

# ЭКОЛОГИЯ

промышленного  
производства



МЕЖОТРАСЛЕВОЙ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

Выпуск 3  
Москва 2021



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

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



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



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



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



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



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

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

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

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

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



# ЭКОЛОГИЯ

## промышленного

## производства

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

Выпуск 3 (115)

Издается с 1993 г.

Москва 2021

### СОДЕРЖАНИЕ

#### ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ, УТИЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕРАБОТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Артемов А. В., Переславцев А. В., Вошинин С. А., Тресвятский С. С., Коробцев С. В. "Зеленые" технологии в плазменной переработке отходов..... 2

Пузач В. Г., Шустров Н. Н., Шитиков Е. С., Шацкая В. А., Гордеева Е. В. О возможности повышения эффективности промышленных производств строительных материалов. Влияние малых концентраций пластифицирующих веществ и ультрадисперсных добавок на прочность цементобетонов..... 8

Батракова Г. М., Шаманов В. А., Панькова Е. И., Щенина А. Э., Мартынова А. А. Утилизация техногенных отходов в качестве добавок для модификации малопластичного глинистого сырья..... 14

Балановская А. В., Абдрахимова Е. С. Вопросы экологического, экономического и практического рециклинга по использованию топливно-энергетического комплекса для получения теплоизоляционных материалов ..... 19

#### ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДООЧИСТКА

Масленникова Е. В., Ермаков В. В. Рациональное количество биохимических стимуляторов для процесса очистки высококонцентрированных буровых сточных вод ..... 27

#### ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Шемякин А. С., Шестаков А. В., Яковлев С. Ю. Автоматизация расчёта и отображения рисков для объектов котлонадзора..... 31

#### ОЧИСТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ

Овчинников Е. В., Уютов С. Ю., Крючков В. А. Система снижения оксидов азота в отработавших газах ..... 36

#### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Федоткин Р. С., Овчинников Е. В., Крючков В. А., Дмитриев К. С. Обзор современных систем подачи топливной смеси на основе водород в автотракторные двигатели (Обзор)..... 39

Главный редактор А. Г. Ишков,  
д-р хим. наук, проф., акад. РАЕН,  
заместитель начальника Департамента —  
начальник Управления ПАО «Газпром»

Заместители главного редактора:  
В. Ф. Гракович, д-р техн. наук, проф., акад. РАЕН,  
председатель правления Национального Фонда содействия устойчивому развитию регионов; Н. П. Кузнецов,  
д-р техн. наук, проф., Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова

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

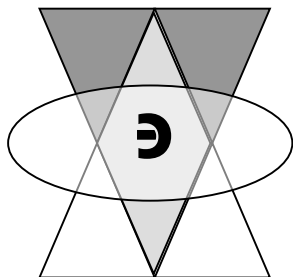
#### Редакционный совет:

А. М. Амирханов, канд. биол. наук, зам. руководителя Федеральной службы по надзору в сфере природопользования; Э. В. Гирсов, д-р филос. наук, проф., акад. Российской экологической академии, Московская государственная академия делового администрирования; Н. П. Тарасова, чл.-кор. РАН, д-р хим. наук, проф., директор Института проблем устойчивого развития

#### Редакционная коллегия:

С. С. Бабкина, д-р хим. наук, проф., Институт тонких химических технологий Московского технологического университета; Я. И. Вайсман, д-р мед. наук, проф., Пермский национальный исследовательский политехнический университет; М. Н. Дадашев, д-р техн. наук, проф., РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина; В. Г. Исаков, д-р техн. наук, проф., акад. Академии военных наук РФ, Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова; М. А. Корепанов, д-р техн. наук, Институт прикладной механики Уральского отделения РАН; Б. С. Ксенофонтов, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н. Э. Баумана; В. Ю. Мелешко, д-р техн. наук, проф., Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН; В. В. Минасян, канд. техн. наук, генеральный директор ООО «Фрэком»; Е. А. Найман, канд. техн. наук, Краковский технический университет им. Тадеуша Костюшко (Польша); А. Ю. Недре, канд. техн. наук, зам. директора ФГАУ "НИИ "Центр экологической промышленной политики"; Е. И. Пупырев, д-р техн. наук, проф., генеральный директор ОАО «МосводоканалНИИпроект»; И. Ш. Сайфуллин, д-р хим. наук, проф., зам. директора Научно-исследовательского института инновационного развития промышленности Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова; В. А. Тенев, д-р физ.-мат. наук, проф., Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова; Ю. В. Трофименко, д-р техн. наук, проф., директор Научно-исследовательского института энергоэкологических проблем автотранспортного комплекса при МАДИ

© Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» (ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»), 2021



# Обезвреживание, утилизация и переработка промышленных отходов

УДК 504.064.47:628.475.3-7:533.9.15  
DOI: 10.52190/2073-2589\_2021\_3\_2

## "Зеленые" технологии в плазменной переработке отходов

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

Приведены данные о переработке смесей различных отходов: коммунальных отходов, тяжелых нефтяных остатков, отходов полимерных материалов, автомобильных покрышек, сточных вод, иловых накоплений, медицинских отходов и биомассы микроводорослей *CHLORELLA VULGARIS* (алга-биомассы), с использованием комплекса высокотемпературного плазменного конвертера (ВТПК), сопряженного с блоком алга-технологий (БАТ). Приведены принципиальные технологические схемы ВТПК и БАТ, предусматривающие получение базальтоподобного шлака, электрической и тепловой энергии, биомоторного топлива, алга-биомассы и глицерина. По специально разработанной программе проведен расчет основных технико-экономических показателей работы ВТПК, сопряженного с БАТ (ВТПК + БАТ).

**Ключевые слова:** плазменная переработка отходов, алга-технология, твердые бытовые отходы, тяжелые нефтяные остатки, отходы полимерных материалов, медицинские отходы, базальтоподобный шлак, плазмотрон, газотурбинная установка.

В публикациях авторов, посвященных технико-экономической оценке переработки в высокотемпературном плазменном конвертере (ВТПК) различных типов отходов: стеклосодержащих [1], иловых [2, 3], медицинских [4] коммунальных и их смесей [5] и т. д., проведен анализ наиболее простого варианта работы комплекса ВТПК, предусматривающего получение

в качестве товарной продукции только электроэнер-

Артемов Арсений Валерьевич, профессор, ведущий научный сотрудник.

E-mail: arsenyart@mail.ru

Переславцев Александр Васильевич, начальник лаборатории.

E-mail: pereslavitsev\_av@nrcki.ru

Вошинин 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 18 марта 2021 г.

© Артемов А. В., Переславцев А. В., Вошинин С. А., Тресвятский С. С., Коробцев С. В., 2021

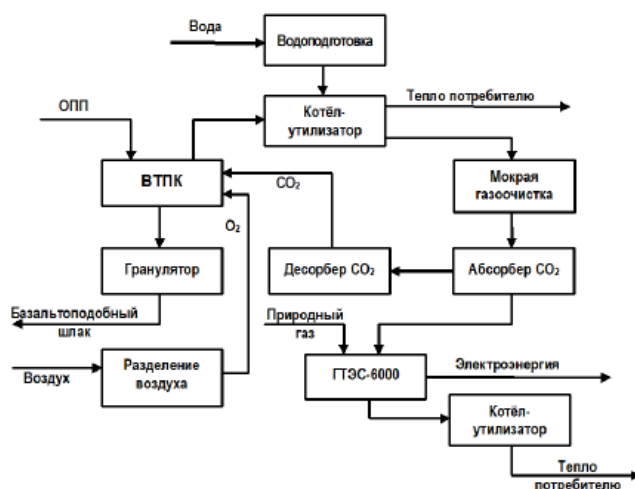


Рис. 1. Вариант работы комплекса ВТПК, предусматривающий получение в качестве товарной продукции тепловой и электрической энергии и базальтоподобного шлака

Анализ был возможен в результате разработки алгоритма и программы расчета комплекса ВТПК, учитывающего влияние на процесс большинства технологических и экономических параметров. Существенным недостатком работы комплекса ВТПК является выброс в атмосферу значительного количества диоксида углерода (рис. 2). Доля ( $\omega$ )  $\text{CO}_2$ , выделяемого абсорбцией из газовых потоков и рециркулируемого в технологический процесс в качестве плазмообразующего газа, составляет лишь 4—8 % (табл. 1). Как видно из этой таблицы, величина  $\omega$  зависит в основном от производительности комплекса ВТПК и

практически не зависит от состава перерабатываемых отходов.

