена на рис. 11 и 12. Показано, что усредненные значения остаточной концентрации нефтепродуктов (рис. 11) в очищенной воде после флотокомбайна заметно ниже, чем после очистки во флотоотстойнике. Аналогичные данные по остаточному влагосодержанию, которые свидетельствуют о более низкой влажности осадка после обработки сточных вод во флотокомбайне по сравнению с использованием флотоотстойника, приведены на рис. 12.



**Рис. 11. Усредненные значения концентрации нефтепродуктов в осветленной воде:**

1 — после отстаивания; 2 — после очистки во флотоотстойнике; 3 — после очистки во флотокомбайне



**Рис. 12. Усредненные значения влагосодержания осадков, образующихся при различных видах обработки осадков сточных вод:**

1 — после отстаивания; 2 — после обработки во флотоотстойнике; 3 — после обработки во флотокомбайне

Таким образом, обработка сточной воды во флотокомбайне приводит к заметно лучшим результатам, чем при использовании флотоотстойника.

Важно также отметить использование кинетических моделей процессов очистки, в том числе флотации. Новый подход, основанный на многостадийности процесса, более успешен для интенсификации процессов не только на существующем, но и на вновь разработанном оборудовании [6—11]. При этом развитие процесса моделирования способствовало появлению нового типа оборудования — экомбайнов, которые оказались более эффективными при меньших материало- и энергозатратах, чем известные машины и аппараты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ксенофонтов Б. С. Использование многостадийной модели флотации и разработка флотокомбайнов типа КБС для очистки воды. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — 156 с.
2. Ксенофонтов Б. С. Флотация: многостадийная и обобщенная модели процесса и флотокомбайны типа КБС и специального назначения. — Тверь: Тверской гос. ун-т, 2020. — 424 с.
3. Ксенофонтов Б. С. Очистка сточных вод: кинетика флотации и флотокомбайны. — М.: ИД: "Форум": ИНФРА-М, 2015. — 256 с.
4. Ксенофонтов Б. С., Капитонова С. Н., Сеник Е. В. Использование многостадийной модели Ксенофонтова в процессах флотационной очистки сточных вод. — Тверь: Тверской госуниверситет, 2019. — 162 с.
5. Ксенофонтов Б. С. Флотокомбайн для очистки сточных вод. Патент РФ на полезную модель № 170182. Пр. 25.07.2016. Рег. 18.04.2017.
6. Ксенофонтов Б. С. Очистка сточных вод во флотационных колоннах // Водоочистка. 2018. № 1—2. С. 18—23.
7. Ксенофонтов Б. С. Математические модели сложных сочлененных процессов во флотокомбайнах для очистки сточных вод // Водоочистка. 2018. № 10. С. 7—11.
8. Ксенофонтов Б. С. Очистка промышленных сточных вод от нефтепродуктов флотацией с доизвлечением микрофлотокомплексов // Водоочистка. 2018. № 10. С. 12—18.
9. Ксенофонтов Б. С. Интенсификация очистки сточных вод с использованием комбинированной флотационной техники // Водоочистка. 2018. № 4. С. 8—13.
10. Ксенофонтов Б. С. Модели сложных флотационных процессов очистки сточных вод // Водоочистка. 2018. № 6. С. 59—69.
11. Ксенофонтов Б. С. Очистка сточных вод: многостадийная модель флотации и флотокомбайны // Водоочистка. 2018. № 12. С. 5—21.
12. Ксенофонтов Б. С. Флотационная обработка воды, отходов и почвы. — М.: Новые технологии, 2010. — 272 с.



13. Ксенофонтов Б. С. Моделирование процесса электрофлотационной очистки сточных вод // НИИТЭХИМ. Экспресс-информация. Сер. "Промышленность горнохимического сырья". 1987. № 4. С. 1—8.
14. Гвоздев В. Д., Ксенофонтов Б. С. Очистка производственных сточных вод и утилизация осадков. — М.: Химия, 1988. — 112 с.
15. Ксенофонтов Б. С., Виноградов М. С. Использование обобщенной флотационной модели Ксенофонтова для расчета процессов очистки воды. — Тверь: Тверской госуниверситет, 2019. — 185 с.
16. Ксенофонтов Б. С. Очистка сточных вод: флотация и сгущение осадков. — М: Химия, 1992. — 144 с.
17. Ксенофонтов Б. С. Химическая обработка воды. — Тверь: Тверской госуниверситет, 2021. — 164 с.
18. Ксенофонтов Б. С. Очистка техногенных вод с использованием флотокомбайнов : монография. — Тверь: Тверской госуниверситет, 2020. — 154 с.
19. Ksenofontov B. S. Flotation Multistage and Generalized Models of the Process Harvesters of Ksenofontov Type and for Special Purpose. — San Francisco: Academus Publ., 2021. Pt. 1. — 299 p. DOI: 10.31519/0022-8 Available at: <https://academuspub.com/en/nauka/monography/2212/view> (Date of access 26.09.2021).
20. Ксенофонтов Б. С. Очистка сточных вод флотацией с несколькими рабочими жидкостями. — Тверь: Тверской госуниверситет, 2021. — 144 с.
21. Ксенофонтов Б. С. Биотехнологические основы защиты окружающей среды и использование биокомбайнов и биофлотокомбайнов. — Тверь: Тверской госуниверситет, 2021. — 252 с.

## Ecoharvesters in wastewater treatment technologies

B. S. KSENOFONTOV

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

*The article deals with the issues of wastewater treatment using a new type of equipment in the form of ecoharvesters. It is shown that such combined installations as eco-harvesters allow obtaining high quality indicators of purified water, as well as simultaneously receiving the formed sludge in a transportable form. It has been established that the efficiency of water purification and sludge thickening processes carried out in an eco-harvester increases if the technological regimes are observed according to the use of models of multistage and generalized flotation models and related processes.*

**Keywords:** wastewater treatment, ecoharvesters, sludge thickening, multistage and generalized flotation models.

**Bibliography** — 21 references.

*Received November 7, 2021*



## Экологический контроль. Прогнозирование

УДК 502.521

DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_1\_30

### Анализ применимости методов реабилитации территорий объектов по уничтожению химического оружия

**И. М. ЯННИКОВ**, д-р техн. наук; **В. Г. ИСАКОВ**, д-р техн. наук;

**В. А. АЛЕКСЕЕВ**, д-р техн. наук; **А. А. АБРАМОВА**, канд. техн. наук

ФБГОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова»,  
г. Ижевск, Россия

**Р. А. ГАЛИАКБЕРОВ**

ЗАО «Ижевский нефтяной научный центр», г. Ижевск, Россия

*Проведен анализ существующих методов реабилитации территорий, загрязнённых в результате процесса производства, хранения и уничтожения химического оружия с учётом специфики загрязнения зон защитных мероприятий (ЗЗМ) объектов уничтожения химического оружия (УХО). На основе проведённого анализа выделены, рассмотрены и систематизированы приёмы и методы реабилитации почвенного покрова и водных объектов, приведены их характеристика, примеры их применения. Отмечены достоинства и недостатки указанных методов и приёмов, сделаны необходимые выводы, даны рекомендации по применению указанных методов при реабилитации зон влияния объектов УХО.*

**Ключевые слова:** объекты хранения и уничтожения химического оружия (ОХУХО), реабилитация, санация территорий, физические, химические, физико-химические, биологические методы очистки почв и водных объектов.

Главным результатом ратификации Российской Федерацией Конвенции о запрещении химического оружия [1] явились разработка и последующая реализация федеральной целевой программы (ФЦП) по уничтожению химического оружия (ХО) [2].

**Янников Игорь Михайлович**, доцент, профессор кафедры "Техносферная безопасность".  
E-mail: imyannikov@mail.ru

**Исаков Виталий Германович**, профессор, заведующий кафедрой "ВиВ".  
E-mail: isakovvg@istu.ru

**Алексеев Владимир Александрович**, профессор, профессор кафедры "Физика и оптоэлектроника".  
E-mail: aleksevv@mail.ru

**Абрамова Анна Александровна**, доцент кафедры "ВиВ".

E-mail: aaa2785@mail.ru

**Галиакберов Рамис Алмазович**, инженер отдела экологической и промышленной безопасности.

E-mail: ramis.galiakberov.97@bk.ru

Статья поступила в редакцию 19 октября 2021 г.

© Янников И. М., Исаков В. Г., Алексеев В. А., Абрамова А. А., Галиакберов Р. А., 2022

В Перечень объектов по производству и разработке химического оружия (прил. 3 к данной ФЦП) входят 24 предприятия в Волгограде, Нижегородской и Самарской областях, Чувашской Республике и Пермском крае. К предприятиям разработки отнесён ГосНИИОХТ "Шиханы" Саратовской области. На все указанные объекты производства получен сертификат Организации по запрещению химического оружия (ОЗХО) о завершении конверсии. Объект "Шиханы" в Перечень не включен в связи с тем, что на нём не было обнаружено не только самого химического оружия, но и его следов [3]. Всего в Российской Федерации на 7 объектах по хранению и уничтожению химического оружия в Удмуртской Республике, Саратовской, Курганской, Кировской, Пензенской и Брянской областях хранилось и в последующем было уничтожено почти 40 тыс. т. отравляющих веществ (ОВ), в том числе 7,52 тыс. т. мышьяксодержащих (иприт, люизит, иприт-люизитные смеси) и 32,48 тыс. т. фосфорорганических веществ (зарин, зоман, Vx-газ). Наибольшее количество боевых отравляющих веществ (порядка 30 % всех запасов Российской Феде-

рации) было сосредоточено на двух объектах в Удмуртской Республике (Кизнер и Камбарка).

Несмотря на успешное завершение в 2017 г. основных этапов реализации данной Программы [2], вопрос обеспечения безопасности природной среды по ряду аспектов по-прежнему остается открытым. Программой предусматривалось выполнение целого комплекса мероприятий по ликвидации последствий деятельности объектов по производству ХО, разработке биотехнологических методов очистки сточных вод, зараженных ОВ и продуктами их детоксикации, а также способов утилизации отходов, образующихся при уничтожении указанных объектов. Были предусмотрены разработка и реализация природоохранных мероприятий, создание системы государственного экологического мониторинга в зонах защитных мероприятий (ЗЗМ) ОХУХО и проведение государственного экологического контроля. Все указанные в ФЦП мероприятия были выполнены. Что касается реабилитации территорий, загрязненных в результате деятельности по производству, хранению и уничтожению химического оружия, то она свелась в основном к мероприятиям по санации территорий самих объектов, а на территориях зон их влияния или территориях ЗЗМ ОХУХО реабилитационные мероприятия не проводили.

Имеющиеся публикации, анализирующие влияние химических веществ на население и окружающую среду в ЗЗМ ОХУХО после завершения уничтожения химического оружия, в основном констатируют, что процессы хранения и уничтожения ХО не оказали существенного негативного влияния как на сами объекты, так и их санитарно-защитные зоны (СЗЗ) и ЗЗМ [4–6]. В то же время многие исследователи отмечают не только стойкость и способность накапливаться на объектах окружающей среды соединений мышьяка и фосфора, но и их способность к вертикальной миграции в зависимости от типа почв и подстилающих пород, подвижность в результате воздействия гидрологических факторов [7–10]. При этом выявлены факты изменений показателей некоторых растений-индикаторов вблизи ОХУХО, а поскольку состояние структуры биоценоза может изменяться в результате эффекта кумуляции спустя десятилетия от начальных этапов деятельности объекта, это требует дальнейшего изучения в рамках мониторинга [5]. В ряде работ [10–12] авторами настоящей публикации отмечено, что проведенные в период уничтожения ХО эксперименты с мышьяковистыми соединениями доказали несостоятельность ПДК в качестве опорного значения для определения качества природной среды. Внесение мышьяка на уровне ПДК дает токсический эффект, свойственный малым дозам, в том числе по отдаленным последствиям, в связи с чем для проведения исследований в качестве опорных целесообразно использовать фоновые значения. На их основе по результатам острых полевых экспериментов в ЗЗМ объекта можно говорить о необходимости рекультивации территории и применимости тех или иных методик.

В связи с изложенным представляется необходимым рассмотрение вопроса о проектировании и реализации комплекса мероприятий по качественной

реабилитации территорий ЗЗМ ОХУХО, а также объектов по разработке и производству ХО, увязывание с результатами изучения поведения отсроченного действия в рамках мониторинга и экспериментального изучения поведения токсикантов в реальных временных и географических условиях. Целью настоящей работы является анализ существующих методов и способов реабилитации территории с точки зрения их применимости для обеспечения высокоэффективной и качественной реабилитации территории, загрязненной в результате производства, хранения и уничтожения химического оружия.

### Специфика загрязнения зон влияния ОХУХО

Специфика загрязнения территории зон влияния объектов по разработке, производству, хранению и уничтожению химического оружия связана в первую очередь с основной задачей деятельности подобных объектов.

Основными путями распространения отравляющих веществ в ходе проведения мероприятий по уничтожению, а также основными местами скопления продуктов деструкции фосфорорганических веществ и люизита являются [4]:

- *Объекты гидросферы* (речки, пруды, грунтовые воды и т. д.). Характерные загрязнители: бензапирены, свинец, марганец, медь, взвешенные вещества, ионы тяжелых металлов;
- *Почвенный и растительный покров*. Характерные загрязнители: отравляющие вещества (Vx, зарин, зоман, люизит) и продукты их распада (мышьяк, метилфосфоновая кислота, тяжелые металлы).

Отравляющие вещества и продукты их деструкции обладают абсолютно разной токсичностью, степенью растворимости в воде, подвижности в почве. В связи с этим требуется тщательная оценка и выбор того или иного метода санации и реабилитации территорий ОХУХО в зависимости от вида ОВ, природных условий территории объектов, времени с момента окончания негативного воздействия и других факторов.

### Приемы и методы реабилитации почвенного покрова

В зависимости от масштаба и характера загрязнения почвенного покрова методология реабилитации подобных территорий включает следующие направления [13, 14]:

- технологии *ex situ*, при которых происходит удаление загрязненного грунта для его утилизации или переработки в специальных установках;
- технологии *on situ*, при которых разрушение токсикантов производится непосредственно на месте загрязнения.

По характеру воздействия на почвенный покров методы реабилитации загрязненных территорий подразделяются на физические, физико-химические, химические и биохимические. Структурная схема методологии очистки почвенного покрова представлена на рис. 1 [13–16].

**Физическая очистка почвенного покрова.** Данные мероприятия предполагают удаление верхнего слоя грунта с загрязненных территорий и вывоз его на площадки реабилитации или утилизации (механическая очистка). Кроме того, возможно применение подобных методов непосредственно на месте загрязнения (цементирование, обвалование).

Стоит отметить, что рассмотрение методов иммобилизации загрязнений в почве, каковыми по своей сути являются цементирование и обвалование, как методов реабилитации является сомнительным ввиду того, что данные способы не обеспечивают удаления вредных веществ с загрязненной территории [13].

Достоинством механической очистки почв является возможность полной очистки участка почвенного покрова от любого вида загрязнений, включая особо стойкие токсиканты [17]. Однако применение методов механической очистки в качестве основного для территорий зон влияния ОУХО и других химически опасных объектов также практически невозможно, поскольку предполагает локальный вывоз небольших участков территории. Кроме того, механическая очистка обеспечивает не очистку грунта, а его перенос в другие места [18, 19], в связи с чем целесообразнее применять данные методы с точки зрения вспомогательных (на отдельных участках особо сильного загрязнения).

**Методы химической реабилитации почв.** Комплекс методов химической очистки почв включает в себя [13]:

- термообработку (нагрев на воздухе, сжигание, пиролиз, электротермообработку, плазменные технологии);
- очистку почв методом выщелачивания;
- связывание загрязнителей в комплексные соединения.

Достоинства и недостатки применения методов химической очистки грунтов представлены в табл. 1 [13, 20—26].

Исходя из анализа различных источников, можно сделать вывод, что наиболее подходящим методом химической очистки почв (в условиях зон влияния ОУХО) является технология выщелачивания почв. Методология термообработки в связи с отсутствием "избирательности" воздействия рекомендуется для использования лишь на отдельных участках с высокой степенью содержания токсикантов в грунтах.

**Физико-химическая очистка грунтов.** Физико-химические методы очистки основаны на использовании ряда процессов и явлений, таких, как сорбция (десорбция), коагуляция, флотация, ионный обмен, диффузия и т. д., позволяющих как удалить (разложить) загрязняющие вещества (ЗВ), так и связать их в месте их нахождения.

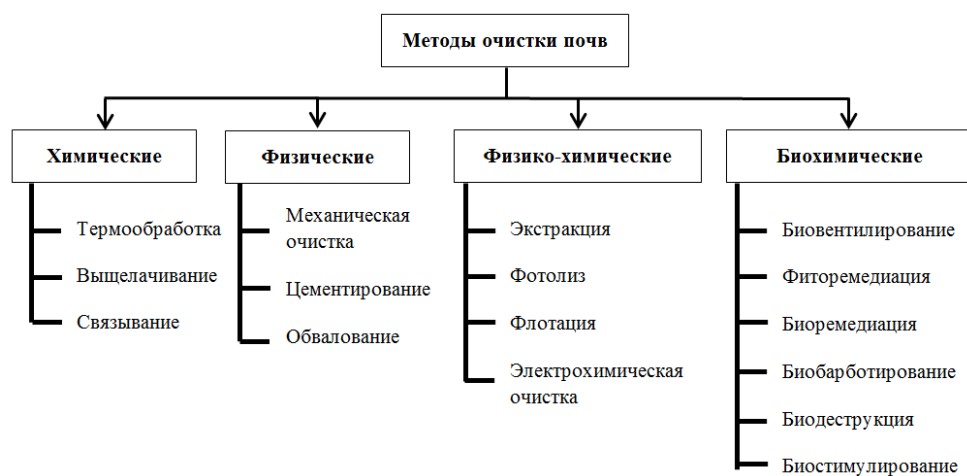


Рис. 1. Группы и виды методов реабилитации почвенного покрова

Методы химической очистки грунтов

Таблица 1

Метод	Виды уничтожаемых токсикантов	Достоинства	Недостатки
Термообработка	Все известные виды токсикантов (в зависимости от температуры воздействия)	Способность полного (до 100 %) уничтожения токсикантов в грунтах	Уничтожение всех органических веществ в случае глубокой обработки; необходимость восстановления плодородных свойств почв после обработки; высокая стоимость очистки; удорожание в случае необходимости изъятия и перемещения почв на площадки очистки (ex situ)
Выщелачивание	Тяжелые металлы; радионуклиды	Высокая степень очистки от тяжелых металлов (86—89 %) и радионуклидов (1,8—2,5 %); возможность комплексного применения совместно с удобрениями	Угроза загрязнения грунтовых вод (on situ); удорожание в случае необходимости изъятия и перемещения почв на площадки очистки (ex situ)
Связывание загрязнителей		Точечное воздействие на тот или иной вид загрязнения; щадящее воздействие на почвы	Необходимость подбора работающих веществ и соединений

Ввиду специфики своего происхождения и специфичности загрязнения территорий зон влияния ОУХО (стойкость токсикантов, глубокое проникновение токсикантов) такие методы, как применение сорбентов, коагуляция, методы на основе свойств ионного обмена и диффузии, в большей степени применимы для очистки объектов гидросферы и в меньшей — для очистки почв, вследствие чего данные методы не будем рассматривать.

Эффективность, достоинства и недостатки некоторых других методов группы физико-химической очистки представлены в табл. 2 [27—34].

Согласно данным таблицы и с учетом специфики загрязнения территории зон влияния ОУХО лучшим методом физико-химической очистки почв является методология электрохимической очистки грунтов. Данную методологию активно используют в США, Нидерландах и других странах Европы, Австралии и Азии для очистки грунтов от мышьяксо-содержащих соединений [27].

В зависимости от таких факторов, как химический и минеральный состав почв, дисперсность, влажность и плотность, вид загрязнения, наличие веществ-катализаторов, степень Ph грунта и т. д., степень очистки грунтов при применении методов электрохимической очистки составляет [28]:

- от тяжелых металлов — 30...70 %;
- от нитратов — до 80 %;
- от нефти и нефтепродуктов — от 25 до 75 %;
- от феноловых загрязнителей — от 87 до 96...97 %;
- от радионуклидов — от 50 до 90 %.

**Биологическая (биохимическая) реабилитация.** Технологии биохимического и биологического восстановления почв (биоремедиация) получают все большее распространение. Зародившись в 1970-х гг., подобные методы успешно развиваются как за рубежом (США, Германия и другие страны Европы), так и в России.

Использование подобных технологий позволяет проводить очистку почти от всех наиболее распространенных видов загрязнения почв, таких, как нефтяные углеводороды, летучие органические соединения, тяжелые металлы, токсичные химические соединения [34—36].

Главным преимуществом применения биоремедиации как метода очистки является ее почти полная безопасность для окружающей природной среды. Кроме того, к преимуществам подобных технологий можно отнести стоимость мероприятий по очистке, отсутствие вторичных отходов и возможность точечного воздействия на загрязненную территорию благодаря широким возможностям применяемых живых систем и микроорганизмов, что подтверждается результатами проведенных экспериментов [37, 38].

Единственной сложностью, возникающей при использовании подобных технологий, становится необходимость качественного анализа структуры почв, степени и характера загрязнения, применимости тех или иных видов растительного и животного мира для обеспечения высокой степени очистки.

Согласно международной классификации биоремедиационные технологии делятся на *ex situ* (загрязненную почву извлекают, проводят очистку и возвращают на место), *on site* (почва остается на месте либо снимают верхний, наиболее загрязненный слой) и *in situ* (в случае, если загрязнение находится под поверхностью почвы).

В зависимости от применяемой технологии сроки проведения подобной очистки могут составлять от нескольких дней или месяцев (*ex situ*) до двух-четырех лет (*on site*). Степень очистки при этом находится в интервале от 90 до 99 %.

В методологию биологической очистки почв входят такие технологии, как биовентиляция, фиторемедиация, биоремедиация, биобарботирование, биодеструкция, биостимулирование и т. д. [13, 37].

Исходя из сказанного можно сделать вывод, что технологии биологической реабилитации почвенного покрова являются наиболее приемлемой методологией с учетом специфики рассматриваемой загрязненной территории. Данные методы являются самыми дешевыми, не требующими больших энергетических затрат, но позволяющие при этом достигать высокой степени очистки на больших площадях, что является одним из ключевых факторов в выборе методов восстановления территорий зон влияния ОУХО.