### Результаты и их обсуждение

Для уменьшения количества выбрасываемого в атмосферу  $\text{CO}_2$  было предложено объединить комплекс ВТПК с блоком алга-технологий, который позволяет производить микроводоросли *CHLORELLA VULGARIS* с последующей переработкой их в моторное топливо. Принципиальная схема БАТ приведена на рис. 3.

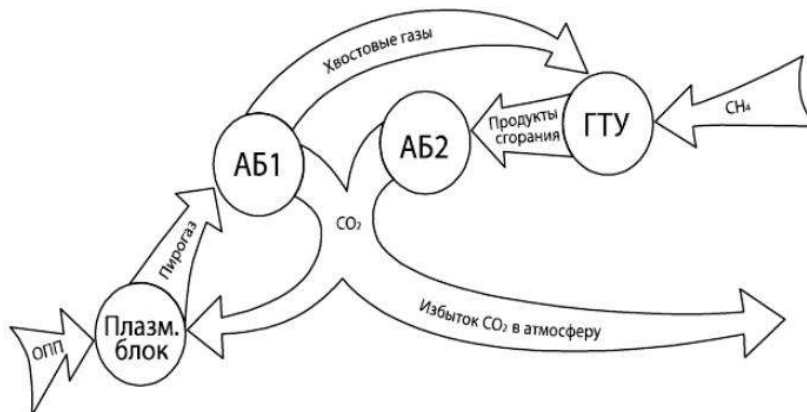


Рис. 2. Принципиальная схема газовых потоков при варианте работы комплекса ВТПК с получением в качестве товарной продукции тепловой и электрической энергии и базальтоподобного шлака: ОПП — отходы производства и потребления; АБ1 — первый абсорбционный блок; АБ2 — второй абсорбционный блок; ГТУ — газотурбинная установка (ГТЭС-6000)

Таблица 1

Количество  $\text{CO}_2$ , образующегося в процессе плазменной переработки отходов в комплексе ВТПК по варианту, приведенному на рис. 1\*

№	Производительность комплекса ВТПК, тыс. т/г.	Состав отходов: вид, %	Количество образующегося $\text{CO}_2$ , кг/ч		Количество плазмообраз. газа $\text{CO}_2$ , кг/ч	$\omega$ , масс. доля
			из ВТПК	из ГТУ		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	12,5	МО, 100	142	9423	767	0,080
2	12,5	ТКО, 100	310	9292	787	0,082
3	12,5	ТКО, 50 + МО, 50	226	9357	777	0,081
4	25,0	ОПМ, 100	1859	37374	1859	0,047
5	25,0	ОПМ, 50 + ТКО, 50	353	37135	1714	0,046
6	25,0	ТКО, 100	619	36896	1573	0,042
7	25,0	МО, 100	284	37156	1533	0,041
8	25,0	МО, 50 + ТКО, 50	185	37266	1694	0,045

Примечание. Данные приведены для оптимального дутья [5] кислорода в зону пиролиза ВТПК;  $\omega = (6)/[(4)+(5)]$  — доля рециркулируемого в процесс  $\text{CO}_2$  как плазмообразующего газа по отношению к сумме  $\text{CO}_2$ , образующегося в ВТПК и ГТУ (газотурбинная установка ГТЭС-6000); МО — медицинские отходы; ТКО — твердые коммунальные отходы; ОПМ — отходы полимерных материалов.