Таблица 2

Характеристика методов физико-механической очистки почв

Метод	Виды уничтожаемых токсикантов	Достоинства	Недостатки
Экстракция	Тяжелые металлы; феноловые соединения; углеводороды; пестициды	Высокая скорость обработки почв; возможность одновременной очистки от нескольких видов загрязняющих веществ	Высокая стоимость; сложность применения при применении без изъятия грунта
Фотолиз	Тяжелые металлы; радионуклиды	Высокая степень очистки от тяжелых металлов (86—89 %) и радионуклидов (1,8—2,5 %); возможность комплексного применения совместно с удобрениями	Высокая стоимость; сложность применения при применении без изъятия грунта; энергозатратность
Флотация	Тяжелые металлы; радионуклиды	Точечное воздействие на тот или иной вид загрязнения; возможность комплексного применения совместно с удобрениями для обогащения	Невозможность применения без изъятия грунтов; необходимость предварительной обработки грунтов
Электрохимическая очистка	Тяжелые металлы; нитраты; органические токсиканты; углеводороды; фенолсодержащие соединения; радионуклиды	Возможность очистки грунтов <i>on situ</i> , и на значительной глубине; высокая степень и эффективность очистки; широкий круг токсикантов, которые могут быть удалены из почвы; высокая скорость процесса очистки в сравнении с другими методами; возможность применения методов совместно с другими методами	Высокая стоимость

### Приемы и методы реабилитации водных объектов

Объекты гидросферы на территории зон влияния ОУХО являются особо значимым объектом территории, требующим пристального внимания. Возможность гидролиза и накопления продуктов деструкции в водоемах, а также возможность переноса загрязнений на большие расстояния (реки, грунтовые воды) совместно с высокой токсичностью продуктов деструкции делают данную составную часть окружающей природной среды чрезвычайно опасной как для окружающего населения, так и для флоры и фауны данной местности.

В мировой практике очистки водных объектов широко распространены механические, физико-химические, биологические методы.

**Механическая очистка загрязненных вод.** К механическим методам очистки воды относят использование разнообразных решеток, сит, песколовков, отстойников и фильтров различных конструкций. Их применение основывается на задержании нерастворенных примесей, крупных загрязнителей минерального и органического состава [39].

В связи с тем что сооружения по механической очистке вод являются, скорее, предварительной стадией очистки, применяемой для отлова и остановки наиболее крупных примесей и токсикантов, их применение ограничено в основном рамками очистки сточных вод промышленных объектов и малоприменимо в рамках очистки водных объектов зон влияния ОУХО.

**Физико-химические методы очистки.** Данная группа методов является самой распространенной и широко применяемой в практике. Это такие методы, как сорбция, ионный обмен, коагуляция и флокуляция, флотация, экстракция [40]. Основные свойства,

преимущества и недостатки подобных методов представлены в табл. 3.

Согласно данным таблицы наиболее применимым физико-химическим методом очистки водных объектов (с учетом специфики рассматриваемой загрязненной территории) является использование сорбентов. В качестве сорбентов возможно применение самых разнообразных веществ как природного, так и искусственного происхождения [41].

**Биологические методы очистки.** В основе методологии биологической очистки водных объектов лежат естественные процессы жизнедеятельности растений и микроорганизмов, наиболее значимыми из которых являются способность потреблять и перерабатывать самые разнообразные органические и неорганические соединения, размножаться и образовывать колонии, которые в дальнейшем подлежат отделению и утилизации.

В зависимости от места проведения восстановительных мероприятий методы биологической очистки воды подразделяют на очистку в близких к естественным условиям и обработку воды в искусственных сооружениях. С учетом специфики загрязнения территорий зон влияния ОУХО наиболее приемлемыми с точки зрения эффективности и стоимости мероприятиями являются методы очистки на местности (в естественных условиях), к которым относят поля орошения, поля фильтрации, биологические пруды, биоплато.

Для создания биоплато используют воздушно-водные (тростник обыкновенный, рогоз узколистый, эйхорния и т. д.) и погруженные (уруть колосистая, роголистник погруженный и т. д.) растения. Наивысшая степень очистки достигается при последовательном протекании воды через заросли первых и вторых (рис. 2).

Таблица 3

Физико-химические методы очистки воды

Метод	Очищаемые токсиканты	Достоинства	Недостатки
Коагуляция и флокуляция	Микробиологические загрязнения; фосфаты	Степень очистки — до 99 %; повышение качества воды по цветности, мутности	Зависимость от мутности, цветности и перманганатной окисляемости воды; применение веществ-нейротоксикантов
Сорбция	Органические вещества; фенол; мышьяк; сероводород; ароматические и алифатические красители	Используют на предприятиях химической промышленности; возможность адсорбции веществ в многокомпонентных смесях; высокая эффективность; возможность сочетания с методами биологической очистки	Необходимость подбора сорбента под тип и вид токсиканта
Флотация	Нерастворенные примеси; взвешенные вещества; ПАВы	Высокая степень очистки; непрерывность процесса; простота и компактность установок; эффективность выше при совместном использовании с коагуляцией	Невысокая степень очистки по химическим веществам; образование флотошлама, требующего утилизации
Экстракция	Органические вещества (фенолы, масла, жирные кислоты); тяжелые металлы	Возможность рекуперации извлеченных компонентов	Высокая стоимость мероприятий; экономически невыгодна при концентрациях токсикантов менее 1 г/дм <sup>3</sup>

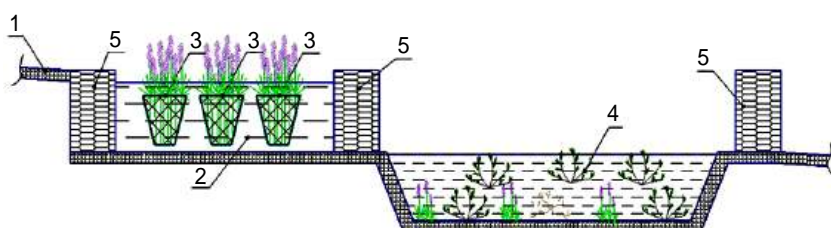


Рис. 2. Комплексная система очистки поверхностных вод:

- 1 — коллектор; 2 — пруд-накопитель; 3 — контейнеры с высшей водной растительностью; 4 — биоплато с высшей водной растительностью; 5 — габион



Создание биоплато на каскаде последовательно размещенных биопрудов обеспечивает максимально возможное удаление из воды ионов аммония, тяжелых металлов, взвешенных веществ, ртути, нефтепродуктов, БПК, ХПК, снижает общее бактериальное загрязнение воды. Необходимо отметить, что на формирование качества воды поверхностного водного объекта немаловажное влияние оказывают и вышние водные растения: тростник, камыш, рогоз, рдест, сусак и т. д. [42].

Достоинствами биологической очистки являются высокая степень очистки (до 99 %), низкая стоимость проводимых мероприятий в сравнении с другими методами, а также полная безопасность проводимых мероприятий для прилегающей к водному объекту территории [39].

Единственным существенным недостатком мероприятий по очистке биологическими методами является необходимость тщательного анализа характеристик загрязнённости водных объектов в целях определения вида и количества необходимых для утилизации полного спектра загрязнений растительности и микроорганизмов.

### Заключение

Отравляющие вещества и продукты их деструкции обладают абсолютно разными токсичностью, степенью растворимости в воде, распространения в воздухе, подвижностью в почве. В связи с этим требуются тщательная оценка и выбор того или иного метода санации и реабилитации территорий объектов по уничтожению химического оружия в зависимости от вида ОВ, природных условий территории влияния ОХУХО и других факторов.

Исходя из проведенного анализа существующих приемов и методов реабилитации, можно сделать вывод, что единого универсального метода очистки не существует. Для обеспечения качественной, быстрой и безопасной реабилитации территорий зон влияния ОХУХО необходимо комплексное применение методов реабилитации с учетом их специфики.

В любом случае какие-либо практические рекомендации по применению того или иного способа можно давать только на основе проведенных исследований и экспериментов непосредственно в зоне влияния данного объекта. Например, в Прибайкалье в качестве фиторе медиантов мышьяка и ряда тяжелых металлов рекомендованы горец растопыренный и свербига восточная [43]. Для условий Удмуртии авторами публикации установлено, что наиболее устойчивыми к мышьяковистому загрязнению являются донник лекарственный (*Melilotus officinalis*), люцерна серповидная (*Medicago falcata*), кипрей узколистный (*Hamenerion angustifolium*), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium*), бескильница расставленная (*Puccinellia distans*), горлюха ястребинковая (*Picris hi racioides*). Указанные виды растений являются эффективными аккумуляторами мышьяка, что позволяет использовать их в качестве тест-объектов при мониторинге территорий, а также в качестве фитомелиорантов в схемах биологической рекультивации как в монокультуре, так и в травосмесях [10, 44, 45].

При реабилитации почвенного покрова на территории ЗЗМ ОХУХО наиболее приемлемым путем восстановления становится комплексное применение биологических методов восстановления с использованием на особо загрязненных участках методов физической (механическая очистка), физико-химической (электрохимическая очистка) и химической (выщелачивание) реабилитации. Подобный комплексный подход даёт эффект снижения содержания мышьяка в почве более чем на 85 % [46].

При выполнении мероприятий по очистке водоемов, грунтовых вод и других объектов гидросферы, находящихся на территории зон влияния подобных объектов, высокоэффективной также оказывается методология биологической очистки с точки зрения стоимости, спектра загрязнителей, которые могут быть извлечены, и безопасности мероприятий. В ряде случаев целесообразно применение методологии сорбции (для очистки наиболее загрязненных участков) с последующим удалением сорбентов и их утилизацией.

При разработке биотехнологий по очистке почв и вод от загрязнений экотоксикантами необходимо учитывать активность фермента, видовое происхождение используемого в технологии микроорганизма или состав консорциума, их биodeградирующие свойства, особенности поведения в сообществе с различными природными штаммами, способность к изменчивости в условиях неоднородности субстрата, а также характеристики почв и факторы, влияющие на механизм и скорость биodeградации [47].

Существенными с точки зрения применения комплексной реабилитации являются качество и скорость выполнения мониторинговых исследований, позволяющих оценить уровень и масштабы загрязненности как на отдельных участках, так и в полном масштабе зон влияния ОХУХО и объектов химической промышленности. Проведённая систематизация методов, их характеристик и особенностей позволит более полно и оперативно провести оценку методов и способов реабилитации территорий, приемлемых для конкретных технологических, климатических, ландшафтных, экономических и иных условий, что позволит снизить энергетические и финансовые затраты на проведение мероприятий, а также повысить качество и скорость их проведения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Конвенция о запрещении разработки, производства, накопления и применения химического оружия и о его уничтожении. Заключена в г. Париж 13.01.1993 (с изменениями от 07.06.2020).
2. Постановление Правительства РФ от 21.03.1996 № 305 "Об утверждении федеральной целевой программы "Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации" (с изменениями от 16.10.2018).
3. Бабич М. Против России устроена самая циничная провокация в истории. РИА "Новости" 17.4.2018 (обновлено 03.03.2020) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ria.ru/20180417/1518813335.html> (дата обращения: 06.09.21).
4. Комбарова М. Ю., Танюхина О. Н., Тидген В. П., Цибульская Е. А., Гюльмамедов Э. Ю. Состояние среды обитания в зоне защитных мероприятий объектов по хранению и уничтожению химического оружия в период ликвидационных работ // Медицина экстремальных ситуаций. 2018. Спецвыпуск № 3. С. 472—486.

5. Ашихмина Т. Я., Домнина Е. А., Огородникова С. Ю., Пестов С. В. Результаты биологического мониторинга в районе уничтожения химического оружия в п. Мирный Кировской области на завершающем этапе: мат. XIII Всероссийской науч.-практ. конф. с международным участием "Актуальные проблемы региональной экологии и биодиагностика живых систем": Кн. 2. (г. Киров, 1—2 декабря 2015 г.). — Киров: Изд-во ООО "Веси", 2015. С. 27—29.
6. Шумилова М. А., Набокова О. С., Петров В. Г. Особенности поведения техногенного мышьяка в природных объектах // Химическая физика и мезоскопия. 2011. Т. 13. № 2. С. 262—269.
7. Шаров С. А. Пути миграции, трансформации и аккумуляции загрязняющих веществ в окружающей среде в районе предприятия по уничтожению химического оружия и обоснование комплекса реабилитационных мероприятий. Автореферат дисс. канд. хим. наук: 03.02.08. — Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2019. — 156 с.
8. Петров В. Г., Шумилова М. А. Поведение натрия в почвах Удмуртии. — Ижевск: Изд-во Института механики УрО РАН, 2016. — 176 с.
9. Филатов Б. Н., Британов Н. Г., Клаучек В. В., Крылова Н. В., Доброшенко Л. А. Гигиенические аспекты безопасности полигонов захоронения отходов от ликвидации объектов по уничтожению химического оружия // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 4. С. 104—109.
10. Янников И. М., Телегина М. В., Козловская Н. В., Алексеев В. А. Биомониторинг объектов по уничтожению химического оружия с использованием экологических полигонов: — Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2013. — 160 с.
11. Янников И. М., Телегина М. В., Кузнецов Н. П. Применение значений удельного фонового содержания загрязнителя в компонентах окружающей среды для оценки ее качества // Экология промышленного производства. 2018. № 4(104). С. 56—60.
12. Янников И. М., Телегина М. В., Алексеев В. А. Решение научно-технических проблем создания комплексной системы безопасности потенциально опасных объектов с использованием идентификационных экологических полигонов // Экология промышленного производства. 2019. № 1. С. 46—50.
13. Лотош В. Е. Очистка загрязненных земель [Электронный ресурс]. URL: <http://lotosh.lgb.ru/fopp/txt/soils.pdf> (дата обращения: 24.04.2021).
14. Янин Е. П. Ремедиация территорий, загрязнённых химическими элементами: общие подходы, правовые аспекты, основные способы (зарубежный опыт) [Электронный ресурс]. URL: [http://www.nparso.ru/\\_images/docs/Remediation\\_of\\_the\\_territories.pdf](http://www.nparso.ru/_images/docs/Remediation_of_the_territories.pdf) (дата обращения: 4.10.2021).
15. Простов С. М. Физические предпосылки очистки грунтовых массивов от загрязнений электрохимическим методом // Вестник КузГТУ. 2014. № 2(102) С. 136—139.
16. Галиакберов Р. А., Янников И. М. Методы и способы восстановления территорий пострадавших в результате деятельности химически опасных объектов // The Scientific Heritage. 2021. № 68—3. Р. 36—41.
17. Скоробогатова В. И., Щербakov А. А., Мандыч В. Г. Санация загрязненных территорий в районах хранения и уничтожения химического оружия // Российский химический журнал. 2007. № 2. С. 71—73.
18. Шевченко А. В. Проблемы уничтожения и утилизации ОМП. 2006, 1(2). С. 2.
19. Швецова-Шиловская Т. Н. Проблемы уничтожения и утилизации ОМП. 2006, 1(2). С. 20.
20. Василенков С. В. Технология выщелачивания радионуклида цезия из почвы // Природообустройство. 2015. № 5. С. 59—63.
21. Полудин А. Л., Дерягин В. В., Левина С. Г. Выщелачивание радионуклидов из почв суперактивной и трансэллювиальной позиции Челябинской области // Вестник ЮУрГПУ. 2013. № 12. С. 276—284.
22. Салтыков А. В., Пузанов А. В. Выщелачивание ртути из гумусового горизонта основных почв низогорий бассейна реки Тотьма // Вестник АГАУ. 2015. № 7(129). С. 93—97.
23. Аллаберганова Г. М., Турабджанов С. М., Музафаров А. М., Аллаярв Р. М. Новый способ рекультивации загрязненных радионуклидами почв участков подземного выщелачивания урана // Universum: технические науки. 2020. № 6—2(75). С. 91—95.
24. Садиев Ф. Ф., Широкова Ю. И., Палуашова Г. К. Исследование мелиоративного воздействия препарата "Биосольвент" на засоленные почвы при промывке и орошении // Научный журнал РосНИИПМ. 2021. № 1. С. 24—46.
25. Баранов Л. А., Бурнаев М. Г. Устройство для электротермической обработки почвы защищенного грунта // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2007. № 20(92). С. 46—49.
26. Методы термической обработки загрязненных почв [Электронный ресурс]. URL: <https://www.activestudy.info/metody-termicheskoy-obrabotki-zagryaznennykh-pochv/> (дата обращения: 15.06.2021).
27. Lagerman R., Pool W. Thirteen years electro-reclamation in the Netherlands: EREM-2001, 3-rd Symposium and Status Report on Electrokinetic Remediation (Karlsruhe, April 18—20, 2001). — Karlsruhe: Schr. Angew. Geol., 2001. P. 1—17.
28. Королев В. А. Электрохимическая очистка грунтов от экотоксикантов: итоги и перспективы // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2008. № 1. С. 13—20.
29. Королев В. А. Очистка грунтов от загрязнений. — М.: МАИК "Наука / Интерпериода", 2001. — 365 с.
30. Королев В. А., Бабакина О. А. Электрохимическая очистка грунтов от нитратов, тяжелых металлов и фенола // Сергеевские чтения. Вып. 3: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (22—23 марта 2001 г.). — М.: ГЕОС, 2001. С. 291—294.
31. Королев В. А., Ситар К. А. Рекультивация нефтезагрязненных земель // Экологический вестник научных центров черноморского экономического сотрудничества (ЧЕС). 2004. № 2. С. 69—76.
32. Петров В. Г., Набокова О. С., Фризоргер Г. Г. Обезвреживание территории после уничтожения химического оружия // Промышленная и экологическая безопасность, охрана труда. 2010. С. 7—10.
33. Шевченко А. В., Никифоров Г. Е., Лякин А. С., Акишин Р. О., Фрезанов А. С. Научно-технические решения по санации загрязненных территорий, зданий и сооружений при выводе объектов по хранению и уничтожению химического оружия из эксплуатации и их перепрофилировании // Российский химический журнал. 2010. Т. 54. № 4. С. 77—79.
34. Костина Л. В., Куюкина М. С., Ившина И. Б. Методы очистки загрязненных тяжелыми металлами почв с использованием (био) сурфактантов (обзор) // Вестник ПГУ. Биология. 2009. № 10. С. 95—110.
35. Ступин Д. Ю. Загрязнение почв и новейшие технологии их восстановления: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во "Лань", 2009. — 432 с.
36. Жариков Г. А., Марченко А. И., Крайнова О. А., Капранов В. В., Жариков М. Г. Разработка и полевые испытания технологии биоремедиации территории, загрязненной токсичными химическими веществами // Медицина экстремальных ситуаций. 2013. № 2(44). С. 41—51.
37. Янкевич М. И., Хадеева В. В., Мурыгина В. П. Биоремедиация почв: вчера, сегодня, завтра // Биосфера. 2015. № 2. С. 199—208.
38. Любунь Е. В. Биологические подходы к очистке почв и водоемов, загрязненных продуктами деструкции иприта и люизита: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. 03.00.2007. — Саратов: Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН, 2004. — 124 с.
39. Меркулова Т. Н., Кравченко А. С. Проблемы очистки водных объектов от техногенных загрязнений // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки. 2012. № 3. С. 74—78.
40. Вертинский А. П. Физико-химические методы очистки сточных вод: проблемы, современное состояние и возможные пути совершенствования // Инновации и инвестиции. 2019. № 11. С. 257—261.
41. Семенов И. П., Скоробогатая И. В. Сооружения по очистке хозяйственно-бытовых сточных вод и оценка эффективности их работы: методические рекомендации. — Минск: БГМУ, 2017. — 28 с.
42. Исаков В. Г., Абрамова А. А., Непогодин А. М. Зеленые технологии в очистке поверхностных и сточных вод объектов ЖКХ: сб. трудов междунар. конф. "Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования". В 2 томах. 2019. С. 460—465.
43. Бутырин М. В. Особенности фитоэкстракции тяжелых металлов и мышьяка различными видами растений и их использование в технологиях ремедиации загрязненных почв Предбайкалья: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. 03.02.2008. — Тюмень, 2017. — 127 с.
44. Янников И. М., Габричидзе Т. Г., Зубко Т. Л., Козловская Н. В., Медведева А. В. Выявление спектра травянистых растений, перспективных в качестве фитомелиорантов, при загрязнении почвы мышьяковистыми соединениями // Вестник ИжГТУ. 2007. № 2. С. 138—140.
45. Янников И. М., Козловская Н. В., Телегина М. В., Пупкова М. С. К вопросу о ремедиации территорий загрязненных мышьякостержащими соединениями // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2010. № 1. С. 53—59.

46. Бекузарова С. А., Датиева И. А., Дулаев Т. А. Снижение содержания мышьяка в почве: сб. науч. тр. по мат. Междунар. науч.-эколог. конф. "Отходы, причины их образования и перспективы использования". — Краснодар: КубГАУ, 2019. С. 204—206.

47. Завьялова Н. В., Филимонов И. В., Ефременко Е. Н., Холстов В. И., Янковская А. А. Биотехнологические методы и нейтрализующие средства для обеззараживания почв и очищения вод, загрязнённых экотоксикантами // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 4. С. 26—33.

## **Analysis of the applicability of methods for rehabilitation of the territories of chemical weapons destruction facilities**

**I. M. YANNIKOV, V. G. ISAKOV, V. A. ALEKSEEV, A. A. ABRAMOVA**  
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

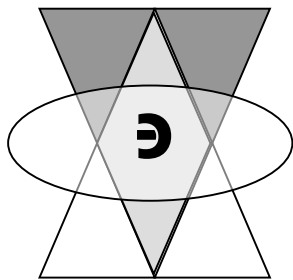
**R. A. GALIAKBEROV**  
Izhevsk Petroleum Research Center CJSC, Izhevsk, Russia

*The article is devoted to the analysis of existing methods for the rehabilitation of territories contaminated as a result of the process of production, storage and destruction of chemical weapons, taking into account the specifics of pollution of zones of protective measures (SPM) of CWD facilities. The authors, on the basis of the analysis carried out, have identified, considered and systematized the techniques and methods of soil cover and water bodies rehabilitation, given their characteristics, examples of their application. The advantages and disadvantages of these methods and techniques are noted, the necessary conclusions and recommendations are made on the use of these methods in the rehabilitation of the zones of influence of CWD objects.*

**Keywords:** facilities for the storage and destruction of chemical weapons (CWDD), rehabilitation, remediation of territories, physical, chemical, physical and chemical, biological methods of cleaning soils and water bodies.

Bibliography — 47 references.

Received October 19, 2021



# Очистка промышленных газовых выбросов

УДК 66.041.54

DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_1\_38

## К проблеме исследования выбросов оксидов азота с продуктами сгорания трубчатых печей с подовой компоновкой горелок

<sup>1,2</sup> В. Д. КАТИН, д-р техн. наук; <sup>3</sup> В. Ю. КОСЫГИН, д-р геол.-минер. наук;

<sup>2</sup> Г. Г. МЕДВЕДЕВА, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

<sup>2</sup> Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

<sup>3</sup> Вычислительный центр Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия

*Приведены результаты исследований выбросов токсичных оксидов азота с продуктами сгорания вертикально-цилиндрических нефтезаводских печей с подовым расположением газомазутных горелок. Проанализированы конструктивные особенности трубчатых цилиндрических печей, эксплуатируемых на нефтеперерабатывающих заводах. Исследовано влияние конструкции горелок и вида сжигаемого топлива на выбросы оксидов азота. Рекомендованы авторские технические решения по сокращению выбросов оксидов азота из вертикально-цилиндрических трубчатых печей.*

**Ключевые слова:** нефтеперерабатывающие заводы, цилиндрические трубчатые печи, газомазутные горелочные устройства, подовая компоновка, экологические исследования, выбросы оксидов азота, критерий экологичности.

Проблема повышения экологической безопасности эксплуатации трубчатых печей нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) является весьма актуальной научно-технической задачей, требующей решения по сокращению вредных выбросов токсичных веществ с продуктами сгорания. По данным [1, 2], в состав продуктов горения жидкого и газообразного топлива входят следующие вредные вещества: оксиды азота, диоксид серы, сажистые частицы, оксид углерода, углеводороды и т. д. Следует отметить, что по данным [1], оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ) являются одними из основных загрязнителей воздушного бас-

сейна, поскольку токсичность продуктов сгорания газообразного топлива на 92—98 % определяется содержанием в них оксидов азота. Это можно объяснить также и тем, что при обеспечении полноты сгорания в дымовых газах газомазутного топлива практически отсутствуют оксид углерода, сажистые частицы и канцерогенные углеводороды.

По степени опасности воздействия на живые организмы оксиды азота относятся к третьему классу опасности, и норма их содержания в атмосферном воздухе жестко лимитирована (ПДК<sub>м.р</sub> в пересчете на  $\text{NO}_2$  составляет 0,085 мг/м<sup>3</sup>). Достаточно высокая токсичность оксидов азота вызывает необходимость проведения экологических исследований уровня их образования и выброса из нефтезаводских печей.

### Конструктивные особенности объектов исследований — вертикально-цилиндрических печей и описание методики экологических исследований

На отечественных НПЗ достаточно широкое распространение нашли вертикально-цилиндрические трубчатые печи конструкции ВНИИнефтемаша типа

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

E-mail: katinvd@mail.ru

**Косыгин Владимир Юрьевич**, ведущий научный сотрудник отдела математического моделирования.

E-mail: kosyginv@inbox.ru

**Медведева Галина Геннадьевна**, доцент кафедры "Инженерные системы и техносферная безопасность".

E-mail: 000290@pnu.edu.ru

Статья поступила в редакцию 18 октября 2021 г.

© Катин В. Д., Косыгин В. Ю., Медведева Г. Г., 2022

ЦС, СЦВ и других с вертикальным расположением змеевика в радиантной камере и свободным факельным сжиганием комбинированного топлива [3]. По данным [4], эти печи компактны и имеют достаточно высокие значения КПД. Их устанавливают на столбчатом фундаменте высотой 2 м, что облегчает обслуживание горелочных устройств (ГУ), расположенных на поду печи (рис. 1).

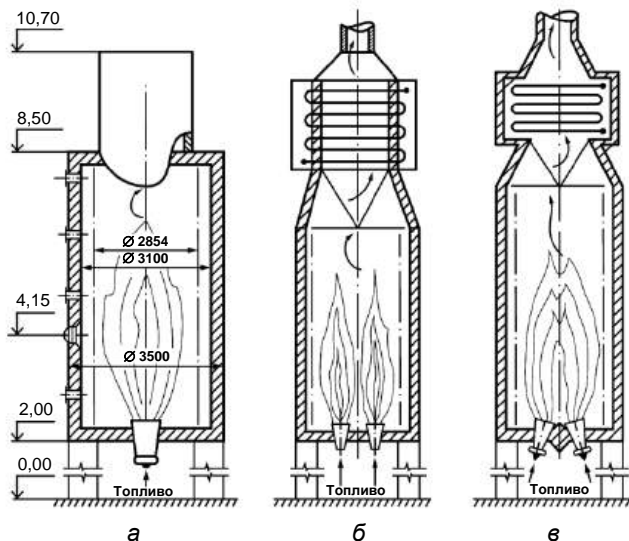


Рис. 1. Схемы вертикально-цилиндрических трубчатых печей с подовой компоновкой горелок:

а — одна горелка со свободным факелом; б — две горелки с обособленными факелами; в — две горелки со сливающимися факелами

Известно, что концентрация оксидов азота в продуктах сгорания в основном определяется конструкцией ГУ, их расположением (компоновкой) на печном агрегате, тепловой мощностью и видом сжигаемого топлива [1, 5].

Целью авторских экологических исследований являлись получение опытных данных по выбросам оксидов азота и разработка технических решений по повышению экологической эффективности работы цилиндрических печей с подовой компоновкой ГУ.

Следует отметить, что в отличие от котельных агрегатов выгорание топлива в цилиндрических трубчатых печах происходит в обособленных свободных факелах, расположенных в сравнительно малотеплонапряженной радиантной камере. Данное обстоятельство определяет более низкий температурный уровень пламени в топке и продуктов сгорания на выходе из трубчатой печи, что можно объяснить прежде всего технологическими особенностями нагрева нефти и нефтепродуктов. Указанные обстоятельства необходимо учитывать при анализе условий образования и выбросов токсичных оксидов азота с продуктами сгорания трубчатых печей. Однако помимо организации топочного процесса со свободным развитием прямого факела, имеет место сжигание топлива и со сливающимися обособленными факелами, что также представляет определенный научно-практический интерес (см. рис. 1).

Следует также отметить недостаточную изученность и отсутствие опытных исследований условий образования токсичных оксидов азота в цилиндриче-

ских нефтезаводских печах, что еще раз подтверждает актуальность и практическую значимость рассматриваемых экологических исследований.

Для экспериментальных измерений концентрации  $\text{NO}_x$  в дымовых газах использовали высокоточный портативный газоанализатор типа Testo-350 немецкой фирмы Testoterm. Максимальная погрешность измеряемой величины концентрации вредного вещества не превышала  $\pm 5\%$  [6].

#### Анализ результатов экологических исследований условий образования и выбросов оксидов азота

Изменение концентрации  $\text{NO}_x$  в зависимости от коэффициента избытка воздуха  $\alpha_t$  в топке цилиндрической печи при раздельном и совместном сжигании газообразного топлива и мазута показано на рис. 2. Видно, что максимум концентрации  $\text{NO}_x$  ( $C = 320 \text{ мг/м}^3$ ) наблюдается при сжигании только жидкого топлива с избытком воздуха  $\alpha_t = 1,22$  (кривая 1).

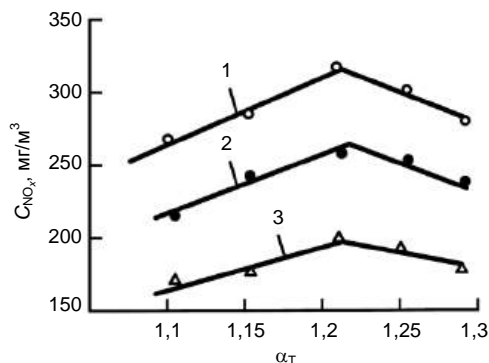


Рис. 2. Зависимость концентрации  $\text{NO}_x$  от коэффициента избытка воздуха в топке цилиндрической печи при раздельно-совместном сжигании газа и мазута: 1 — мазут; 2 — газ и мазут; 3 — газ

Из рис. 2 (кривая 2) также видно, что переход к режиму совместного сжигания газа и мазута (в соотношении 50:50 по тепловыделению) приводит к повышенному выбросу  $\text{NO}_x$  ( $C = 270 \text{ мг/м}^3$ ) по сравнению с раздельным режимом сжигания газа (кривая 3). Сжигание только нефтезаводского газа в топке цилиндрической печи позволяет достичь минимальной концентрации  $\text{NO}_x$  ( $C = 195 \text{ мг/м}^3$ ) по сравнению с ранее указанным режимом горения топлива. Относительно высокую концентрацию оксидов азота при сжигании только мазута можно объяснить увеличением топливной составляющей оксидов азота и максимальной температурой светящегося факела мазутной горелки. Таким образом, с ростом доли мазута в общем количестве комбинированного топлива, сжигаемого в печи, не только увеличиваются выбросы  $\text{NO}_x$ , но и значительно возрастает токсичность продуктов сгорания топлива за счет присутствия в дымовых газах диоксида серы. По этой причине рекомендуется переход на режим раздельного сжигания газа [5, 7].

Результаты экологических исследований авторов [5] различных типов ГУ, работающих только на газо-

образном топливе приведены в таблице, в которой указаны концентрации  $\text{NO}_x$  и критерии экологичности работы газовых горелок, представляющие собой отношение фактической концентрации  $\text{NO}_x$  к максимальной разовой ПДК.

**Экологические фактические параметры работы газовых горелок**

Параметры	Тип горелочного устройства			
	ГИК-2	ГП-2Д	ГП-2	Е-2
Тепловая мощность, МВт	1,3	1,3	1,3	1,3
Концентрация оксидов азота, мг/м <sup>3</sup>	250	230	200	165
Критерий экологичности, Э	2900	2700	2350	1950

Из таблицы видно, что из числа исследованных газовых ГУ одинаковой тепловой мощности повышенным выбросом  $\text{NO}_x$  обладают инжекционные горелки типа ГИК-2 с максимальным показателем экологичности, составляющим  $\text{Э} = 2900$ . Они нуждаются в специальных технических решениях, позволяющих снизить концентрацию  $\text{NO}_x$ .

Подробно рекомендации по реконструкции газовых инжекционных горелок нефтезаводских трубчатых печей описаны в работе [8].

По экологическим параметрам наиболее приемлемыми ГУ с точки зрения минимального выброса оксидов азота являются диффузионные горелки (отечественные типа ГП-2, зарубежные типа Е-2), имеющие неоспоримые преимущества по критерию экологичности работы (см. таблицу).

Таким образом, результаты исследований продемонстрировали влияние типа и конструкции ГУ на выброс токсичных оксидов азота. Из числа исследованных горелок предпочтительны к реальному использованию диффузионные конструкции ГУ. В связи с этим заслуживает практического внимания новая конструкция горелки, ГП-2, с малым выбросом  $\text{NO}_x$  с подачей рециркулирующих дымовых газов в зону горения. На данную техническую разработку получен патент на полезную модель [9]. Кроме того, авторами установлены эколого-технические преимущества подовой компоновки ГУ, применяемой в основном на печах цилиндрической конструкции.

#### **Экологические и технические преимущества подового расположения горелок на вертикально-цилиндрических печах**

Подовая компоновка ГУ на печных агрегатах позволяет решить следующие технические и технологические задачи: регулирование длины и формы факела, выравнивание тепловых потоков по высоте радиантной камеры, значительное снижение тепловых нагрузок экранных поверхностей в зоне максимального тепловыделения [8]. Наряду с этим при подовой компоновке создаются благоприятные условия для теплоотвода вследствие эффективного охлаждения начального участка пламени (факела), что снижает концентрацию  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания

топлива. Подовые горелки более предпочтительны в отношении удобства и безопасности обслуживания, чем настенные, т. е. с многоярусной компоновкой.

При специальных исследованиях [5, 8] авторами установлено, что при слиянии факелов оксидов азота образуется на 20—30 % больше, чем при свободном развитии факелов. Это объясняется увеличением температурного уровня в топке за счет взаимного подогрева факелов, а также возрастанием времени пребывания реагирующих веществ в высокотемпературной зоне, что способствует выходу  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания.

#### **Заключение**

Таким образом, результаты выполненных исследований и анализ опыта эксплуатации цилиндрических трубчатых печей с подовым расположением горелочных устройств позволяют сделать следующие выводы и дать соответствующие практические рекомендации.

Подовое расположение ГУ обеспечивает пониженную концентрацию оксидов азота вследствие эффективного охлаждения начального участка пламени (факела) горелки.

При организации методов сжигания топлива в обособленных факелах и со сливающимися факелами следует отдавать предпочтение по экологическим аспектам первому, поскольку при слиянии факелов наблюдается повышение выброса  $\text{NO}_x$  на 20—30 %.

Для уменьшения выбросов оксидов азота из трубчатых печей с продуктами сгорания следует осуществить переход от совместного сжигания газомазутного топлива к сжиганию только газа, что реально позволит снизить выбросы токсичных  $\text{NO}_x$  на 25—30 %.

Следует также отметить, что внедрение предлагаемых авторами практических рекомендаций и технических решений на НПЗ не требует существенных капитальных и эксплуатационных затрат.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Сигал И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. — СПб.: Недра, 1998. — 312 с.
2. Ахмедов Р. Б., Цирульников Л. М. Технология сжигания горючих газов и жидких топлив. — Л.: Недра, 1984. — 238 с.
3. Шарихин В. В., Ентус Н. Р. Трубчатые печи нефтегазопереработки и нефтехимии. — М.: Сенсоры, 2000. — 392 с.
4. Жидков А. Б. Трубчатые нагревательные печи нефтепереработки и нефтехимии. — СПб.: Артпроект, 2015. — 104 с.
5. Катин В. Д., Булгаков С. В. Проблемы сокращения вредных выбросов в атмосферу из нефтезаводских печей. — Хабаровск: ТОГУ, 2019. — 192 с.
6. Росляков П. В. Контроль вредных выбросов ТЭС в атмосферу. — М.: МЭИ, 2014. — 228 с.
7. Колмогоров А. Н., Катин В. Д. Проектирование высокоэффективных трубчатых печей для НПЗ. — М.: ЦНИИТЭнефтехим, 2005. — 88 с.
8. Катин В. Д., Березуцкий А. Ю. Горелки нефтезаводских печей и охрана окружающей среды от химического и шумового загрязнения. — Владивосток: Дальнаука, 2016. — 220 с.
9. Березуцкий А. Ю., Катин В. Д. Газомазутная горелка. Патент № 158820 РФ, МПК F 23D 17/00. — М., 2016. Бюл. № 2. — 2 с.



## To a problem of research of emissions of nitrogen oxides with products of combustion of tubular furnaces with hearth configuration of torches

<sup>1, 2</sup> V. D. KATIN, <sup>3</sup> V. Yu. KOSYGIN, <sup>2</sup> G. G. MEDVEDEVA

<sup>1</sup> Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

<sup>2</sup> Pacific State University, Khabarovsk, Russia

<sup>3</sup> Computing Center of the Far-Eastern Branch of RAS, Khabarovsk, Russia

*In work results of researches of toxic emissions of nitrogen oxides with products of combustion of vertically-cylindrical petro factory furnaces with hearth arrangement of gas-oil torches are resulted. Design features of the tubular cylindrical furnaces maintained at oil refining factories are analysed. Influence of a design of torches and kind of burnt fuel on emissions of nitrogen oxides is investigated. Author's technical decisions on reduction of emissions of nitrogen oxides from vertically-cylindrical tubular furnaces are recommended.*

**Keywords:** oil refining factories, cylindrical tubular furnaces, gas-oil torches, hearth configuration, ecological researches, emissions of nitrogen oxides, criterion of ecological compatibility.

Bibliography — 9 references.

Received October 18, 2021

УДК 621.436

DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_1\_42

## Оценка эффективности систем адаптации газодизельного двигателя для работы в закрытых помещениях

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

*Рассмотрен вариант использования мочевины и восстановительного катализатора для снижения вредных выбросов в отработавших газах газодизельного двигателя. Данная система является нестандартной. В условиях лабораторных испытаний достигнуты требуемые параметры, а также настройки системы управления подачей газа, рециркуляционного газа и мочевины в распределенной циклической последовательности. Благодаря данным, полученным в стендовых условиях, достигнуты результаты по снижению концентрации вредных веществ в отработавших газах. В зависимости от вида вещества такое снижение достигает 95 %, что соответствует экологическому классу Евро-5.*

**Ключевые слова:** сжиженный углеводородный газ, газодизельный двигатель, закрытые помещения, Евро-5, снижение токсичности выпускных газов,  $\text{NO}_x$ .

Адаптация двигателей к альтернативному топливу становится более актуальным и современным способом по снижению токсичности в выпускных газах и снижению затрат на закупку топлива [1—5]. Однако с возрастанием спроса появляются новые потребности в совершенствовании технологии адаптации дизельных двигателей для работы в зонах с пониженным воздухообменом.

С учетом специфики использования газомоторного топлива в сельском хозяйстве, заключающейся в необходимости применения альтернативных топлив вместо классического, перевод автотракторной техники имеет ряд недостатков и преимуществ. Одним из преимуществ применения сжиженного углеводородного газа в качестве частичного замещения дизельного топлива являются минимальные изменения в системе питания и кривошипно-шатунном механизме двигателя, что позволяет использовать данный вид газа без высоких капиталовложений, в результате получая короткий срок окупаемости. Из основных недостатков данной системы адаптации является детонационное горение смесового заряда и повышенное содержание загрязняющего вещества ( $\text{NO}_x$ ) на выпуске [6—8].

На протяжении нескольких лет исследований и испытаний были достигнуты результаты по возможности адаптации дизельных двигателей к работе по газодизельному процессу с использованием сжижен-

ного углеводородного газа, которые позволяли на всех режимах работы двигателя контролировать смесовой заряд и тем самым обеспечивать бездетонационную работу. Данный процесс заключался в регулировке объема запальной дозы дизельного топлива в зависимости от режимов работы двигателя, что позволило снизить процент замещения.

При использовании систем адаптации дизельных двигателей были достигнуты высокие результаты по снижению содержания вредных веществ в выпускных газах. Особое внимание уделяли содержанию  $\text{CO}$ , так как его снижение достигало 90%, но содержание  $\text{NO}_x$  при этом существенно возрастало и проблема его снижения до сих пор не решена.

Для реализации технологии по приведению газодизельного двигателя к экологическим нормам Евро-5 и возможности внедрения его в технологические операции в помещениях с ограниченным воздухообменом в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ длительное время проводились исследования по переводу сельскохозяйственной техники на газомоторное топливо в целях снижения концентрации вредных веществ в отработавших газах. Разработаны методика и программа исследований в целях создания доработанной по результатам испытаний системы нейтрализации отработавших газов.

При проведении стендовых испытаний контролируют следующие показатели: частоту вращения коленчатого вала двигателя, крутящий момент, расход воздуха, часовой расход топлива, температуру охлаждающей жидкости, масла, отработавших газов, воздуха на входе в двигатель, давление наддува, противодавление на выпуске.

Испытания дизельного двигателя проводят циклами:

- снятие внешней и частичной регуляторной характеристики;
- определение токсичности отработавших газов.

Уютов Сергей Юрьевич, младший научный сотрудник.

E-mail: s\_uyutov@mail.ru

Овчинников Евгений Валентинович, научный сотрудник.

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

Чаплыгин Михаил Евгеньевич, старший научный сотрудник.

E-mail: misha2728@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 19 октября 2021 г.

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

Эксплуатационная мощность, максимальный крутящий момент, частота вращения и удельный расход топлива на режиме эксплуатационной мощности при работе на дизельном топливе должны соответствовать техническим условиям на двигатель.

В течение испытаний температура окружающего воздуха должна быть в пределах 20—35 °С, давление в пределах 97,4—103,4 кПа.

Цель данной работы — проведение анализа исследований эффективности систем адаптации и нейтрализации отработавших газов газодизельного двигателя для работы в закрытых помещениях.

### Экспериментальная часть

Исследования дизельного двигателя по мощностным показателям проводят на всех нагрузочных и скоростных режимах, характерных для условий эксплуатации.

Экспериментальным путем определяют кривую крутящего момента при максимальной нагрузке в целях расчета значений крутящего момента для предписанных стандартами режимов испытаний в условиях, обеспечивающих полезную мощность. Калибровка динамометра для каждого режима испытания рассчитывается по формуле

$$s = P(n)L / 100,$$

где  $s$  — калибровка динамометра, кВт;

$P(n)$  — полезная мощность двигателя, кВт;

$L$  — процентная нагрузка.

Скоростные режимы работы дизельного двигателя из диапазона максимальной частоты вращения холостого хода и частоты вращения коленчатого вала, соответствующей минимально устойчивой частоте вращения, задают вручную.

Коэффициент избытка воздуха определяют, как отношение действительного количества воздуха ( $G_{в.д.}$ ) к теоретически необходимому ( $G'_{в.т.}$ ) для полного сгорания топливной композиции:

$$\alpha = G_{в.д.} / G'_{в.т.}$$

Для определения действительного количества воздуха используют расходомер, состоящий из емкости объемом, равным 200 объемам одного цилиндра двигателя, дифференциального манометра для измерения перепада давления в сопле, термометра для замера температуры поступающего воздуха, сопла для определения скорости движения воздуха.

Действительный расход воздуха (кг/ч)

$$G_{в.д.} = 3600 \cdot c \cdot f \cdot \sqrt{2gH\rho_{в.}},$$

где  $c$  — коэффициент согласования единиц измерения;

$f$  — площадь проходного сечения сопла, м<sup>2</sup>;

$\varphi$  — коэффициент расхода воздуха через сопло;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$H$  — перепад давления в сопле, Па;

$\rho_{в.}$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Плотность воздуха (кг/м<sup>3</sup>)

$$\rho_{в.} = \rho \frac{273 B_0}{760 T_0},$$

где  $\rho$  — плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup> ( $\rho = 1,293$  кг/м<sup>3</sup>);

$B_0$  — барометрическое давление окружающего воздуха, МПа;

$T_0$  — температура окружающего воздуха, К ( $T_0 = t_0 + 273$ ).

Теоретический расход воздуха (м<sup>3</sup>)

$$G_{в.т.} = \ell_0 G_T \cdot 10^{-2},$$

где  $\ell_0$  — теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, кг воздуха/кг топлива;

$G_T$  — часовой расход топлива, кг/ч.

Мощностные показатели дизеля рассчитывают по формулам:

- эффективная мощность двигателя (кВт)

$$N_e = \frac{P_T n}{1000};$$

- эффективный КПД

$$\eta_e = \frac{3600}{Q_H g_e},$$

где  $P_T$  — нагрузка на тормоз, кгс;

$n$  — частота вращения, мин<sup>-1</sup>;

$Q_H$  — удельная теплота сгорания кг топлива, Дж/кг;

$g_e$  — удельный расход топлива, г/(кВт·ч).

Моторные исследования дизеля по экономическим показателям проводят в различных нагрузочных и скоростных режимах, характерных для условий эксплуатации.

Скоростные режимы работы дизеля из диапазона от максимальной частоты вращения холостого хода до частоты вращения коленчатого вала, соответствующей минимально устойчивой частоте вращения, задают вручную путем установки рычага подачи топлива в требуемое положение.

Экономические показатели дизеля рассчитывают по формулам:

- часовой расход топлива, кг/ч

$$G_T = 3,6 \frac{\Delta G_T}{\Delta \tau},$$

где  $\Delta G_T$  — навеска топлива, г;

$\Delta \tau$  — время расхода навески топлива, с.