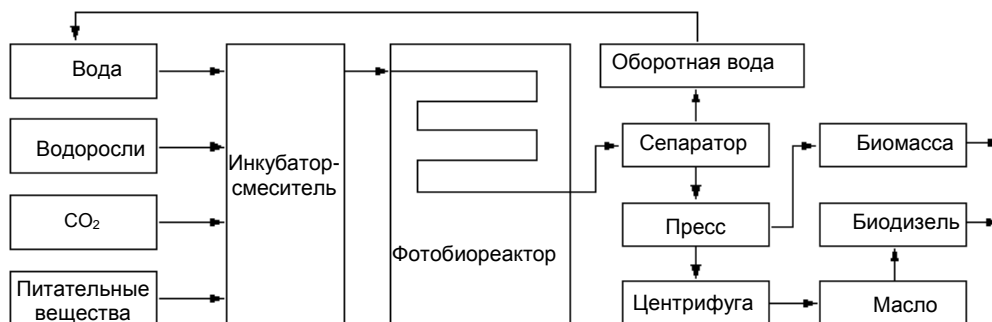


Рис. 3. Принципиальная схема блока алга-технологии



Авторами приведены результаты сравнительного технико-экономического анализа работы комплекса ВТПК (вариант Е0) и комплекса ВТПК, сопряженного с БАТ (вариант ЕА). Расчет параметров комплекса ВТПК проводили в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1, для сырья сложного морфологического состава (табл. 3). Расчет каждого варианта выполняли для технологических параметров (прежде всего количества кислорода, подаваемого в зону пиролиза ВТПК), обеспечивающих оптимальную мощность плазмотрона 540 кВт для производственной мощности комплекса по отходам 25 тыс. т/г.

Выбор в качестве сырья для функционирования комплекса смеси отходов сложного морфологического состава (табл. 3) можно произвести с помощью разработанной программы расчета технико-экономических показателей при проектировании комплекса для данного региона с учетом преимущественного состава отходов, образующихся в данном регионе.

Основное технологическое оборудование, входившее в состав комплекса ВТПК:

- газотурбинные модули ГТЭС "Урал-6000" (ГТЭС-6000) суммарной установленной мощности 24560 кВт — 4 шт;
- единичные модули производительностью 12,5 тыс. т/г. по отходам (ВТПК-12,5) — 2 шт;
- плазмотроны номинальной электрической мощности 600 кВт (ЭДП-600) — 8 шт.

Площадь БАТ, равная 4 га (40 000 м<sup>2</sup>), выбрана из практических соображений как вполне достаточная для получения прибыли от эксплуатации комплекса и имеет большой запас для ее увеличения.

Расчет ЕА предусматривает два варианта:

- ЕА-1, в котором вся биомасса (100 %) реализуется внешним потребителем и используется в основном в производстве сельскохозяйственной продукции. Биодизельное топливо в этом варианте может либо полностью использоваться в качестве энергоносителя в ГТУ, либо реализовываться внешним потребителем;
- ЕА-2, в котором и биомасса, и биодизельное топливо можно либо полностью, либо частично использовать для реализации внешним потребителем. Если часть биомассы реализуется внешним потребителем, то оставшаяся часть перерабатывается в комплексе в виде добавки к отходам.

Результаты расчетов технико-экономических показателей работы комплекса по вариантам Е0 и ЕА-1 имеют одни и те же значения (если это не оговорено):