- удельный эффективный расход топлива (г/(кВт·ч)),

$$g_e = \frac{G_T \cdot 1000}{N_e}.$$

Внешнюю регуляторную характеристику снимают в соответствии с процедурой ГОСТ 18509-88 "Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний" при положении органов управления регулятором вращения, соответствующем полной подаче топлива. Характеристики следует снимать путем последовательного увеличения нагрузки от нулевой до полной до частоты вращения при максимальном крутящем моменте и дальнейшего снижения нагрузки до достижения частоты вращения, составляющей не более 85 % от частоты вращения при максимальном крутящем моменте. Температура охлаждающей жидкости на выходе из двигателя поддерживается в пределах 80—90 °С.

Диаграмма характеристик работы двигателя должна отображаться вдоль всей кривой нагрузки от максимальной до частоты вращения на холостом ходу с использованием по крайней мере пяти точек измерения на интервалах в 1000 мин<sup>-1</sup> и точек измерения в пределах ±50 мин<sup>-1</sup> от частоты вращения при заявленной максимальной мощности.

Условия снятия регуляторной характеристики двигателя: основные регулировки двигателя — нормативные (паспортные), в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя; рычаг управления подачей топлива установлен на максимум и закреплен; температурный режим двигателя 80...90 °С, моторного масла — 90...95 °С; изменяются нагрузка на тормозе и частота вращения коленчатого вала.

Последовательность снятия регуляторной характеристики двигателя: установить требуемую частоту вращения; замерить (в трехкратной повторности) расход топлива и нагрузку на тормозе при данной частоте вращения (перед замером дизель должен проработать на заданном режиме не менее 5 мин, продолжительность измерения расхода топлива должна быть не менее 30 с); установить следующую частоту вращения и повторить предыдущие операции.

Условия снятия характеристики холостого хода: основные регулировки двигателя — нормативные, в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя; температурный режим двигателя нормальный; нагрузка на тормозе равна нулю; изменяется частота вращения путем перемещения рычага подачи топлива.

Последовательность снятия характеристики холостого хода: установить требуемую частоту вращения; замерить (в трехкратной повторности) расход топлива при данной частоте вращения (перед замером двигатель должен проработать на заданном режиме не менее 5 мин, продолжительность измерения расхода топлива должна быть не менее 30 с); установить следующую частоту вращения и повторить предыдущие операции.

При проведении исследований в целях определения токсичности отработавших газов комплектация двигателя должна соответствовать условиям определения номинальной мощности по ГОСТ 18509-88 "Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний".

Моторные исследования дизеля по экологическим показателям проводят на различных нагрузочных и скоростных режимах, характерных для усло-

вий эксплуатации, которые определяют согласно ГОСТ Р 41.96-2011 и правила ЕЭК ООН № 49, по процедуре ESC в соответствии с циклом, состоящим из 8 и 13 режимов.

Частоту вращения коленчатого вала двигателя (А, В и С) рассчитывают следующим образом:

$$\begin{cases} A = n_{lo} + 25 \% (n_{hi} - n_{lo}); \\ B = n_{lo} + 50 \% (n_{hi} - n_{lo}); \\ C = n_{lo} + 75 \% (n_{hi} - n_{lo}); \end{cases}$$

$$\begin{cases} A = n_{lo} + 25 \% (n_{hi} - n_{lo}); \\ B = n_{lo} + 50 \% (n_{hi} - n_{lo}); \\ C = n_{lo} + 75 \% (n_{hi} - n_{lo}). \end{cases}$$

Высокая частота вращения  $n_{hi}$  определяется посредством расчета 70 % от указанной максимальной полезной мощности  $P(n)$  на кривой мощности.

Низкая частота вращения  $n_{lo}$  определяется посредством расчета 50 % от указанной максимальной полезной мощности  $P(n)$  на кривой мощности.

Максимальную мощность, значения  $n_{hi}$  и  $n_{lo}$  определяют с помощью кривой мощности, а частоту вращения коленчатого вала двигателя (А, В и С) — рассчитывают в соответствии с изложенными положениями.

Испытания проводят в порядке следования номеров режимов, рассчитанных в соответствии с изложенными положениями, для всех исследуемых видов топлив.

Частота вращения двигателя и нагрузка должны достигаться в первые 20 с. Предписанная частота вращения поддерживается в пределах ±50 мин<sup>-1</sup>, а предписанный крутящий момент — в пределах ±2 % от максимального крутящего момента при соответствующей частоте в ходе испытаний.

Для оценки количества газообразных выбросов результаты по НС, СО и NO<sub>x</sub> в течение каждого режима определяют на основе средних результатов.

Измеренная концентрация должна быть преобразована в концентрацию выхлопных газов во влажном состоянии. Поскольку выбросы NO<sub>x</sub> зависят от состояния внешнего воздуха, концентрация NO<sub>x</sub> должна быть скорректирована на температуру и влажность окружающего воздуха с помощью коэффициентов в приведенных далее формулах:

$$K_{H,D} = 1 / [1 + A(H_a - 10,71) + B(T_a - 298)],$$

где  $A = 0,309 G_{fuel} G_{atrd} - 0,0266$ ;  $B = -0,209 G_{fuel} / G_{ajrd} + 0,00954$ ;  $T_a$  — температура воздуха, К;  $H_a = 6,2220 R_a p_a / (p_b - p_a R_a \cdot 10^{-2})$  — влажность всасываемого воздуха, г воды/кг сухого воздуха;  $R_a$  — относительная влажность всасываемого воздуха, %;  $p_a$  — давление насыщенного пара всасываемого воздуха, кПа;  $p_b$  — общее барометрическое давление, кПа.

Расход выбросов по массе (г/ч) при предположении, что плотность выхлопных газов составляет 1,293 кг/м<sup>3</sup> при 273 К (0 °С) и 101,3 кПа, для каждого

режима должен рассчитываться следующим образом:

$$\begin{cases} \text{NO}_{\text{mass}} = 0,001587 \text{ NO}_{\text{conc}} K_{hd} G_{\text{exhw}}; \\ \text{CO}_{\text{mass}} = 0,000966 \text{ CO}_{\text{conc}} G_{\text{exhw}}; \\ \text{CH}_{\text{mass}} = 0,000479 \text{ CH}_{\text{conc}} G_{\text{EXHW}}; \end{cases}$$

где  $\text{NO}_{\text{conc}}$ ,  $\text{CO}_{\text{conc}}$ ,  $\text{CH}_{\text{conc}}$  — средние концентрации ( $\text{млн}^{-1}$ ) в первичных выхлопных газах.

Удельные выбросы ( $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ ) должны рассчитываться для всех отдельных компонентов следующим образом:

$$\begin{cases} \text{NO}_x = \sum \text{NO}_{\text{mass}} W_{Fi} / (\sum P(n)_i W_{Fi}); \\ \text{CO} = \sum \text{CO}_{\text{mass}} W_{Fi} / (\sum P(n)_i W_{Fi}); \\ \text{CH} = \sum \text{CH}_{\text{mass}} W_{Fi} / (\sum P(n)_i W_{Fi}). \end{cases}$$

Для оценки выбросов твердых частиц для каждого режима должны регистрироваться общие массы проходящих через фильтры проб.

Определение вредных выбросов с выхлопными газами производят с помощью газоанализатора концентрации оксида углерода (CO), диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ), углеводородов (CH), кислорода ( $\text{O}_2$ ) и оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ). Дымность выхлопных газов определяют с помощью измерителя дымности отработавших газов МЕТА-01МП (производитель газоанализатора "Автотест" и измерителя дымности — НПФ "МЕТА"). Поверку производил Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Московской области.

Более точное определение химического состава выхлопных газов проводят методами газовой хроматографии и масс-спектрометрии на газо-масс-спектрометрическом хроматографе в соответствии с методиками и стандартами на методы определения химического состава, в том числе стандартом ASTM D2650-10 (стандартный метод определения химического состава газов с помощью масс-спектрометрии [10]).

Масс-спектрометрия — метод исследования вещества, основанный на определении отношения массы к заряду ионов, образующихся при ионизации представляющих интерес компонентов пробы. Это один из мощнейших способов качественной идентификации веществ, допускающий также количественное определение.

Масс-спектрометрия обеспечивает уверенную идентификацию как относительно простых, так и сложных молекул. Единственное общее требование: молекула должна поддаваться ионизации. Поскольку к настоящему времени придумано множество способов ионизации компонентов пробы, масс-спектрометрию можно считать практически всеохватывающим методом.

Масс-спектр — это зависимость интенсивности ионного тока (количества вещества) от отношения массы к заряду (природы вещества). Природа анализируемого вещества, особенности метода ионизации и вторичные процессы в масс-спектрометре могут влиять на масс-спектр. Так, ионы с одинаковыми отношениями массы к заряду могут оказаться в разных частях спектра и даже сделать часть его непрерывным.

Большинство небольших молекул при ионизации приобретает только один положительный или отрицательный заряд. Поэтому особенно сильно данный эффект проявляется в отношении крайне больших молекул. При некоторых видах ионизации молекула может распадаться на несколько характерных частей, что даёт дополнительные возможности идентификации и исследования структуры неизвестных веществ.

Точное определение массы анализируемой молекулы позволяет определить её элементный состав. Масс-спектрометры используют для анализа органических и неорганических соединений.

Органические вещества в большинстве случаев представляют собой многокомпонентные смеси индивидуальных компонентов. Задача аналитики состоит в том, чтобы определить, сколько компонентов составляет органическое вещество, узнать, какие это компоненты (идентифицировать их) и сколько каждого соединения содержится в смеси. Для этого идеальным является сочетание хроматографии с масс-спектрометрией. Газовая хроматография как нельзя лучше подходит для сочетания с ионным источником масс-спектрометра с ионизацией электронным ударом или химической ионизацией, поскольку в колонке хроматографа соединения уже находятся в газовой фазе.

Многие органические соединения невозможно разделить на компоненты с помощью газовой хроматографии, но можно с помощью жидкостной хроматографии. Для сочетания жидкостной хроматографии с масс-спектрометрией возможно использовать источники ионизации в электроспрее (ESI) и химической ионизации при атмосферном давлении (APCI).

Важнейшими техническими характеристиками масс-спектрометров являются чувствительность, динамический диапазон, разрешение, скорость сканирования.

Важнейшая характеристика при анализе органических соединений — чувствительность. Для того чтобы достигнуть как можно большей чувствительности при улучшении отношения сигнала к шуму, прибегают к детектированию по отдельным выбранным ионам. При этом необходимо использовать высокое разрешение на приборах с двойной фокусировкой, где можно добиться высокого уровня достоверности и использовать тандемную масс-спектрометрию, когда каждый пик, соответствующий материнскому иону, можно подтвердить масс-спектром дочерних ионов.

Газовая хроматография — универсальный метод разделения смесей разнообразных веществ, испаряющихся без разложения. При этом компоненты разделяемой смеси перемещаются по хроматографической колонке с потоком газа-носителя. По мере движения разделяемая смесь многократно распределяется между газом-носителем (подвижной фазой) и нелетучей неподвижной жидкой фазой, нанесенной на инертный материал (твердый носитель), которым заполнена колонка. Принцип разделения — неодинаковое сродство веществ к летучей подвижной фазе и стационарной фазе в колонке. Компоненты смеси селективно задерживаются последней, поскольку растворимость их в этой фазе различна, и таким образом разделяются (компонентам с большей раство-

римостью требуется большее время для выхода из жидкой фазы, чем компонентам с меньшей растворимостью). Затем вещества выходят из колонки и регистрируются детектором. Сигнал детектора записывается в виде хроматограммы автоматическим потенциометром (самописцем) или регистрируется компьютером.

Газовый хроматограф представляет собой прибор, использующий принцип хроматографии в системах газ-адсорбент или газ-жидкость (рис. 1). В аппаратурном оформлении это совокупность нескольких самостоятельных, параллельно функционирующих систем: источник газа-носителя и блок подготовки газов, испаритель, термостат колонок и сами хроматографические колонки, детектор, система регистрации и обработки данных. Типичная блок-схема газового хроматографа изображена на рис. 1. Газовые функциональные связи показаны стрелками, электрические — одинарной линией, термостатируемые элементы заключены в пунктирный контур.

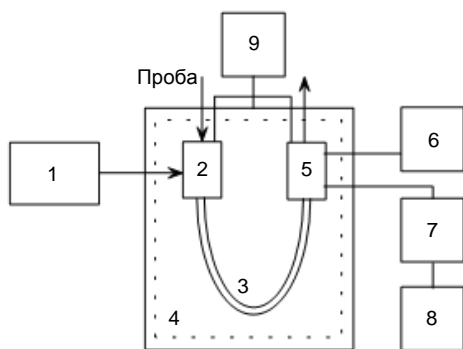


Рис. 1. Принципиальная схема газового хроматографа:

1 — система подготовки газов; 2 — система дозирования; 3 — колонка; 4 — система термостатирования; 5 — система детектирования; 6 — блок питания детектора; 7 — усилитель сигнала детектора; 8 — регистратор (самописец, компьютер); 9 — измерители режима хроматографа (расход газов, стабилизация температур и электрического питания детекторов)

Эффективность использования метода газовой хроматографии в каждом отдельном случае зависит от правильного выбора жидкой фазы, размера частиц и природы твердого носителя, скорости и природы газа-носителя, температуры, количества вводимой пробы, длины колонки и других факторов. Поскольку теоретический учет этих факторов не всегда возможен, эффективность анализа в большой степени зависит от практических знаний и опыта экспериментатора.

В основу той или иной классификации хроматографических методов могут быть положены различные характерные признаки процесса (табл. 1—3). При этом следует учитывать, что существуют промежуточные варианты, неукладывающиеся в рамки строгой классификации. Более того, именно такие промежуточные варианты часто оказываются весьма перспективными и даже единственно возможными для решения сложных задач анализа.

Разнообразные варианты хроматографии укладываются в относительно простую схему классификации в зависимости от используемой подвижной фазы и характера межмолекулярных взаимодействий. В зависимости от способа перемещения сорбатов вдоль слоя сорбента различают проявительный (элюационный), фронтальный, вытеснительный методы и электрохроматографию.

Приведенная классификация хроматографических методов не может считаться исчерпывающей. Так, в газовой хроматографии широкое распространение получили комплексные (гибридные) методы. Из них наиболее важными являются реакционная (реакторная) газовая хроматография (сочетание химических превращений и хроматографического процесса) и хромато-масс-спектрометрия (последовательное соединение хроматографической колонки и масс-спектрометра с получением полных или частичных масс-спектров для каждого из компонентов исследуемой смеси).

Таблица 1

Классификация вариантов хроматографии по фазовым состояниям

Подвижная фаза	Неподвижная фаза	Название метода
Газ	Адсорбент	Газоадсорбционная
	Жидкость	Газожидкостная
Жидкость	Адсорбент	Жидкостно-адсорбционная
	Жидкость	Жидкость-жидкостная
Газ или пар в сверхкритическом состоянии	Адсорбент	Флюидно-адсорбционная
	Жидкость	Флюидно-жидкостная
Коллоидная система	Сложная композиция твердых и жидких компонентов	Полифазная хроматография

Таблица 2

Варианты хроматографии по характеру взаимодействий

Механизм процесса разделения	Вариант хроматографии
По размеру молекул	Ситовая
За счет физической адсорбции или растворения	Молекулярная
За счет ионного обмена	Ионообменная
За счет водородных связей, химического сродства и т. д.	Хемосорбционная

Таблица 3

Варианты хроматографии по способу проведения процесса

Способ проведения	Вариант хроматографии
В цилиндрическом слое сорбента	Колоночная
В слое сорбента на плоской поверхности	Планарная
В пленке жидкости или слое сорбента, размещенном на внутренней стенке трубки	Капиллярная
В полях электрических, магнитных, центробежных и других сил	Хроматография в полях сил



Выбор метода определения химического состава ОГ на газовом хроматографе зависит от качественного состава ОГ и опыта исследователя, ввиду того что при выполнении качественного анализа перед аналитиком стоят следующие задачи:

- провести анализ смеси известного происхождения. Для этого необходимо собрать как можно больше сведений по предполагаемому составу смеси. Подтвердить наличие в образце какого-либо соединения;
- провести анализ смеси неизвестного происхождения. Решение задач этого типа представляет большую сложность, наряду с хроматографическими приемами идентификации используются дополнительные методы;
- определить сортность продуктов методом сравнения хроматограмм ("техника отпечатков пальцев").

Исходными экспериментальными данными, с помощью которых выполняется качественный газохроматографический анализ, являются элюционные характеристики.

Исходя из цели анализа и условий его проведения, следует выбирать такой детектор, характеристики которого соответствуют им в наибольшей степени. Критерии оценки детекторов общеприняты для всех систем детектирования. К ним относятся:

- чувствительность;
- минимально детектируемая концентрация (предел обнаружения);
- фоновый сигнал;
- уровень шума;
- скорость дрейфа нулевой линии;
- диапазон линейности детектора;
- эффективный объем и время отклика (быстродействие);
- селективность.

Необходимо точно выдерживать постоянство условий анализа, так как площадь пика зависит от скорости газа-носителя, температуры, метода ввода пробы и других факторов. При соблюдении всех правил относительная ошибка определения составляет менее 1 %.

В качестве газа-носителя обычно применяют аргон, гелий, азот, водород, воздух. Выбор газа зависит от типа детектора и некоторых других причин. Чем больше относительная молекулярная масса газа-носителя, тем выше качество разделения компонентов анализируемой смеси (благодаря уменьшению их диффузии). Газы с меньшей молекулярной массой обеспечивают лучшую чувствительность детекторов по теплопроводности.

Наибольшая эффективность хроматографической колонки достигается при постоянной скорости потока газа-носителя. Обычно используются скорости потоков 75–100 мл/мин для колонок с внешним диаметром 6 мм и 25–50 мл/мин для колонок с внешним диаметром 3 мм. Скорость газа-носителя определяется вмонтированными в прибор ротаметрами. Для обеспечения устойчивости газового потока приборы снабжены стабилизаторами давления. Газы для хроматографии должны быть тщательно осушены. Другие примеси практически не влияют на удерживаемые объемы, но ухудшают стабильность показаний и чувствительность детекторов.

Результатом газовой хроматографии является *хроматограмма*.

Хроматограммой (элюционной кривой) называют зависимость сигнала детектора от объема газа-носителя или от времени. Каждому компоненту смеси на хроматограмме соответствует отдельный пик — максимум регистрируемого сигнала детектора или концентрации компонента хроматографируемой смеси в элюенте. В зависимости от типа используемого детектора получают дифференциальные и интегральные хроматограммы.

На дифференциальной хроматограмме различают следующие составные части: нулевую линию — участок хроматограммы, полученной при регистрации сигнала дифференциального детектора во время выхода из колонки чистого газа-носителя; пик несорбирующегося компонента; участок хроматограммы, полученной при регистрации сигнала детектора во время выхода из колонки одного из определяемых компонентов (или смеси нескольких неразделенных компонентов). Пик ограничивается фронтом, соответствующим возрастанию концентрации компонента до максимальной, и тылом, отвечающим убыванию концентрации компонента в газе-носителе.

Исходными экспериментальными данными, с помощью которых выполняют качественный газохроматографический анализ, являются элюционные характеристики:

- первичные параметры удерживания (к их числу относятся время удерживания, объем удерживания и соответствующий им отрезок на хроматограмме — расстояние удерживания);
- исправленные и приведенные параметры удерживания;
- абсолютные параметры удерживания;
- относительные параметры удерживания.

### Результаты исследований

В ходе проведения испытаний на стендовом оборудовании газодизельного двигателя на базе дизельного двигателя Минского моторного завода (Д-243) получены результаты по предлагаемой методике, подтверждающие снижение концентрации содержания вредных веществ в отработавших газах до соответствующих Нормам Евро-5. На рис. 2 представлены сравнительные показатели содержания вредных веществ до и после использования системы нейтрализации.

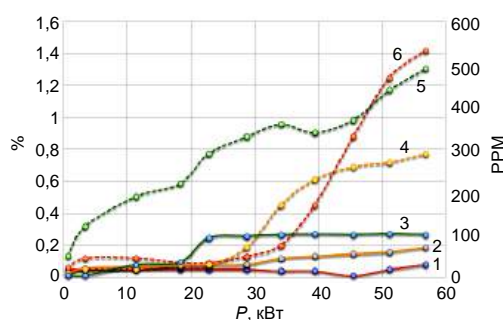


Рис. 2. Экологические сравнительные показатели двигателя:  
1 — CO (нейтрализатор); 2 — CH (нейтрализатор);  
3 — NO<sub>x</sub> (нейтрализатор); 4 — CH (газодизель);  
5 — NO<sub>x</sub> (газодизель); 6 — CO (газодизель)

Экспериментальные исследования по определению мощностных, топливно-экономических и экологических характеристик двигателя проводились в стендовых условиях на лабораторной базе ФГБНУ ФНАЦ ВИМ с использованием электрических тормозных стендов GPF 17 b, топливного расходомера фирмы AVL. Экологические показатели определялись при помощи газоаналитического оборудования MultiGaz (Италия) и META (Россия).

При проведении исследований двигателя в целях определения токсичности отработавших газов комплектация соответствовала условиям определения номинальной мощности по ГОСТ 18509-88. Режимы работы дизеля определяли согласно ГОСТ Р 41.96-2011 и правил ЕЭК ООН № 49 по процедуре ESC. Погрешности измерений газоаналитического оборудования составляли: абсолютная  $\pm 0,5$  %; относительная  $\pm 5$  %.

Необходимо отметить, что использование регулируемой рециркуляции отработавших газов позволяет исключить детонационную работу дизеля на сжиженном углеводородном газе и снизить выброс вредных веществ в окружающую среду. С использованием сжиженного углеводородного газа по предлагаемой технологии общий выброс CO, оксидов азота и углеводородов (CH) снизился на 40—62 % (табл. 4).

Таблица 4

Испытания по процедуре ESC

Результаты испытаний по процедуре ESC согласно ГОСТ Р 41.96-2011 и правил ЕЭК ООН № 49 (выбросы вредных веществ)	Удельный расход загрязняющих веществ, г/(кВт·ч)		
	CO <sub>сред</sub>	CH <sub>сред</sub>	NO <sub>x,сред</sub>
Без использования катализатора	0,0381	0,6331	13,2751
При использовании катализатора	0,0165	0,2557	6,8708

## Вывод

Согласно полученным данным и обзору исследований по адаптации дизельных двигателей к работе на альтернативном виде топлива большое значение имеет содержание вредных веществ в отработавших газах. Именно при переходе на альтернативное топливо применение стандартных систем по снижению данного негативного фактора невозможно по многим причинам. Рассмотренная методика и научное исследование систем адаптации и нейтрализации отработавших газов дают возможность при незначительных капиталовложениях получить требуемый адаптированный к технологическим операциям дизельный двигатель, подходящий к любому классу тракторов, для работы в помещениях с ограниченным воздухообменом.

Использование альтернативных моторных топлив позволяет снизить долю затрат на топливо в выра-

жении себестоимости производства сельскохозяйственной продукции, уменьшить негативную экологическую нагрузку от токсичных выбросов с отработавшими газами двигателей сельскохозяйственных тракторов, обеспечить выполнение Правил ЕЭК ООН № 96, Директивы 97/68 ЕС и соответствующего отечественного стандарта ГОСТ Р.41.96.

СУГ обладает уникальной комбинацией коммерческих и экологических преимуществ по сравнению с другими альтернативными топливами, что обеспечило в последнее десятилетие значительное расширение его использования в качестве моторного топлива в различных странах.

Применяемый катализатор является восстановительным по причине высокого содержания NO<sub>x</sub> — оксидов азота в отработавших газах. Он позволяет обеспечить требуемое снижение содержания NO<sub>x</sub>, повышенный ресурс и стойкость к загрязнению.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев Г. С., Кочетков М. Н., Овчинников Е. В. Комплексное использование газомоторного топлива в сельскохозяйственном производстве: сб. науч. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий». — М.: ВИМ, 2014. С. 136—140.
2. Chia fon Lee, Yuxin Pang, Han Wu, Juan J. Hernández, Sai-fei Zhang, Fushui Liu. The optical investigation of hydrogen enrichment effects on combustion and soot emission characteristics of CNG/diesel dual-fuel engine // Fuel. 2020. V. 280. № 118639. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118639>
3. Song J. T., Feng Z. X., Lv J. Y., Zhang H. L. Experimental Study on Combustion and Performance of a Natural Gas-Diesel Dual-Fuel Engine at Different Pilot Diesel Injection Timing [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1115/1.4046011>
4. Bayat Y., Ghazikhani M. Experimental investigation of compressed natural gas using in an indirect injection diesel engine at different conditions // J. Cleaner Production. 2020. V. 271. № 122450. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122450>
5. Kontsesa A., Triantafyllou G., Ntziachristosa L., Samaras Z. Particle number (PN) emissions from gasoline, diesel, LPG, CNG and hybrid-electric light-duty vehicles under real-world driving conditions. Atmospheric Environment. 2020. V. 222.
6. Измайлов А. Ю., Савельев Г. С., Кочетков М. Н., Овчинников Е. В., Уютов С. Ю. Автотракторный дизельный двигатель, адаптированный к работе на сжиженном углеводородном газе по газодизельному процессу // Изв. Московского государственного технического университета МАМИ. 2018. № 1(35). С. 10—15.
7. Oommen L. P., Kumar G. N. Experimental studies on the impact of part-cooled high-pressure loop EGR on the combustion and emission characteristics of liquefied petroleum gas // J. Therm. Anal. Calorim. 2020. № 141. P. 2265—2275. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09762-0>
8. 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. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-0761-4\\_39](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0761-4_39)
9. Савельев Г. С., Кочетков М. Н., Овчинников Е. В., Уютов С. Ю., Родионов А. В., Трубицин А. В., Царькова Т. В. Разработать технологию, технические средства и исходные требования на разработку газодизелей с системой адаптации к работе на сжиженном углеводородном газе (СУГ). Технический отчет ФГБНУ ВИМ, 2015.

## Evaluation of the effectiveness of gas-diesel engine adaptation systems for indoor operation

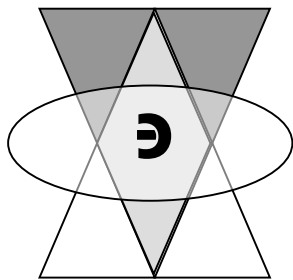
S. Yu. UYUTOV, E. V. OVCHINNIKOV, M. E. CHAPLYGIN  
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

*This article discusses the option of using urea and a reducing catalyst to reduce harmful emissions in the exhaust gases of a gas-diesel engine, this system is not standard and in laboratory tests the required parameters were achieved, as well as settings for the control system for the supply of gas, recirculated gas and urea in a distributed cyclic sequence. Thanks to the data obtained in bench conditions, results were achieved in reducing the concentration of harmful substances in the exhaust gases. Depending on the type of substance, the reduction reaches up to 95 %, which corresponds to the environmental class Euro-5.*

**Keywords:** liquefied petroleum gas, gas-diesel engine, closed premises, Euro-5, reduction of exhaust gases toxicity, NO<sub>x</sub>.

Bibliography — 9 references.

Received October 19, 2021



## Общие вопросы

УДК 502.33(571.620)  
DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_1\_50

### Оценка экологического развития Хабаровского края в период с 2000 по 2018 годы

И. В. ГЛАДУН, канд. биол. наук; А. А. ЧЕРЕНЦОВА, канд. биол. наук  
Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

*Проведен анализ экологического развития Хабаровского края с 2000 по 2018 гг., который продемонстрировал, что целевые показатели региональной экополитики по снижению антропогенного воздействия в крае не были достигнуты, расхождения между темпами экономического роста и антропогенного воздействия на окружающую среду не выявлено. При разработке новой региональной экополитики до 2030 г., предусматривающей курс на "новую индустриализацию", предложено вводить для основных экономических отраслей региональные прогнозные экопоказатели, основанные на технологических показателях наилучших доступных технологий.*

**Ключевые слова:** эколого-экономическое развитие, региональные экологические показатели, декамплинг, государственное экологическое управление, Хабаровский край.

В Российской Федерации приняты ключевые документы, определяющие приоритеты, цели, задачи и механизмы достижения по экономической, социальной и экологической составляющим устойчивого развития, охватывающие области целей "Повестки дня до 2030 г.": Энергетическая, Водная, Климатическая стратегии, Стратегия национальной и экологической безопасности. Президентом Российской Федерации утверждены "Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 г.". Правительством РФ приняты и реализуются государственная программа "Охрана окружающей среды" и национальный проект "Экология", содержащие целевые индикаторы экоэффективности, которые должны способствовать обеспечению экологически ориентированного роста экономики.

В Хабаровском крае в 2020 г. закончился срок реализации "Стратегии экологической безопасности" [1]. Правительством края принята новая концепция эко-

логической безопасности, в которой перечислены основные направления региональной экологической политики [2]. В связи с утверждением правительством края "Стратегии социально-экономического развития на период до 2030 г." [3], предусматривающей курс на "новую индустриализацию" региона, необходимо подвести итоги эколого-экономического развития края за истекший период и предложить методологический подход к повышению эффективности регионального экологического управления с учетом направлений экономического роста Хабаровского края, определенных Указом Президента РФ "О мерах по социально-экономическому развитию Дальнего Востока" [4].

В России произошли серьезные изменения в методах государственного управления эколого-экономическим развитием (реализация принципов: обеспечение снижения негативного воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду на основе использования наилучших доступных технологий (НДТ); обеспечение природопользователями сочетания общего и индивидуального подходов к установлению мер государственного регулирования в области охраны окружающей среды (ООС)). Эти изменения меняют институциональную среду функционирования экономических субъектов. Президентом России в качестве одной из основных задач государственной политики в области ООС утверждено обеспечение экологически ориентированного роста эко-

---

Гладун Игорь Владимирович, доцент кафедры "Экология, ресурсопользование и БЖД".  
E-mail: igor-gladun@yandex.ru  
Черенцова Анна Александровна, доцент кафедры "Экология, ресурсопользование и БЖД".  
E-mail: anna\_cherencova@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16 марта 2021 г.

© Гладун И. В., Черенцова А. А., 2022

номики и внедрения экологически эффективных инновационных технологий. Указом Президента РФ "О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 г." [5] определен набор показателей для оценки состояния экологической безопасности, который частично включает индикаторы, рекомендуемые Экономическим и Социальным Советом ООН [6]. Расчет показателей экоэффективности имеет решающее значение для государственного управления антропогенным воздействием на окружающую среду (ОС) при региональной политике, направленной на экономический рост [7, 8]. Для обеспечения перехода России на траекторию экологически сбалансированного развития, по оценке экспертов, необходимо к 2050 г. снизить антропогенное давление на окружающую среду (образование и размещение отходов, выбросы и сбросы загрязняющих веществ (ЗВ)) в 2 раза от уровня 2016 г. [9].

По мнению авторов работы [10], концепция экологической политики России не предусматривает действующих механизмов сохранения единого эколого-социально-экономического пространства страны: разработка стратегии регионального развития ограничивается перспективами роста экономики и освоения ресурсного потенциала. В [11, 12] автор считает, что формирование модели устойчивого развития Хабаровского края, должно включать в том числе разработку набора региональных показателей оценки экоэффективности.

Экологическая эффективность региона проявляется в модели экономического роста, основанного на минимальных величинах потребления природных ресурсов и антропогенного воздействия на ОС, и является ключевым элементом измерения прогресса в области "зеленого" роста [13]. Устойчивое развитие региона проявляется в рассогласовании, с одной стороны, темпов экономического роста, с другой — потребления природных ресурсов и антропогенной нагрузки на компоненты ОС (эффект декаплинга) [6]. Проводится множество исследований, направленных на анализ эффекта декаплинга: расчет интенсивности антропогенного давления и индикатора декаплинга позволяет проводить сопоставление устойчивости экономического развития на уровне стран [14—17], регионов [18, 19] и отдельных городов [20]. Индикатор декаплинга легко вычисляется и позволяет определять тенденции экоэффективности экономических процессов и, как следствие, анализировать эффективность государственной экологической политики, включая региональные аспекты социально-экономического развития [21].

Цель данной работы — в исследование эффективности региональной экологической политики: оценка экологического развития Хабаровского края за период с 2000 по 2018 гг. посредством анализа эколого-экономических показателей и сравнения их с программными (целевыми) федеральными и региональными показателями экоэффективности.

Актуальность и значимость проведенного исследования определяется принятием Россией целей устойчивого развития, необходимостью их учета в региональной экополитике и введением в практику государственного управления ООС принципов технологического нормирования.

Новизна исследования состоит в теоретической постановке и практическом обосновании исследовательской задачи внедрения в практику регионального экологического управления критериев отбора инвестиционных проектов по индикаторам экоэффективности, основанных на технологических показателях НДТ к видам экономической деятельности, реализуемым в пространственных полюсах (центрах) развития, характеризующихся специфической специализацией.

Методика исследований была основана на построении графиков взаимосвязи показателей. Проводился анализ факторов, влияющих на динамику экологических показателей.

Интенсивность антропогенного давления на окружающую среду и энергоёмкость (отношение потребления топливно-энергетических ресурсов к валовому региональному продукту (ВРП)) оценивали по показателям экоэффективности регионального производства [6, 21]: интенсивности образования отходов производства и потребления (т/ВРП), валовых выбросов ЗВ (т/ВРП), сбросов сточных вод (СВ) (м³/ВРП). Показатель ВРП был приведен к ценам 2000 г.

Для отслеживания временных изменений во взаимосвязи между антропогенным давлением и движущими силами региональной экономики (ВРП) использовали индикатор декаплинга ( $D_0$ ). В эколого-экономических отношениях декаплинг предполагает достижение экономического прогресса при более низких темпах ресурсопотребления и снижении деградации окружающей среды.

Расчет индикатора декаплинга был выполнен по формуле, приведенной в [21]:

$$D_0 = 1 - [(ИАВ_k / ВРП_k) / (ИАВ_n / ВРП_n)],$$

где  $ИАВ_k$  — интенсивность антропогенного давления на окружающую среду на конец оцениваемого периода;

$ВРП_k$  — валовой региональный продукт на конец оцениваемого периода

$ИАВ_n$  — интенсивность антропогенного давления на окружающую среду на начало оцениваемого периода;

$ВРП_n$  — валовой региональный продукт на начало оцениваемого периода.

Анализ и оценка результатов расчетов были даны согласно критериям, указанным в работе [22], с учетом исследования [23]. Отмечено, что индикатор декаплинга имеет существенные ограничения, которые проявляются, в частности, в условиях стагнации или снижения экономического роста. Индикатор может принимать максимальное значение 1. В этом случае давление на окружающую среду равно 0. В случае, когда индикатор декаплинга меньше или равен 0, эффект декаплинга отсутствует. Следовательно, индикатор декаплинга отражает процентное изменение темпа роста (или уменьшения) объемов антропогенного давления на окружающую среду при изменении темпов ВРП на 1 % за определённый отрезок времени.

Информационную базу исследования составили данные Федеральной службы государственной ста-

тики, государственные доклады правительства Хабаровского края и Правительства Российской Федерации о состоянии окружающей среды.

Хабаровский край — один из наиболее развитых в экономическом отношении субъектов ДФО, выделяющийся инновационным потенциалом. Утверждённая Правительством Хабаровского края стратегия социально-экономического развития до 2030 г. предполагает "новую индустриализацию" региона: индекс физического объема ВРП (% в сопоставимых ценах к 2016 г.) должен достигнуть значений 116,6 при консервативном сценарии; 136,1 — при базовом; 183,6 — при целевом.

Выполненный анализ изменения показателя ВРП продемонстрировал, что с 2000 по 2018 гг. при общей тенденции к росту в отдельные временные (кризисные) периоды показатель снижался (рис. 1). В 2008 г. экономический рост Хабаровского края замедлился (с минимумом индекса физического объема ВРП в 2009 г.). Следующее снижение показателя ВРП произошло после 2014 г. (с минимумом в 2015 г.). Рассматривая изменение ВРП, отметим, что в 2008—2009 гг., а также в 2014—2015 гг. рост экономики Хабаровского края отсутствовал. Наибольшие индексы физического объема ВРП Хабаровского края были выявлены в 2000 и 2010 гг. В 2002 г., 2004—2007, 2012—2014 и 2017—2018 гг. значение индекса физического объема ВРП колебалось в пределах ( $\pm 2$ ) % от показателя за предыдущий период. Экономиче-

ское состояние края в эти годы можно оценить как стабильное.

На примере провинций материкового Китая изучена связь между производством и энергопотреблением при помощи анализа энергетической кривой Кузнеця и производственной функции Кобба—Дугласа, показано, что потребление энергии является основным фактором, определяющим региональное экономическое развитие [24]. Энергоемкость региона тесно коррелирует с выбросами ЗВ в атмосферу. Эта связь доказана многочисленными исследованиями. Так, в работе [25], выполненной на примере провинции Шаньдун (КНР, период 1995—2012 гг.), продемонстрировано, что выработка электроэнергии в энергетическом секторе является основным фактором роста эмиссий парниковых газов.

Путем изучения взаимосвязи экономических и экологических показателей Хабаровского края в рамках концепции устойчивого роста, выполнен анализ изменения показателя энергоемкости: с 2012 по 2018 гг. энергоемкость региональной экономики уменьшилась в 1,15 раз. Линия тренда демонстрирует тенденцию к уменьшению показателя, но линейная аппроксимация дала низкую достоверность: прогноз на снижение энергоемкости неточен (рис. 2). На территории Хабаровского края, как и других "северных" субъектов РФ, значение этого показателя превышает средние по России, что, вероятно, обусловлено природно-климатическими условиями региона.

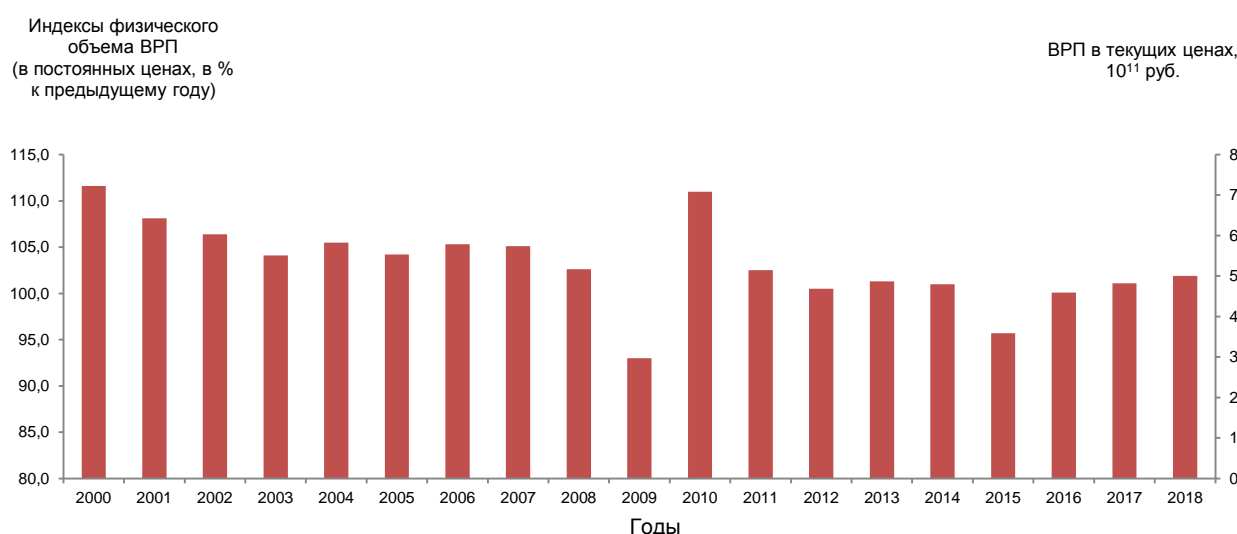


Рис. 1. Изменение валового регионального продукта Хабаровского края



Рис. 2. Энергоемкость ВРП в Хабаровском крае



В [26] при исследовании энергоэффективности экономики России в сравнении с другими странами, продемонстрировано наличие прямой зависимости между объемом ВВП и потребляемой энергией: при экономическом кризисе темпы роста энергопотребления падают и, как следствие, снижаются выбросы ЗВ. Анализ панельных данных Хабаровского края подтверждает наличие связи между показателями: динамика интенсивности выбросов ЗВ, так же как энергоемкость, демонстрирует тенденцию к снижению (рис. 3). Возможное объяснение наблюдаемой тенденции — структурные сдвиги в экономике края: спад обрабатывающих отраслей промышленности и расширение добывающих отраслей [27]. При реализации принятой Правительством края стратегии социально-экономического развития, предполагающей формирование структуры хозяйства на основе политики "новой индустриализации" и развитие наукоемких отраслей, интенсивность загрязнения атмосферы может уменьшиться за счет технологической модернизации производства. Об этом свидетельствуют результаты исследований в работе [28]. При проверке гипотезы экологической кривой Кузнеця (ЭКК) на 80 российских регионах (период 2012—2017 гг.) обнаружена связь между изменением доли промышленности в ВРП и удельными выбросами: с увеличением доли промышленности до 40 % удельные выбросы уменьшались у большинства регионов РФ, вероятно за счет модернизации производства и роста природоохранных инвестиций [28]. Согласно расчетам точка перегиба ЭКК для Хабаровского края — около 630 тыс. руб. на человека. С этого уровня ВРП на душу населения удельные выбросы начинают снижаться.

Анализ динамики показателя интенсивности сбросов СВ продемонстрировал, что в рассмотренный период наблюдалась тенденция к их снижению (рис. 3). Уменьшение показателя обусловлено снижением сбросов крупнейшими водопользователями в основной водный объект Хабаровского края — реку Амур. Однако общий объем сброса загрязненных СВ во все поверхностные водные объекты края вырос на 6 % с 2015 по 2019 гг. (госдоклад о состоянии и об ООС Хабаровского края в 2019 г., с. 47). В исследованиях, проведенных по регионам СЗФО (2010—

2017 гг.), также был продемонстрирован рост сброса загрязненных СВ от 6 до 145 %. Сокращение данного показателя наблюдалось только в Архангельской и Мурманской областях (на 21,3 и 6,2 % соответственно) [29]. В большинстве субъектов ПФО сброс СВ за период с 2010 по 2016 гг., в отличие от регионов СЗФО, значительно снизился, по мнению исследователей, за счет снижения объема хозяйственно-питьевого использования воды и уменьшения водопотребления на производственные нужды [30].

В Хабаровском крае, по-видимому, на уменьшение интенсивности сбросов влияют те же факторы. Согласно госдокладу "О состоянии и использовании водных ресурсов РФ в 2017 г." (с. 165) сброс сточных вод в р. Амур водопользователями г. Хабаровска с 2009 по 2017 гг. уменьшился на 24,3 млн м<sup>3</sup>, а согласно данным Росстата, численность населения Хабаровского края с 2000 по 2018 гг. снизилась на 145,6 тыс. чел.

Интенсивность образования отходов в Хабаровском крае показала устойчивый рост (рис. 3). Динамика отходоёмкости региональной экономики в целом соответствовала данным по РФ: согласно госдокладу "О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году" [31] в 2018 г. на территории Российской Федерации образовалось 7 266 млн т отходов, что на 16,8 % выше уровня 2017 г. Удельный показатель общего объема образования отходов на единицу ВВП в 2018 г. в РФ составил 81,3 т на 1 млн руб., в Хабаровском крае этот показатель в 2018 г. достиг значения 1037,3 т на 1 млн руб. ВРП.

При исследовании эколого-экономического развития регионов СЗФО также обнаружен рост объемов образования отходов (за исключением Мурманской области), причем, как и в настоящем исследовании, темп роста отходов значительно превышал темп роста ВРП [8]. Известно, что в число факторов, определяющих уровень регионального антропогенного воздействия, входят отраслевая структура хозяйства и применяемые промышленные технологии. В работе [32] продемонстрировано, что трансформации территориальных структур хозяйства в субъектах тихоокеанской России с 2004 по 2014 гг. практически

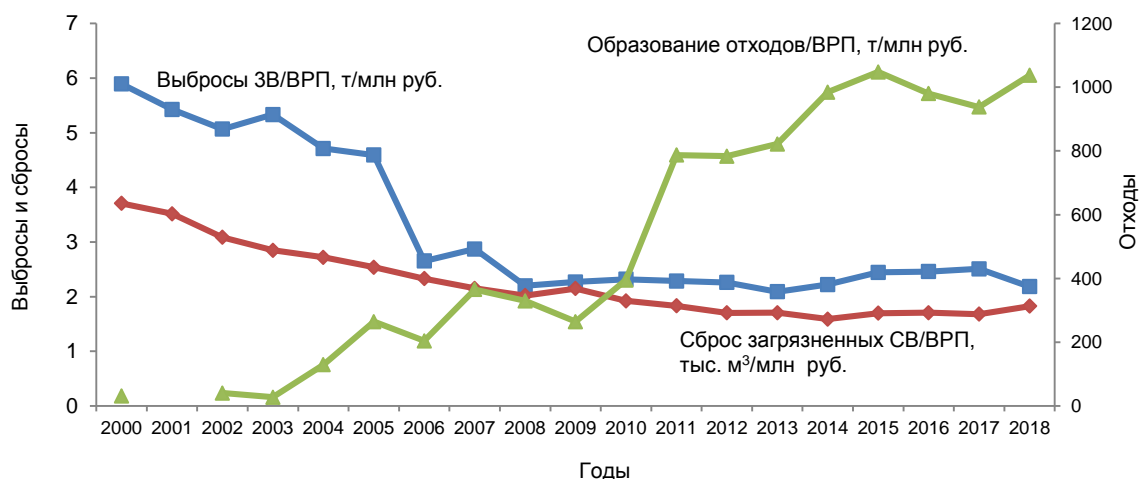


Рис. 3. Изменение интенсивности антропогенной нагрузки на окружающую среду

не сопровождалось ростом доли обрабатывающих производств; доля добывающих производств, наоборот, возрастала несколько более высокими темпами в северной зоне и менее — в южной. Территориально-отраслевая система промышленности Хабаровского края проходит "индустриально-добывающий этап с развитием производственной инфраструктуры и дальнейшей деградацией обрабатывающих производств" [33]. Следовательно, рост отходоёмкости экономики Хабаровского края обусловлен происходящими структурными изменениями: на горнодобывающую промышленность приходится основные объёмы образования промышленных отходов (в 2013 г. — 98,3 % от валового образования; в 2018 г. — 95,7 %) [27]. По-видимому, реализация Национальной программы социально-экономического развития Дальнего Востока (на период до 2024 г. и на перспективу до 2035 г.) приведет к увеличению объема образования отходов, поскольку предполагает строительство ГОКов на базе золоторудных месторождений (Чульбаткан, Дяпле, Кутынское, Дурмин), Правоурмийского оловорудного месторождения, золото-меднопорфирового месторождения Малмыж, а горнопромышленные компании имеют специфические особенности, препятствующие снижению отходоёмкости производства (получение добавочной прибыли без инноваций, монопольное положение на российском рынке природного сырья) [34].

Стратегическая цель государственной политики в области экологического развития определена Президентом РФ в "Основах госполитики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 г.": решение социально-экономических задач, обеспечивающих экологически ориентированный рост экономики и сохранение благоприятной окружающей среды. По прогнозу Минэкономразвития России, интенсивность загрязнения атмосферы выбросами стационарных источников в 2020 г. должна составить 0,3 т/млн р. ВВП, а в 2030 г. — 0,22 т/млн р. ВВП [35]. Согласно показателю № 2 госпрограммы РФ "Охрана окружающей среды" интенсивность валовых выбросов от стационарных источников в 2024 г. планируется на уровне 0,25 т/млн р. ВВП [36]. В соответствии с целевыми показателями "Стратегии экологической безопасности Хабаровского края на период до 2020 года" в 2020 г. объем выбросов ЗВ на единицу ВРП по инерционному сценарию развития должен был составлять 0,42 т/млн р., по инновационному сценарию — 0,14 т/млн р.

На рис. 4 показано сравнение фактических показателей удельных выбросов ЗВ с целевыми индикаторами,

установленными в экопрограмме Хабаровского края. В 2018 г. фактический показатель интенсивности валовых выбросов в атмосферный воздух был выше целевого прогнозного индикатора (на 2020 г.) в 8 раз для инерционного и в 24 раза для инновационного сценария развития экономики.

Согласно краевой стратегии экобезопасности в 2020 г. объем сброса промышленных сточных вод должен был составить 0,71 тыс. м<sup>3</sup>/млн р. ВРП по инерционному сценарию развития и 0,21 тыс. м<sup>3</sup>/млн р. — по инновационному сценарию. Фактические удельные сбросы ЗВ в поверхностные водные объекты в 2018 г. оказались выше целевого прогнозного показателя инерционного сценария развития в 4 раза и инновационного сценария — в 9 раз (рис. 5).

Приведенные данные демонстрируют, что по состоянию на 2018 г. целевые программные показатели интенсивности загрязнения атмосферы и водных объектов не были достигнуты ни по одному из сценариев развития Хабаровского края, что свидетельствует о неэффективности регионального экологического планирования и государственного экологического управления.

В табл. 1 приведены значения индикатора декарбонизации в выбранные периоды, характеризующие ростом или спадом экономики Хабаровского края. Слабый относительный декарбонизационный эффект отмечен между выбросами ЗВ и ВРП в 2000—2008 и 2015—2018 гг., между сбросами СВ и ВРП в 2000—2008 и 2009—2014 гг., между образованием отходов и ВРП — в 2008—2009 гг. В остальные временные периоды эффект декарбонизации отсутствовал. В исследованиях [23] было установлено (1990—2012 гг.), что в периоды экономического спада Аргентины наблюдалось проявление отрицательного (слабого и сильного) декарбонизационного эффекта. Выбросы ЗВ меньше реагировали на экономический спад, чем на рост, что обусловлено производством и потреблением на стадии экономического роста товаров длительного пользования, способствующих сохранению уровня выбросов во время экономического спада. Работа [23] интересна еще и тем, что автор отметила, что в условиях рецессии слабый декарбонизационный эффект между экономическим ростом и выбросами ЗВ является более предпочтительным, поскольку в обоих случаях хотя интенсивность эмиссии растет, при слабом декарбонизационном эффекте общий объем эмиссии снижается. Авторы [28, 37] также продемонстрировали, что в период кризиса темпы спада экономики значительно превышают темпы снижения загрязнений.

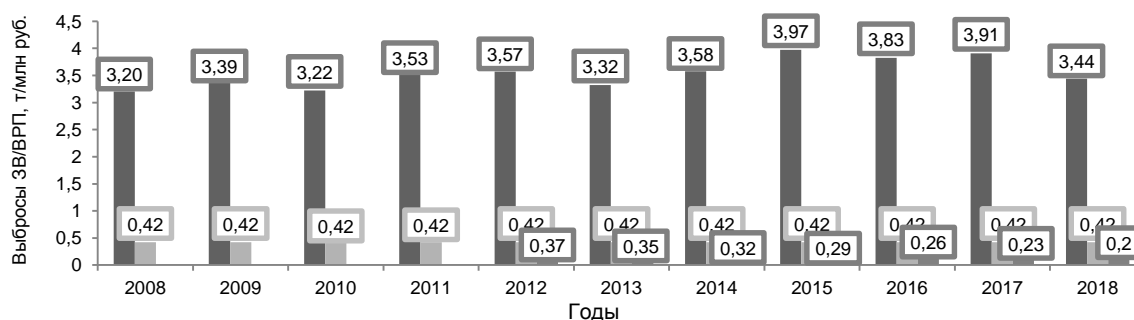


Рис. 4. Изменение интенсивности валовых выбросов ЗВ (фактических и целевых):

■ — факт; ■ — инерционный сценарий; ■ — инновационный сценарий

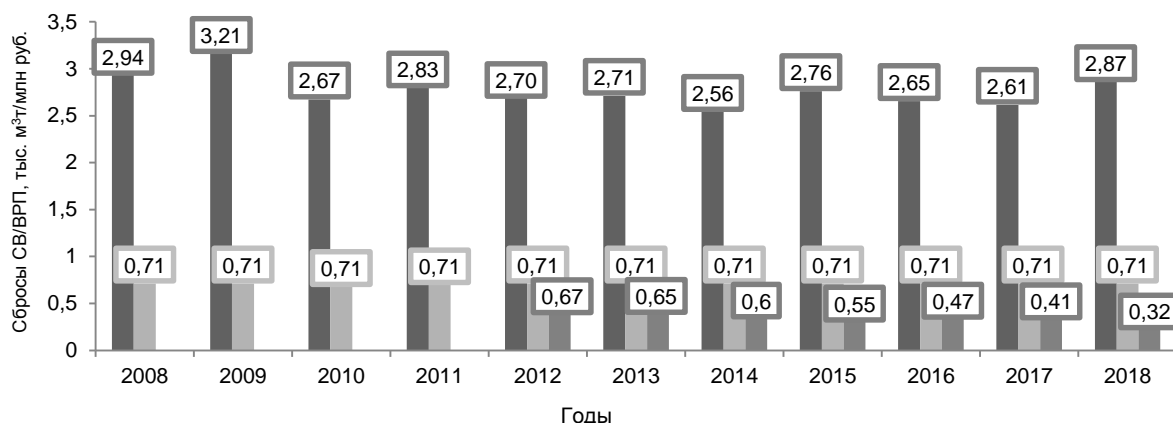


Рис. 5. Изменение интенсивности валовых сбросов ЗВ (фактических и целевых):

■ — факт; ■ — инерционный сценарий; ■ — инновационный сценарий

Таблица 1

Индикатор декарбонизации в отдельные периоды экономического развития Хабаровского края

Временной интервал, гг.	Выбросы ЗВ	Сбросы СВ	Образование отходов
2000—2008	0,46	0,20	-14,74
2008—2009	-0,06	-0,09	0,18
2009—2014	-0,05	0,20	-3,01
2014—2015	-0,11	-0,08	-0,08
2015—2018	0,13	-0,04	0,04

Отметим, что согласно связи экономического развития региона и выбросов ЗВ (период 2010—2016 гг.) эффект абсолютного декарбонизации проявляется в Забайкальском, Камчатском, Хабаровском краях, Сахалинской области, Чукотском автономном округе [37]. В Хабаровском и Приморском краях в период 2005—2016 гг. проявлялся декарбонизация между экономическим развитием и выбросами  $\text{SO}_2$  и взвешенных веществ. Наибольший декарбонизация по разделу ВЭД "Обрабатывающие производства" показал Приморский край [17]. Авторы [39] продемонстрировали, что хотя в целом в КНР намечается тренд к декарбонизации связи между экономическим ростом и выбросом парниковых газов, на региональном уровне в КНР имеются существенные различия между экономическим потенциалом отдельных провинций и загрязнением атмосферы. В исследованиях экономического развития провинций КНР (период с 2000 по 2015 гг.) показано, что определяющим фактором, способствующим декарбонизации экономического роста и эмиссии парниковых газов, является повышение энергоэффективности регионального производства [40].

Следовательно, экологическая ситуация в Хабаровском крае в исследуемый период характеризовалась снижением валовых выбросов ЗВ в атмосферу и сбросов СВ за счет сокращения доли промышленности (а также расширения сферы услуг [27]) и ростом объемов образования отходов из-за увеличения доли добывающих производств. Согласно приоритетам госполитики РФ в области обращения с отходами (п. 2 ст. 3 федерального закона "Об отходах производства и потребления" [41]) максимальное использование исходных сырья и материалов является основным механизмом уменьшения отходоёмкости. Последовательная реализация данного приоритетного порядка при формировании новой стратегии эко-

логического развития Хабаровского края будет затруднительна, если территориально-отраслевая система промышленности будет развиваться по индустриально-добывающему направлению. По мнению авторов, проводивших аналогичные исследования в северных регионах РФ [8, 19, 29], причина увеличения антропогенного загрязнения обусловлена приоритетами социально-экономического развития региона над вопросами охраны окружающей среды. В случае экспортной направленности добываемых в регионе природных ресурсов, являющихся важнейшим источником доходной части бюджета и основой благосостояния страны, усиление доли экологической составляющей в устойчивом развитии невозможно в силу объективных причин [42].

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что любые положительные или отрицательные переходы на траекторию устойчивого регионального развития Хабаровского края были краткосрочными (как правило, в следующем году происходили обратные процессы). Достигнутые фактические показатели экоэффективности не соответствовали плановым целевым индикаторам, что свидетельствует о слабом влиянии регионального экоуправления на экономическое развитие края.

Отечественные исследователи полагают, что для улучшения экологической ситуации в регионах необходимы такие виды государственного управления, как контроль за реализацией стратегических и программных документов, повышение ответственности исполнительных органов власти, развитие механизмов информационного характера. Отмечается важность развития экономических методов госуправления (поддержка "зеленого" роста, включая налоги, кредиты, субсидии, экологическое страхование). Например, в работе [43], цель которой заключалась в исследова-

нии значимости экономических и административных методов государственного управления охраной атмосферного воздуха (на примере строительной индустрии развитых и развивающихся стран), был сделан вывод о том, что стимулирующие методы управления оказывают более значимое влияние на охрану атмосферы. В России также проводят многочисленные исследования, направленные на повышение эффективности региональной экополитики: предлагаются методологические подходы для оценки ее результативности [44] и корректировки плановых показателей [45]; нормативно-правовое регулирование перехода на НДТ [46]; разработка новых экологически ориентированных концепций анализа и управления региональной экономикой в условиях усиливающейся неопределенности [47]. Однако, по-видимому, более перспективным является метод управления, определенный в "Основах государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года" — "внедрение в систему управления качеством окружающей среды методологии определения и оценки экологических рисков в целях повышения обоснованности принятия управленческих решений". На практике он реализуется через процедуры оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) и государственной экологической экспертизы планируемой хозяйственной деятельности. Осуществляют эти процедуры органы федеральной власти. Для проведения объективной оценки и экспертизы проектной документации объектов строительства, перечисленных в ст. 11 федерального закона "Об экологической экспертизе", критериями экоэффективности являются технологические показатели НДТ, утвержденные Минприродой России. При функционировании производственных объектов крупнейших региональных природопользователей, со-

гласно положениям ст. 4.2 федерального закона "Об охране окружающей среды", они находятся под федеральным государственным экологическим надзором, формы государственного статнаблюдения и годовой экоотчетности представляются исключительно в федеральные экологические ведомства, что полностью исключает текущий мониторинг и управление ситуацией со стороны региональной власти. Фактически у региональных органов экологического управления остается единственная административная процедура, способная влиять на реализацию региональной экополитики: согласование на этапе отбора инвестиционных проектов, планируемых к реализации на территории субъекта (например, в целях их включения в государственную программу Российской Федерации "Социально-экономическое развитие Дальневосточного федерального округа"). Однако эта процедура осуществляется формально ввиду отсутствия критериев экологической оценки. Улучшить экологическое состояние региона позволит реализация предложения о необходимости введения в практику государственного экологического управления региональных показателей экоэффективности [11, 12], что позволит оценивать текущий уровень антропогенного воздействия и выполнять прогноз по региону (или по кластерам экономического роста, поскольку Хабаровскому краю, как и другим субъектам ДФО, присуща очаговость хозяйственной деятельности). В основу региональных экоииндикаторов должны быть заложены величины удельного загрязнения, устанавливаемые технологическими показателями НДТ, а региональная инвестиционная политика должна способствовать реализации в регионе инвестпроектов, основанных на технологиях, которые не приведут к увеличению интенсивности загрязнения (табл. 2).

Таблица 2

**Приоритетные загрязняющие вещества (по удельному содержанию)  
для оценки экоэффективности инвестпроектов в Хабаровском крае**

Пространственные полюсы (центры) развития Хабаровского края	Вид экономической деятельности	Нормативный акт Минприроды России. Технологические показатели НДТ	Приоритетное ЗВ в выбросах	Приоритетное ЗВ в сбросах
Верхнебуреинский центр развития	Добыча топливно-энергетических полезных ископаемых	Добычи и обогащения угля	Пыль неорганическая с содержанием кремния менее 20, 20—70, а также более 70 %	Взвешенные вещества
Среднеамурский полюс	Добыча полезных ископаемых, кроме топливно-энергетических	Добычи и обогащения руд цветных металлов	Взвешенные вещества	Сульфат-анион, взвешенные вещества
Среднеамурский полюс	Металлургическое производство	Производства чугуна, стали и ферросплавов	Углерода оксид	—
Южный приграничный полюс; Среднеамурский полюс	Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	Сжигания топлива на крупных установках в целях производства энергии (проект)	Серы диоксид	—
Южный приграничный полюс Среднеамурский полюс	Нефтехимия	Переработки нефти	Серы диоксид	Фенол
Южно-Охотский полюс	Добыча драгоценных металлов	Добычи драгоценных металлов	Взвешенные вещества, водород цианистый	Взвешенные вещества

Разработка региональных экопоказателей позволит повысить качество предупредительного государственного экологического надзора за счет оценки рисков реализации бизнес-проекта не только по критериям социально-экономической и финансовой эффективности, но и по эколого-экономическим индикаторам (реализация принципа учета региональной специфики и принципа превентивности принимаемых управленческих решений), что в перспективе будет способствовать устойчивому развитию региона. Так, согласно "Стратегии социально-экономического развития Хабаровского края", добыча полезных ископаемых (в частности, каменного угля) отнесена к перспективной экономической специализации региона. С учетом утвержденного Минприроды России нормативного документа в области охраны окружающей среды "Технологические показатели НДТ добычи и обогащения угля" [48] и информационно-технического справочника по НДТ "Добыча и обогащение угля" (ИТС 37-2017) [49] представляется возможным разработать региональные экопоказатели выбросов (по пыли неорганической) и сбросов ЗВ (по взвешенным веществам) при производственных процессах добычи и обогащения угля для Верхнебураинского центра развития.

### Заключение

Анализ эколого-экономического развития Хабаровского края в период с 2000 по 2018 гг. показал отсутствие существенного прогресса в переходе к "зеленой экономике": расхождения темпов экономического роста и негативного воздействия на окружающую среду не проявлялось; целевые показатели региональной экологической политики по снижению антропогенного воздействия не были достигнуты. При разработке региональной экологической политики до 2030 г., предусматривающей курс на "новую индустриализацию" Хабаровского края, необходимо проводить сопоставление темпов экономического развития Хабаровского края и загрязнения окружающей среды в разрезе пространственных полюсов (центров) развития. Для этого целесообразно выполнить расчет целевых прогнозных экопоказателей загрязнения водных объектов и атмосферы на основе приоритетных ЗВ по отношению к основным видам экономической деятельности, реализуемым в пространственных полюсах (центрах) развития Хабаровского края. Такой подход позволит Правительству Хабаровского края координировать экологическую политику ведущих российских компаний, осуществляющих экономическую деятельность в Хабаровском крае, с региональной экологической политикой и обеспечивать сбалансированное решение социально-экономических задач и сохранение благоприятной окружающей среды.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Об обеспечении экологической безопасности в Хабаровском крае на период до 2020 года: распоряжение Правительства Хабаровского края от 11.12.2010 № 758-рп (ред. от 08.08.2017) // Собрание законодательства Хабаровского края. 2010. № 12(101). Ч. 2.
2. О реализации экологической политики на территории Хабаровского края: распоряжение Правительства Хабаровского края от 02.10.2020 № 1053-рп [Электронный ресурс]. URL: laws.khv.gov.ru (дата обращения: 30.10.2020).
3. Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Хабаровского края на период до 2030 года: постановление Правительства Хабаровского края от 13.06.2018 № 215-пр (ред. от 29.06.2020) [Электронный ресурс]. URL: laws.khv.gov.ru (дата обращения: 30.10.2020).
4. О мерах по социально-экономическому развитию Дальнего Востока: указ Президента РФ № 427 от 24.06.2020 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2020. № 26. Ст. 4092.
5. О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года: указ Президента РФ // Собрание законодательства Российской Федерации. 2017. № 17. Ст. 2546.
6. Eco-efficiency indicators: measuring resource-use efficiency and the impact of economic activities on the environment. United Nations, 2009 [Электронный ресурс]. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=400&nr=785&menu=1515> (дата обращения: 30.10.2020).
7. Ляковская Е. А., Григорьева К. А. Формирование "зеленой" экономики и устойчивости развития страны и регионов // Вестник ЮрГУ. Сер. "Экономика и менеджмент". 2018. Т. 12. № 1. С. 15—22.
8. Третьякова Е. А. Экологическая интенсивность экономического развития регионов Северо-Запада // Балтийский регион. 2019. Т. 11. № 1. С. 14—28.
9. Доклад "Об экологическом развитии Российской Федерации в интересах будущих поколений": заседание Государственного совета Российской Федерации от 26.12.2016 [Электронный ресурс]. URL: <http://ecoline.ru/> (дата обращения: 30.10.2020).
10. Воронов Б. А., Мирзеханова З. Г., Нарбут Н. А. Особенности концепции Программы по улучшению экологического состояния г. Хабаровск на 2011—2015 гг. // Вестник Дальневосточного отделения РАН. 2011. № 2. С. 83—87.
11. Мирзеханова З. Г. Особенности региональной экологической политики в стратегии перспективного развития Хабаровского края // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29. № 2. С. 119—125.
12. Мирзеханова З. Г. Экологические аспекты современного развития Дальневосточных регионов в форме модели "зеленой экономики" // Региональная экономика: теория и практика. 2018. Т. 16. Вып. 6. С. 1082—1096.
13. Навстречу "зеленой экономике": пути к устойчивому развитию и искоренению бедности [Электронный ресурс]. URL: [http://old.ecocongress.info/5\\_congr/docs/doklad.pdf](http://old.ecocongress.info/5_congr/docs/doklad.pdf) (дата обращения: 30.10.2020).
14. Wang H., Hashimoto S., Yue Q., Moriguchi Y., Lu Z. Decoupling analysis of four selected countries: China, Russia, Japan, and the United States during 2000—2007 // J. Industrial Ecology. 2013. V. 17. № 4. P. 618—629.
15. Yu Y., Chen D., Zhu B., Hu S. Eco-efficiency trends in China, 1978—2010: decoupling environmental pressure from economic growth // Ecological Indicators. 2013. V. 24. P. 177—184.
16. Grand M. C. Carbon emission targets and decoupling indicators // Ecological Indicators. 2016. V. 67. P. 649—656.
17. Забелина И. А. Эффект декарпинга в эколого-экономическом развитии регионов-участников трансграничного взаимодействия // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2019. Т. 12. № 1. С. 241—255.
18. Чумаков В. Н., Фесенко Р. С., Горбунова В. С. Оценка эколого-экономического развития Ленинградской области на основе эффекта декарпинга // Вестник образования и развития науки Российской академии естественных наук. 2018. № 22(3). С. 42—48.
19. Тихонова Т. В. Экологическая оценка экономического роста северного региона // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2018. Т. 11. № 3. С. 162—178.
20. Yu Y., Zhou L., Zhou W. et al. Decoupling environmental pressure from economic growth on city level: the case study of Chongqing in China // Ecological Indicators. 2017. V. 75. P. 27—35.
21. Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth [Электронный ресурс]. URL: [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?doclanguage=en&cote=sg/sd\(2002\)1/final](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?doclanguage=en&cote=sg/sd(2002)1/final) (дата обращения: 30.10.2020).
22. Tapio P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001 // Transp. Policy. 2005. № 12(2). P. 137—151.
23. Grand M. C. Carbon emission targets and decoupling indicators // Ecological Indicators. 2016. V. 67. P. 649—656.
24. Wang Z., Zhao N., Wei W., Zhang Q. A differentiated energy Kuznets curve: Evidence from mainland China // Energy. 2021. V. 214 P. 118942.

25. Wang Q., Jiang X., Li R. Comparative decoupling analysis of energy-related carbon emission from electric output of electricity sector in Shandong Province, China // *Energy*. 2017. V. 127. P. 78—88.
26. Самарина В. П. Оценка энергоэффективности экономики России в сравнении с другими регионами мира и направления ее повышения // *АНИ: экономика и управление*. 2016. Т. 5. № 3(16). С. 178—182.
27. Шабурова Д. П. Анализ и оценка социально-экономических процессов в регионах — основа механизма устойчивости развития (на примере Хабаровского края) // *Власть и управление на Востоке России*. 2019. № 2(87). С. 117—131.
28. Дружинин П. В., Шкиперова Г. Т., Поташева О. В. Особенности развития российских регионов и экологическая кривая Кузнецова // *Региональная экономика. Юг России*. 2020. Т. 8. № 1. С. 155—167.
29. Кожевников С. А., Лебедева М. А. Проблемы перехода к зеленой экономике в регионе (на материалах Европейского Севера России) // *Проблемы развития территории*. 2019. № 4(102). С. 72—88.
30. Валеева Р. Р., Патракова Г. Р. Влияние экологической ситуации территории на устойчивое развитие региона (на примере Приволжского федерального округа) // *Актуальные проблемы экономики и права*. 2019. Т. 13. № 2. С. 1140—1161.
31. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году: гос. доклад. — М.: Минприроды России, НПП "Кадастр", 2019. — 844 с.
32. Бакланов П. Я., Мошков А. В. Структурные трансформации хозяйства в Тихоокеанском регионе России // *Экономика региона*. 2016. Т. 12. Вып. 1. С. 46—63.
33. Мошков А. В. Основные виды природопользования в Дальневосточной части Амурского региона России // *Ученые записки ЗабГУ*. 2014. № 4(57). С. 59—71.
34. Харитоновна Г. Н. Сценарии экологической модернизации горнодобывающих корпораций на инновационной основе // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2011. № 3. С. 123—129.
35. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года: письмо Минэкономразвития России [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499034125> (дата обращения: 30.10.2020).
36. Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Охрана окружающей среды": постановление Правительства РФ от 15.04.2014 № 326 (ред. от 31.03.2020) // *Собрание законодательства Российской Федерации*. 2014. № 18 (ч. III). Ст. 2171.
37. Дружинин П. В., Шкиперова Г. Т., Поташева О. В. и др. Оценка влияния развития экономики на загрязнение воздушной среды // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2020. Т. 13. № 2. С. 125—142.
38. Аникина И. Д., Аникин А. А. Эколого-экономическое состояние регионов: совершенствование методологии и методики оценки // *Вестник Волгоградского государственного университета. Экономика*. 2019. Т. 21. № 4. С. 141—151.
39. Sheng P., Li J., Zhai M., Huang S. Coupling of economic growth and reduction in carbon emissions at the efficiency level: Evidence from China // *Energy*. 2020. V. 213. P. 118747.
40. Chen L., Cai W., Ma M. Decoupling or delusion? Mapping carbon emission per capita based on the human development index in Southwest China // *Science of the Total Environment*. 2020. V. 741. P. 138722.
41. Об отходах производства и потребления: федер. закон № 89-ФЗ от 10.06.1998 (с изм. на 07.04.2020; ред. 14.06.2020) // *Собрание законодательства Российской Федерации*. 1998. № 26. Ст. 3009.
42. Варавин Е. В., Козлова М. В. Оценка развития "зеленой" экономики в регионе. На примере Республики Казахстан // *Экономика региона*. 2018. Т. 14. Вып. 4. С. 1282—1297.
43. Huang Z., Fan H., Shen L., Du X. Policy instruments for addressing construction equipment emission — A research review from a global perspective // *Environmental Impact Assessment Review*. 2021. V. 86. P. 106486.
44. Шкиперова Г. Т., Дружинин П. В. Оценка результативности политики в сфере обеспечения экологической безопасности регионов России // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. 2018. Т. 14. № 12. С. 2356—2372.
45. Зализняк Е. А., Иванцова Е. А., Зализняк Е. Р. КРП государственного управления безопасностью в техносфере на примере охраны атмосферного воздуха // *Природные системы и ресурсы*. 2018. Т. 8. № 3. С. 38—50.
46. Шкиперова Г. Т., Курило А. Е. Государственное регулирование охраны окружающей среды: проблемы и перспективы // *Вестник факультета управления Челябинского государственного университета*. 2017. № 2. С. 49—54.
47. Голованов Е. Б., Михалина Л. М., Екимов К. В. Роль и значение экологической нагрузки в системе региональной экономической безопасности // *Вестник ЮУрГУ. Сер. "Экономика и менеджмент"*. 2018. Т. 12. № 4. С. 14—25.
48. Об утверждении "Технологические показатели наилучших доступных технологий добычи и обогащения угля": приказ Минприроды России от 25.03.2019 № 190 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/554152006> (дата обращения: 30.10.2020).
49. Добыча и обогащение угля. Информационно-технический справочник по наилучшим технологиям (ИТС 37-2017). — М.: Бюро НДТ, 2017. — 294 с.

## Assessment of the environmental development of the Khabarovsk Territory in the period from 2000 to 2018

I. V. GLADUN, A. A. CHERENTSOVA  
Pacific National University, Khabarovsk, Russia

*The article analyzes the environmental development of the Khabarovsk Territory from 2000 to 2018, which showed that the targets of regional eco-policy for reducing anthropogenic impact in the region were not achieved, and there were no discrepancies between the rates of economic growth and anthropogenic impact on the environment. When developing a new regional eco-policy until 2030, which provides for a course towards "new industrialization", it is proposed to introduce regional forecast eco-indicators for the main economic sectors, based on technological indicators of the best available technologies.*

**Keywords:** ecological and economic development, regional environmental indicators, decoupling, state environmental Management, Khabarovsk region.

Bibliography — 49 references.

Received March 16, 2021

УДК 504

DOI: 10.52190/2073-2589\_2022\_1\_59

## Оценка экологической конкурентоспособности топливных энергогенерирующих компаний России

Д. Е. ИВАХНИК, канд. эконом. наук

МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

*Введено в научный оборот понятие "экологическая конкурентоспособность топливных энергогенерирующих компаний (ТЭГК)". Разработан метод оценки экологической конкурентоспособности ТЭГК, где наряду с известными показателями предложено использовать следующие метрики: коэффициент аварийности и инцидентности с экологическими последствиями, коэффициент заботы о биологическом разнообразии в регионах присутствия компании, коэффициент заботы об окружающей среде, коэффициент инвестиций в охрану окружающей среды, эффективность стратегии/политики в области охраны окружающей среды, эффективность системы экологического риск-менеджмента. Проведена апробация разработанного метода на примере деятельности ТЭГК России, в результате чего получен рейтинг экологической конкурентоспособности данных компаний. Показано, что по состоянию на 2020 г. разрыв между первым и последним местами рейтинга составляет 17,8 раз.*

**Ключевые слова:** экологическая конкурентоспособность, топливные энергогенерирующие компании России.

Топливные энергогенерирующие компании России являются важными компонентами энергетической безопасности страны. При этом данные компании оставляют существенный экологический след в результате своей производственно-хозяйственной деятельности, напрямую связанной с использованием природных ресурсов и влиянием на состояние окружающей среды. В связи с этим актуальной является оценка влияния деятельности ТЭГК на состояние окружающей среды и направление ресурсов на реализацию соответствующих мероприятий. Руководство данных организаций должно осознавать свою ответственность за состояние окружающей среды, экологические риски и здоровье населения, проживающего в регионах присутствия ТЭГК. Важно соблюдать экологическую безопасность, паритет финансово-экономических, социальных и экологических показателей.

Вопросы стоимостной оценки влияния предприятия на состояние окружающей среды основательно рассмотрены в работах [1—11]. Прикладные вопросы экологии рассмотрены в работах [12—16].

Несмотря на высокую степень развития концепций в экономике природопользования, природоохранной деятельности и экологии, многие теоретические и практические положения остаются открытыми для изучения (например, проблематика

оценки интегрального влияния предприятия на окружающую среду; взаимосвязи между выбором модели экологического поведения и результативностью производственно-хозяйственной деятельности). Особенно серьезным является значительный разрыв между теоретическими положениями концепций экономики природопользования и практикой функционирования российских промышленных предприятий. Работы российских исследователей носят, как правило, сугубо теоретический характер. Кроме того, как в России, так и за рубежом нет комплексных исследований по рейтинговой оценке компаний с точки зрения экологической конкурентоспособности. Исследование, проведенное автором, позволит восполнить этот разрыв и будет направлено на рейтинговую оценку компаний с точки зрения интегрального воздействия на окружающую среду.

Цель работы — оценка экологической конкурентоспособности ТЭГК. Основные задачи: дать определение понятию "экологическая конкурентоспособность ТЭГК"; разработать метод оценки экологической конкурентоспособности ТЭГК; провести рейтинговую оценку экологической конкурентоспособности ТЭГК; выявить наиболее значимые факторы негативного воздействия анализируемых компаний на окружающую среду.

Дадим следующее определение: *экологическая конкурентоспособность ТЭГК* — комплексная характеристика предприятия за определенный период времени в условиях конкретного рынка, отражающая превосходство/отставание по сравнению с другими предприятиями отрасли по ряду экологических показателей (выбросы в атмосферу парниковых газов CO<sub>2</sub>; выбросы в атмосферу загрязняющих веществ;

---

Ивахник Дмитрий Евгеньевич, доцент, доцент кафедры "Практическая и прикладная информатика".  
E-mail: step99@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9 ноября 2021 г.

© Ивахник Д. Е., 2022



забор воды на производственные нужды; водоотведение загрязненных и недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водоемы; утилизация отходов; аварии и инциденты с экологическими последствиями; сверхнормативная нагрузка на окружающую среду; забота о биологическом разнообразии; расходы и инвестиции в охрану окружающей среды; эффективность стратегии/политики в области охраны окружающей среды; эффективность системы экологического риск-менеджмента; наличие информации в открытых источниках об экологических показателях).

### Авторский метод оценки экологической конкурентоспособности предприятий

Оценку экологической конкурентоспособности предприятий автор предлагает проводить с помощью алгоритма, представленного на рис. 1.

**Этап 1.** Начальным этапом алгоритма является выявление предприятий, подлежащих оценке. Выбор пула предприятий зависит от масштабов и целей планируемого исследования, доступности экологических метрик, заинтересованности компаний в данном исследовании и других факторов. Очевидно, что выбор может охватывать как все предприятия отрасли,

так и отдельные кластеры предприятий, подлежащих оценке.

**Этап 2.** На втором этапе оценки экологической конкурентоспособности предприятий осуществляют постановку цели такой оценки. Среди главных целей оценки можно назвать следующие:

- ранжирование и сравнение предприятий по степени их интегрального негативного воздействия на окружающую среду, т. е. рейтинговая оценка экологической конкурентоспособности;
- выявление наиболее значимых факторов негативного воздействия на окружающую среду;
- разработка мер по снижению нагрузки на окружающую среду и повышение рейтинга экологической конкурентоспособности;
- способствование ведению социально ответственного бизнеса;
- формирование информационной базы для оценки экологических рисков компании.

**Этап 3.** После определения цели оценки экологической конкурентоспособности предприятий следует этап формирования системы метрик для такой оценки. В табл. 1 представлены метрики экологической конкурентоспособности и дана методика их расчета. Пул данных метрик составлен с учетом факторов негативного влияния на окружающую среду топливных энергогенерирующих компаний России.

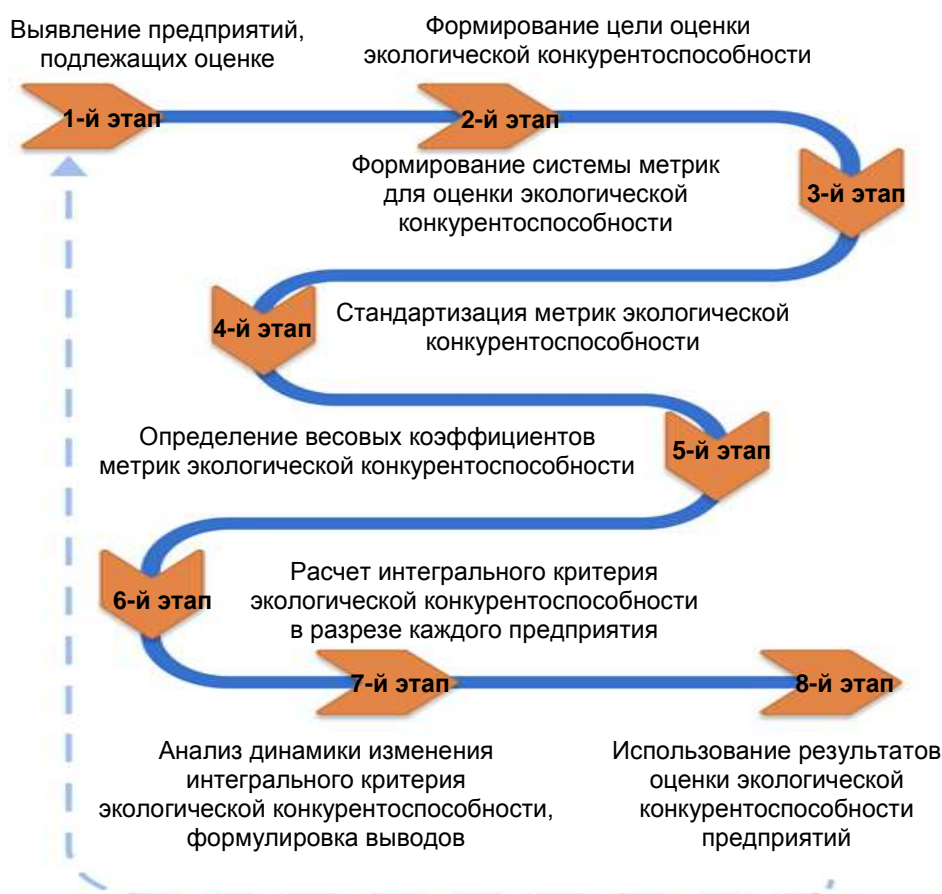


Рис. 1. Алгоритм оценки экологической конкурентоспособности предприятий  
(составлено автором)

Таблица 1

Метрики экологической конкурентоспособности ТЭГК и методика их расчета

№ п/п	Наименование метрики	Расчетная формула
1	Коэффициент удельных прямых выбросов в атмосферу парниковых газов $CO_2$ $K_{уСО_2}$	$K_{уСО_2}$ = валовые выбросы в атмосферу парниковых газов $CO_2$ /(объем полезной выработки электрической и тепловой энергии, т. у. т. *)
2	Коэффициент удельных выбросов в атмосферу загрязняющих веществ $K_{уЗВ}$	$K_{уЗВ}$ = валовые выбросы в атмосферу загрязняющих веществ/(объем полезной выработки электрической и тепловой энергии, т. у. т.)
3	Коэффициент удельного водопотребления на производственные нужды $K_{уВПН}$	$K_{уВПН}$ = объем водопотребления на производственные нужды/(объем полезной выработки электрической и тепловой энергии, т. у. т.)
4	Коэффициент удельного водоотведения загрязненных и недостаточно очищенных вод в поверхностные водоемы $K_{уВЗВ}$	$K_{уВЗВ}$ = объем водоотведения загрязненных и недостаточно очищенных вод в поверхностные водоемы/общий объем водоотведения в поверхностные водоемы
5	Коэффициент утилизации отходов 1—5-го классов опасности $K_{уО}$	$K_{уО}$ = объем утилизированных и обезвреженных отходов 1—5-го классов опасности/общий объем отходов 1—5-го классов опасности
6	Коэффициент аварийности и инцидентности с экологическими последствиями $K_{аи}$	$K_{аи}$ = объем экологических штрафов и выплат по искам/выручка от реализации продукции (работ, услуг)
7	Коэффициент сверхнормативной нагрузки на окружающую среду $K_{сн}$	$K_{сн}$ = объем экологических платежей за сверхнормативные выбросы, сбросы и размещение отходов/общий объем экологических платежей
8	Коэффициент заботы о биологическом разнообразии в регионах присутствия компании $K_{збр}$	$K_{збр}$ = расходы на мероприятия, связанные с сохранением биологического разнообразия в регионах присутствия компании/выручка от реализации продукции (работ, услуг)
9	Коэффициент заботы об окружающей среде $K_{зос}$	$K_{зос}$ = расходы на окружающую среду/выручка от реализации продукции (работ, услуг)
10	Коэффициент инвестиций в охрану окружающей среды $K_{иоос}$	$K_{иоос}$ = инвестиции в охрану окружающей среды/выручка от реализации продукции (работ, услуг)
11	Эффективность стратегии/политики в области охраны окружающей среды	Определяется экспертным путем по 10-балльной шкале, где 10 — наивысший балл
12	Эффективность системы экологического риск-менеджмента	Определяется экспертным путем по 10-балльной шкале, где 10 — наивысший балл
13	Наличие информации в открытых источниках об экологических показателях	Определяется экспертным путем по 10-балльной шкале, где 10 — наивысший балл

\* 1 тыс. кВт·ч = 0,1228 т. у. т. (тонна условного топлива); 1 Гкал = 0,1486 т. у. т.

Метрики 6, 8—12 предложены автором в целях оценки экологической конкурентоспособности компаний дополнительно к известным показателям использовать следующие метрики: коэффициент аварийности и инцидентности с экологическими последствиями, коэффициент заботы о биологическом разнообразии в регионах присутствия компании, коэффициент заботы об окружающей среде, коэффициент инвестиций в охрану окружающей среды, эффективность стратегии/политики в области охраны окружающей среды, эффективность системы экологического риск-менеджмента. Также автором предложена методика расчета показателей 6, 8—10. Пул метрик экологической конкурентоспособности не является закрытым. При необходимости в него могут быть добавлены другие показатели.

**Этап 4.** После расчета метрик экологической конкурентоспособности осуществляют процедуру их стандартизации. Реализация данной процедуры вызвана тем, что метрики выражены в разных единицах и для их свертки требуется привести все показатели к единой системе измерения. Для показателей, рост которых снижает экологическую конкурентоспособность, следует использовать обратную величину, т. е. 1/метрика. Данное уточнение относится к показателям 1—4, 6, 7.

Рассчитанные метрики конкурентоспособности  $x_{ij}$  стандартизируют по формуле

$$x_{ij} = (a_{ij} - \min a_{ij}) / (\max a_{ij} - \min a_{ij}), \quad (1)$$

где  $x_{ij}$  — стандартизированные метрики экологической конкурентоспособности  $i$ -го предприятия;

$\min a_{ij}$  — минимальное значение (по  $j$ )  $i$ -й метрики;

$\max a_{ij}$  — максимальное значение (по  $j$ )  $i$ -й метрики.

**Этап 5.** На данном этапе выполняют расстановку весовых коэффициентов по каждой единичной метрике. Выбор техники расстановки осуществляют привлекаемые для этих целей эксперты [17].

**Этап 6.** На данном этапе определяется интегральный критерий экологической конкурентоспособности каждого предприятия  $K_i$  по формуле

$$K_i = \sum_{j=1}^n k_j x_{ij}, \quad (2)$$

где  $k_j$  — весовой коэффициент  $i$ -й метрики, опреде-

ляемый экспертным путем:  $\sum_{i=1}^n k_i = 1$ .

**Этап 7.** На данном этапе проводят анализ динамики изменения интегрального критерия экологической конкурентоспособности анализируемых предприятий. На этапе формулировки выводов аналитик находится на грани науки, поэтому здесь не может быть четких и единственно верных правил для последующей передачи на уровень принятия решений.

**Этап 8.** На последнем этапе предложенного алгоритма осуществляют использование результатов проведенной оценки. Направления такого использования могут существенно варьироваться в зависимости от первоначальной цели оценки экологической конкурентоспособности компаний.

Из рис. 1 следует, что оценка экологической конкурентоспособности — итеративно осуществляемая циклическая функция, предполагающая после окон-

чания предложенных этапов возврат к этапу выявления предприятий, подлежащих оценке, с последующим прохождением предусмотренных алгоритмом работ.

### Результаты экспериментальной проверки авторского метода оценки экологической конкурентоспособности предприятий

Продemonстрируем возможность использования предложенного метода оценки экологической конкурентоспособности на примере деятельности ТЭГК России.

**Этап 1.** В пул компаний, выбранных для оценки, вошли следующие ТЭГК России: ПАО "Интер РАО", ПАО "ОГК-2", ПАО "Юнипро", ПАО "Энел Россия", ПАО "Мосэнерго". В данный пул включены компании, экологические метрики которых имеются в публичном

пространстве — на сайтах данных компаний, в том числе в годовых отчетах компаний. К сожалению, информация об экологических метриках остальных ТЭГК России в публичном пространстве представлена фрагментарно либо не представлена вообще, что не позволяет провести оценку по этим компаниям.

**Этап 2.** Целями оценки экологической конкурентоспособности ТЭГК России примем следующие:

- рейтинговая оценка экологической конкурентоспособности ТЭГК;
- выявление наиболее значимых факторов негативного воздействия анализируемых компаний на окружающую среду.

**Этап 3.** В табл. 2—6 представлены метрики экологической конкурентоспособности российских ТЭГК.

Таблица 2

Метрики экологической конкурентоспособности ПАО "Интер РАО"

Наименование метрики	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Коэффициент удельных прямых выбросов в атмосферу парниковых газов CO <sub>2</sub>	3,6166	3,5897	3,4387
Коэффициент удельных выбросов в атмосферу загрязняющих веществ	0,0149	0,0147	0,0118
Коэффициент удельного водопотребления на производственные нужды	606,9179	690,8997	656,2863
Коэффициент удельного водоотведения загрязненных и недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водоемы	0,0063	0,0071	0,0013
Коэффициент утилизации отходов 1—5-го классов опасности	0,47	0,98	0,85
Коэффициент аварийности и инцидентов с экологическими последствиями	0,000000522	0,000001037	0,000000740
Коэффициент сверхнормативной нагрузки на окружающую среду	0,001780010	0,001840002	0,045710012
Коэффициент заботы о биоразнообразии в регионах присутствия компании	0,000018008	0,000021007	0,000024004
Коэффициент заботы об окружающей среде	0,001360898	0,001370991	0,000924668
Коэффициент инвестиций в охрану окружающей среды	0,001144816	0,000941769	0,001924364
Эффективность стратегии/политики в области охраны окружающей среды	9,2	7,3	9,1
Эффективность системы экологического риск-менеджмента	6,2	6,4	7,3
Наличие информации в открытых источниках об экологических показателях	8,4	8,6	8,8

Таблица 3

Метрики экологической конкурентоспособности ПАО "ОГК-2"

Наименование метрики	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Коэффициент удельных прямых выбросов в атмосферу парниковых газов CO <sub>2</sub>	4,6149	4,5084	4,4112
Коэффициент удельных выбросов в атмосферу загрязняющих веществ	0,0275	0,0245	0,0220
Коэффициент удельного водопотребления на производственные нужды	392,0705	363,7307	341,3209
Коэффициент удельного водоотведения загрязненных и недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водоемы	0,0912	0,1052	0,1168
Коэффициент утилизации отходов 1—5-го классов опасности	0,68	0,91	0,96
Коэффициент аварийности и инцидентов с экологическими последствиями	0,000001022	0,000001702	0,000002001
Коэффициент сверхнормативной нагрузки на окружающую среду	0,003287788	0,003862415	0,003993802
Коэффициент заботы о биоразнообразии в регионах присутствия компании	0,006873006	0,000123348	0,000214605
Коэффициент заботы об окружающей среде	0,003287788	0,003862415	0,003993802
Коэффициент инвестиций в охрану окружающей среды	0,006873006	0,000123348	0,000214605
Эффективность стратегии/политики в области охраны окружающей среды	6,9	6,6	6,3
Эффективность системы экологического риск-менеджмента	6,8	6,3	5,2
Наличие информации в открытых источниках об экологических показателях	7,3	8,1	8,2

Таблица 4

Метрики экологической конкурентоспособности ПАО "Юнипро"

Наименование метрики	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Коэффициент удельных прямых выбросов в атмосферу парниковых газов CO <sub>2</sub>	4,1106	4,1653	3,8255
Коэффициент удельных выбросов в атмосферу загрязняющих веществ	0,0088	0,0085	0,0075
Коэффициент удельного водопотребления на производственные нужды	1245,6534	986,9809	1402,5774
Коэффициент удельного водоотведения загрязненных и недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водоемы	0,0156	0,0186	0,0177
Коэффициент утилизации отходов 1—5-го классов опасности	0,75	0,98	0,84
Коэффициент аварийности и инцидентов с экологическими последствиями	0,000007850	0,000008710	0,000008151
Коэффициент сверхнормативной нагрузки на окружающую среду	0,001480002	0,004580040	0,006780006
Коэффициент заботы о биоразнообразии в регионах присутствия компании	0,000278004	0,001674014	0,001844071
Коэффициент заботы об окружающей среде	0,272717211	0,767643520	1,492202875
Коэффициент инвестиций в охрану окружающей среды	0,000741045	0,004790780	0,003780079
Эффективность стратегии/политики в области охраны окружающей среды	8,2	7,8	7,9
Эффективность системы экологического риск-менеджмента	8,1	7,4	8,1
Наличие информации в открытых источниках об экологических показателях	8,8	9,1	9,4

Таблица 5

## Метрики экологической конкурентоспособности ПАО "Энел Россия"

Наименование метрики	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Коэффициент удельных прямых выбросов в атмосферу парниковых газов CO <sub>2</sub>	5,3159	4,9869	3,5407
Коэффициент удельных выбросов в атмосферу загрязняющих веществ	0,0488	0,0433	0,0061
Коэффициент удельного водопотребления на производственные нужды	274,9285	281,0348	483,0233
Коэффициент удельного водоотведения загрязненных и недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водоемы	0,0059	0,0036	0,0000
Коэффициент утилизации отходов 1—5-го классов опасности	1,02	0,997	0,762
Коэффициент аварийности и инцидентов с экологическими последствиями	0,000041512	0,000002454	0,000002081
Коэффициент сверхнормативной нагрузки на окружающую среду	0,190045780	0,054561114	0,530045561
Коэффициент заботы о биоразнообразии в регионах присутствия компании	0,000047841	0,000257015	0,000109005
Коэффициент заботы об окружающей среде	0,006315000	0,004780000	0,005318182
Коэффициент инвестиций в охрану окружающей среды	0,000125000	0,006710000	0,003470000
Эффективность стратегии/политики в области охраны окружающей среды	4,2	7,6	7,8
Эффективность системы экологического риск-менеджмента	5,3	6,6	7,1
Наличие информации в открытых источниках об экологических показателях	7,2	7,6	8,1

Таблица 6

## Метрики экологической конкурентоспособности ПАО "Мосэнерго"

Наименование метрики	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Коэффициент удельных прямых выбросов в атмосферу парниковых газов CO <sub>2</sub>	2,1094	2,1312	2,0939
Коэффициент удельных выбросов в атмосферу загрязняющих веществ	0,0022	0,0019	0,0019
Коэффициент удельного водопотребления на производственные нужды	20,2892	21,6513	23,2979
Коэффициент удельного водоотведения загрязненных и недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водоемы	0,1095	0,1382	0,1358
Коэффициент утилизации отходов 1—5-го классов опасности	0,61	1,70	0,63
Коэффициент аварийности и инцидентов с экологическими последствиями	0,0000001261	0,0000001065	0,0000001011
Коэффициент сверхнормативной нагрузки на окружающую среду	0,0007450029	0,0006180073	0,0005190005
Коэффициент заботы о биоразнообразии в регионах присутствия компании	0,0002470479	0,0000415617	0,0002478413
Коэффициент заботы об окружающей среде	0,0005902375	0,0006974423	0,0005891842
Коэффициент инвестиций в охрану окружающей среды	0,0004557165	0,0012761273	0,0036076359
Эффективность стратегии/политики в области охраны окружающей среды	9,4	9,7	9,8
Эффективность системы экологического риск-менеджмента	9,1	9,1	9,2
Наличие информации в открытых источниках об экологических показателях	9,8	9,9	9,9

Оценка эффективности стратегии/политики в области охраны окружающей среды, эффективности системы экологического риск-менеджмента, наличия информации в открытых источниках об экологических показателях осуществлялась экспертным путем по 10-балльной шкале с привлечением 26 экспертов энергетической отрасли России. Показательно, что

среднее значение коэффициента конкордации составило 0,91, что свидетельствует о высокой согласованности мнений экспертов относительно значений исследуемых показателей.

Этап 4. В табл. 7—11 отражены стандартизированные значения метрик экологической конкурентоспособности, полученные с использованием формулы (1).

Таблица 7

## Стандартизированные метрики экологической конкурентоспособности ПАО "Интер РАО"

Наименование метрики	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Коэффициент удельных прямых выбросов в атмосферу парниковых газов CO <sub>2</sub>	0,30910	0,29049	0,25553
Коэффициент удельных выбросов в атмосферу загрязняющих веществ	0,10574	0,09081	0,08135
Коэффициент удельного водопотребления на производственные нужды	0,01743	0,00961	0,01921
Коэффициент удельного водоотведения загрязненных и недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водоемы	0,93239	0,49498	0,00061
Коэффициент утилизации отходов 1—5-го классов опасности	0,00000	0,08838	0,66361
Коэффициент аварийности и инцидентов с экологическими последствиями	0,23926	0,09159	0,12578
Коэффициент сверхнормативной нагрузки на окружающую среду	0,41625	0,32826	0,01039
Коэффициент заботы о биоразнообразии в регионах присутствия компании	0,00000	0,00000	0,00000
Коэффициент заботы об окружающей среде	0,00283	0,00088	0,00022
Коэффициент инвестиций в охрану окружающей среды	0,15113	0,12425	0,47953
Эффективность стратегии/политики в области охраны окружающей среды	0,96154	0,22581	0,80000
Эффективность системы экологического риск-менеджмента	0,23684	0,03571	0,52500
Наличие информации в открытых источниках об экологических показателях	0,46154	0,43478	0,38889

Таблица 8

## Стандартизированные метрики экологической конкурентоспособности ПАО "ОГК-2"

Наименование метрики	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Коэффициент удельных прямых выбросов в атмосферу парниковых газов CO <sub>2</sub>	0,09993	0,07922	0,00000
Коэффициент удельных выбросов в атмосферу загрязняющих веществ	0,03624	0,03595	0,00000
Коэффициент удельного водопотребления на производственные нужды	0,03605	0,03843	0,05252
Коэффициент удельного водоотведения загрязненных и недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водоемы	0,01142	0,00841	0,00000
Коэффициент утилизации отходов 1—5-го классов опасности	0,38182	0,00000	1,00000
Коэффициент аварийности и инцидентов с экологическими последствиями	0,12071	0,05097	0,03860
Коэффициент сверхнормативной нагрузки на окружающую среду	0,22355	0,15038	0,12910
Коэффициент заботы о биоразнообразии в регионах присутствия компании	1,00000	0,06191	0,10472
Коэффициент заботы об окружающей среде	0,00991	0,00413	0,00228
Коэффициент инвестиций в охрану окружающей среды	1,00000	0,00000	0,00000
Эффективность стратегии/политики в области охраны окружающей среды	0,51923	0,00000	0,00000
Эффективность системы экологического риск-менеджмента	0,39474	0,00000	0,00000
Наличие информации в открытых источниках об экологических показателях	0,03846	0,21739	0,05556

Таблица 9

## Стандартизированные метрики экологической конкурентоспособности ПАО "Юнипро"

Наименование метрики	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Коэффициент удельных прямых выбросов в атмосферу парниковых газов CO <sub>2</sub>	0,19289	0,14722	0,13834
Коэффициент удельных выбросов в атмосферу загрязняющих веществ	0,21029	0,19104	0,18051
Коэффициент удельного водопотребления на производственные нужды	0,00000	0,00000	0,00000
Коэффициент удельного водоотведения загрязненных и недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водоемы	0,34261	0,17280	0,00004
Коэффициент утилизации отходов 1—5-го классов опасности	0,51091	0,09343	0,63609
Коэффициент аварийности и инцидентов с экологическими последствиями	0,01307	0,00000	0,00000
Коэффициент сверхнормативной нагрузки на окружающую среду	0,50143	0,12502	0,07564
Коэффициент заботы о биоразнообразии в регионах присутствия компании	0,03793	1,00000	1,00000
Коэффициент заботы об окружающей среде	1,00000	1,00000	1,00000
Коэффициент инвестиций в охрану окружающей среды	0,09129	0,70862	1,00000
Эффективность стратегии/политики в области охраны окружающей среды	0,76923	0,38710	0,45714
Эффективность системы экологического риск-менеджмента	0,73684	0,39286	0,72500
Наличие информации в открытых источниках об экологических показателях	0,61538	0,65217	0,72222

Таблица 10

## Стандартизированные метрики экологической конкурентоспособности ПАО "Энел Россия"

Наименование метрики	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Коэффициент удельных прямых выбросов в атмосферу парниковых газов CO <sub>2</sub>	0,0000	0,00000	0,22213
Коэффициент удельных выбросов в атмосферу загрязняющих веществ	0,0000	0,00000	0,24691
Коэффициент удельного водопотребления на производственные нужды	0,0585	0,05634	0,03216
Коэффициент удельного водоотведения загрязненных и недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водоемы	1,0000	1,00000	1,00000
Коэффициент утилизации отходов 1—5-го классов опасности	1,0000	0,10985	0,39450
Коэффициент аварийности и инцидентов с экологическими последствиями	0,0000	0,03156	0,03663
Коэффициент сверхнормативной нагрузки на окружающую среду	0,0000	0,00000	0,00000
Коэффициент заботы о биоразнообразии в регионах присутствия компании	0,0044	0,14277	0,04670
Коэффициент заботы об окружающей среде	0,0210	0,00532	0,00317
Коэффициент инвестиций в охрану окружающей среды	0,0000	1,00000	0,91303
Эффективность стратегии/политики в области охраны окружающей среды	0,0000	0,32258	0,42857
Эффективность системы экологического риск-менеджмента	0,0000	0,10714	0,47500
Наличие информации в открытых источниках об экологических показателях	0,0000	0,00000	0,00000

Таблица 11

## Стандартизированные метрики экологической конкурентоспособности ПАО "Мосэнерго"

Наименование метрики	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Коэффициент удельных прямых выбросов в атмосферу парниковых газов CO <sub>2</sub>	1,00000	1,00000	1,00000
Коэффициент удельных выбросов в атмосферу загрязняющих веществ	1,00000	1,00000	1,00000
Коэффициент удельного водопотребления на производственные нужды	1,00000	1,00000	1,00000
Коэффициент удельного водоотведения загрязненных и недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водоемы	0,00000	0,00000	0,00000
Коэффициент утилизации отходов 1—5-го классов опасности	0,25818	1,00000	0,00000
Коэффициент аварийности и инцидентов с экологическими последствиями	1,00000	1,00000	1,00000
Коэффициент сверхнормативной нагрузки на окружающую среду	1,00000	1,00000	1,00000
Коэффициент заботы о биоразнообразии в регионах присутствия компании	0,03341	0,01243	0,12298
Коэффициент заботы об окружающей среде	0,00000	0,00000	0,00000
Коэффициент инвестиций в охрану окружающей среды	0,04901	0,17502	0,95164
Эффективность стратегии/политики в области охраны окружающей среды	1,00000	1,00000	1,00000
Эффективность системы экологического риск-менеджмента	1,00000	1,00000	1,00000
Наличие информации в открытых источниках об экологических показателях	1,00000	1,00000	1,00000

**Этап 5.** На этапе расстановки весовых коэффициентов были привлечены 26 экспертов энергетической отрасли, в том числе 16 экологов-практиков. В табл. 12 отражены полученные значения весовых коэффициентов по каждой метрике экологической конкурентоспособности.

Из табл. 12 следует, что наиболее значимыми метриками экологической конкурентоспособности ТЭГК являются коэффициенты аварийности и инцидентов с экологическими последствиями, удельных прямых выбросов в атмосферу парниковых газов CO<sub>2</sub>, удельных выбросов в атмосферу загрязняющих веществ, удельного водоотведения загрязненных и недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водоемы. При этом коэффициент конкордации составил 0,93, что свидетельствует о высокой согласованности мнений экспертов относительно значимости анализируемых показателей.

**Этап 6.** Интегральный критерий экологической конкурентоспособности каждого предприятия  $K_i$  определен по формуле (2) и представлен на рис. 2.

**Этап 7.** Из рис. 2 следует, что в рейтинге экологической конкурентоспособности 1-е место занимает ПАО "Мосэнерго", 2-е — ПАО "Энел Россия", 3-е — ПАО "Юнипро", 4-е — ПАО "Интер РАО", 5-е — ПАО "ОГК-2". Места распределены по состоянию  $K_i$  на 2020 г. Положительная динамика интегрального критерия экологической конкурентоспособности отмечается у ПАО "Энел Россия", отрицательная — у ПАО "Интер РАО" и ПАО "ОГК-2", нейтральная — у ПАО

"Мосэнерго" и ПАО "Юнипро". Показательно, что по состоянию на 2020 г. разрыв между 1-м и 5-м местами превышает 17 раз, т. е. в целом ПАО "ОГК-2" отстает по экологическим метрикам от ПАО "Мосэнерго" в 17,8 раз (0,71/0,04). Аналогичные сравнения, используя данные рис. 2, можно осуществить между остальными ТЭГК.

**Этап 8.** Результаты проведенной оценки экологической конкурентоспособности ТЭГК России могут быть доведены до неограниченного круга лиц, могут быть использованы аналитиками, экспертами, инвесторами, акционерами ТЭГК, другими заинтересованными лицами на этапе принятия решений об инвестировании средств в акции конкретных ТЭГК, а также топ-менеджментом ТЭГК при принятии управленческих решений по улучшению рейтинга экологической конкурентоспособности. По мнению автора, главными направлениями повышения экологической конкурентоспособности всех ТЭГК являются:

- декарбонизация топливного баланса, т. е. переход от сжигания угля и мазута на сжигание газа;
- развитие систем экологического риск-менеджмента, предотвращающих аварии и инциденты с экологическими последствиями;
- повышение эффективности проводимой экологической политики;
- развитие альтернативной энергогенерации, прежде всего ветряной;
- увеличение инвестиций в охрану окружающей среды.

Таблица 12

Значения весовых коэффициентов по экологическим метрикам

Наименование метрики	Вес метрики
Коэффициент удельных прямых выбросов в атмосферу парниковых газов CO <sub>2</sub>	0,19
Коэффициент удельных выбросов в атмосферу загрязняющих веществ	0,16
Коэффициент удельного водопотребления на производственные нужды	0,04
Коэффициент удельного водоотведения загрязненных и недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водоемы	0,16
Коэффициент утилизации отходов 1—5-го классов опасности	0,03
Коэффициент аварийности и инцидентов с экологическими последствиями	0,21
Коэффициент сверхнормативной нагрузки на окружающую среду	0,02
Коэффициент заботы о биоразнообразии в регионах присутствия компании	0,03
Коэффициент заботы об окружающей среде	0,03
Коэффициент инвестиций в охрану окружающей среды	0,04
Эффективность стратегии/политики в области охраны окружающей среды	0,05
Эффективность системы экологического риск-менеджмента	0,03
Наличие информации в открытых источниках об экологических показателях	0,01

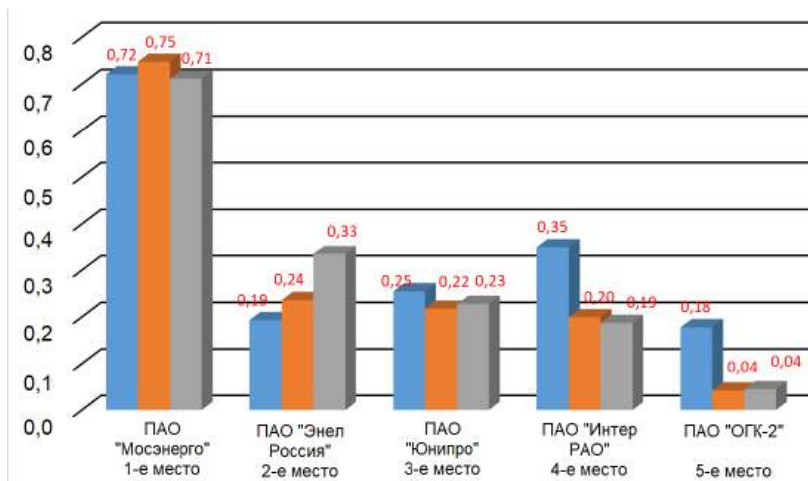


Рис. 2. Динамика интегрального критерия экологической конкурентоспособности ТЭГК:  
■ — 2018; ■ — 2019; ■ — 2020

Преимущества предложенного метода оценки экологической конкурентоспособности ТЭГК обусловлены тем, что он позволяет проводить такую оценку комплексно, используя 13 экологических метрик. Метод позволяет ранжировать изучаемые компании по степени их экологической конкурентоспособности на базе интегрального критерия, что дает возможность избежать проблемы оценки в условиях множественности, разномаштабности и разнонаправленности значений единичных метрик. Метод отличается гибкостью, т. е. возможностью учета при оценке различных весов метрик экологической конкурентоспособности. При наличии достоверной информации субъективность в использовании такого метода мала. В разработанном методе наряду с известными показателями применяются следующие новые метрики, предложенные автором: коэффициент аварийности и инцидентности с экологическими последствиями, коэффициент заботы о биологическом разнообразии в регионах присутствия компании, коэффициент заботы об окружающей среде, коэффициент инвестиций в охрану окружающей среды, эффективность стратегии/политики в области охраны окружающей среды, эффективность системы экологического риск-менеджмента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горкина И. Д., Филичева Т. П. Экономика природопользования: учебник. — Владивосток: ВГУЭС, 2020. — 194 с.
2. Самылина В. Г., Морозова О. Г. Экономика природопользования: учеб. пособие. — Вологда: ВоГУ, 2017. — 171 с.
3. Давыдова И. Ю. Экономика природопользования: учеб.-методич. пособие. — Рязань: РГУ имени С. А. Есенина, 2016. — 80 с.
4. Серова О. В., Кулагин А. А. Экономика природопользования: учеб. пособие. — Уфа: БГПУ имени М. Акмуллы, 2014. — 141 с.
5. Салихов В. А. Экономика природопользования: учеб. пособие. Изд. 2, перераб. и доп. — Новокузнецк: НФИ КемГУ, 2014. — 167 с.
6. Белик И. С., Рачек С. В., Стародубец Н. В. Экономика природопользования и управление эколого-экономической безопасностью: учеб. пособие. — Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2018. — 136 с.
7. Прокофьев С. Е., Кадырова Г. М., Панина О. В., Радченко А. Ф. Управление государственной и муниципальной собственностью: право, экономика, недвижимость и природопользование. — М.: Юстицинформ, 2014. — 336 с.
8. Денисов В. В., Денисова И. А., Дровозовова Т. И., Москаленко А. П. Основы природопользования и энергоресурсосбережения: учебное пособие / . — СПб: Лань, 2021. — 400 с.
9. Пахомова Н. В., Рихтер К. К., Малышков Г. Б., Хорошавин А. В. Экономика природопользования и экологический менеджмент: учебник для вузов. — М: Изд-во Юрайт, 2020. — 417 с.
10. Дьяченко Г. И., Леган М. В. Экономика природопользования и техносферной безопасности. — Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного технического ун-та, 2018. — 68 с.
11. Беляева Н. Б. Экономика природопользования: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2016. — 56 с.
12. Васюкова А. Т., Славянский А. А., Ярошева А. И. Экология: учебник. Изд. 2, стер. — СПб: Лань, 2021. — 180 с.
13. Грушко М. П., Мелякина Э. И., Волкова И. В., Зайцев В. Ф. Прикладная экология: учеб. пособие для вузов. Изд. 2, стер. — СПб: Лань, 2021. — 268 с.
14. Рыбак Л. В. Экология и экономика природопользования: учеб. пособие. — М.: Изд-во Юрайт, 2012. — 365 с.
15. Ларионов В. Г., Бадалова А. Г., Фалько С. Г., Ларионов Г. В., Москвитин К. П. Экология. Менеджмент. Человек. — М.: Лань, 2020. — 302 с.
16. Колесников С. И. Прикладная экология: учебник. — М.: 2021 Изд-во КноРус, 2021. — 278 с.

## Assessment of the environmental competitiveness of fuel power generating companies in Russia

D. E. IVAKHNIK

MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

*The article introduces a concept of "environmental competitiveness of fuel power generating companies (FPGC)" into scientific discourse. A method for assessing the FPGC ecological competitiveness has been developed, where, along with the known indicators, it is proposed to use the following metrics: the rate of accidents and incidents with environmental consequences, the coefficient of biodiversity care in the regions of a company's presence, the coefficient of environmental care, the coefficient of investment in environment protection, efficiency of environment protection strategies/policies, the effectiveness of the environmental risk management system. The developed method was tested on the example of the activities of FPGCs in Russia, as a result of which a rating of the environmental competitiveness of these companies was obtained. It is shown that as of 2020, the gap between the first and the last places in the rating is by 17.8 times.*

**Keywords:** environmental competitiveness, Russian fuel power generating companies.

**Bibliography** — 16 references.

*Received November 9, 2021*



Экология промышленного производства: Межотр. науч.-практ. журнал / ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2022. Вып. 1. С. 1—68.

Редактор *О. А. Константинова*

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

Подписано в печать 24.02.2022.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 7,9. Уч.-изд. л. 8,2.

Тираж 250 экз. Заказ 1989.

Свободная цена.

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

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».

<http://ntckompas.ru>

Отпечатано: 101000, Москва,

Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, офис 105.

ИП Кириченко Алексей Викторович.

Индекс 80090.

**БЛАНК-ЗАКАЗ НА ПОДПИСКУ 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».