- поток плазмообразующего газа (CO<sub>2</sub>) 1704 кг/ч;
- поток CO<sub>2</sub> от ВТПК 460 кг/ч;
- поток CO<sub>2</sub> от ГТУ 37005 кг/ч;
- степень использования CO<sub>2</sub> в комплексе:
  - для варианта Е0  $\omega = 1704 / (460 + 37005) = 0,05$ ;
  - выделение кислорода в атмосферу при наличии БАТ 4545 кг/ч (или 142 кмоль/ч). Это количество выделенного кислорода соответствует поглощению CO<sub>2</sub> в БАТ, равному 6248 кг/ч. В результате для варианта ЕА-1  $\omega = (1704 + 6248) / (460 + 37005) = 0,21$  и выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу по сравнению с вариантом Е0 сокращаются более чем в 4 раза за счет превращения CO<sub>2</sub> в БАТ в биомассу;
- для работы плазмотрона в оптимальном режиме (~ 540 кВт) дополнительное дутье кислорода в зону пиролиза ВТПК 645 кг O<sub>2</sub> в час (или 192 кг O<sub>2</sub> на 1 т отходов);
- количество производимого синтез-газа 2015 кг/ч (15001 т/г);
- при наличии БАТ (вариант ЕА-1) дополнительно к синтез-газу комплекс производит биодизель в количестве 1968 кг/ч (17238 т/г.);
- количество базальтоподобного шлака для реализации 2410 т/г.;
- количество электроэнергии для реализации (после обеспечения собственных затрат) для варианта Е0 125,388 млн кВт·ч/г. Для варианта ЕА-1 количество электроэнергии для реализации внешним организациям уменьшается до 115,857 млн кВт·ч/г. Разница электроэнергии в количестве 9,531 млн кВт·ч/г. используется для обеспечения нужд БАТ;
- количество тепловой энергии для реализации внешним организациям для обоих вариантов 368,175 тыс. Гкал/г.;
- дополнительно по варианту ЕА-1 производятся для реализации биомасса в количестве 15035 т/г. и глицерин в количестве 1313 т/г.;
- поток пирогаза для обоих вариантов 4717,5 кг/ч. Основными компонентами пирогаза являются (кг/ч): CO (1664,5); H<sub>2</sub> (104,6); CH<sub>4</sub> (153,4); H<sub>2</sub>O (1268,2); CO<sub>2</sub> (1516,2).

Таблица 3

Состав перерабатываемых отходов

Компонент	Содержание, масс. %	Состав компонента отходов, масс. %								
		C	H	O	N	S	Me	H <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Зола
Сухие бытовые отходы	35,00	34,84	3,38	28,45	0,15	0,14	0,012	14,87	15,45	2,70
Пищевые отходы	35,00	6,73	0,96	4,83	0,42	0,02	0,000	85,13	0,00	1,91
Тяжелые нефтяные остатки	5,00	59,10	7,89	0,70	0,21	2,49	0,000	19,74	0,00	9,86
Алга-биомасса	0,00	35,50	8,00	2,00	4,44	0,00	0,020	50,00	0,00	0,05
Отходы полимерных материалов	5,00	51,10	7,89	27,7	0,21	0,49	0,000	8,74	0,00	3,86
Автомобильные покрышки	7,00	74,60	12,40	0,00	0,00	1,00	0,000	0,00	0,00	12,00
Сточные воды	6,00	18,00	3,00	24,00	0,10	0,00	0,000	49,90	0,00	5,00
Илы сточных вод	2,00	46,08	7,78	17,03	4,00	0,09	0,241	20,20	0,00	4,56
Медицинские отходы	5,00	29,43	4,20	29,43	0,13	0,20	0,044	16,18	20,22	0,17
СУММА	100,00	28,76	3,72	16,32	0,31	0,29	0,01	40,63	6,42	3,54

Наибольший интерес представляет сравнение вариантов Е0 и ЕА-1 по экономическим показателям (табл. 4). Как видно из этой таблицы, сопряжение комплекса ВТПК с БАТ позволяет более чем на порядок увеличить чистую прибыль предприятия и значительно (в 3—4 раза) сократить срок окупаемости. При этом капитальные затраты увеличиваются лишь на ~50 %. Значительно улучшаются и другие экономические показатели: EBITDA и рентабельность.

Улучшение экономических показателей комплекса при работе по варианту ЕА-1 достигается в основном за счет:

- реализации дополнительной (кроме электрической и тепловой энергии и базальтоподобного шлака) продукции (биомасса, биодизель, глицерин) на внешнем рынке;

- дополнительной замены части природного газа биодизелем.

Однако при очевидных экономических преимуществах при реализации варианта ЕА-1 (100%-я продажа биомассы внешним организациям) на площади БАТ 4 га степень использования вырабатываемого CO<sub>2</sub>  $\omega$  составляет лишь 0,21 (табл. 4). Увеличение этого показателя возможно при увеличении площади БАТ. Так, увеличение площади БАТ до 20 га (табл. 4, вариант ЕА-1(6)) увеличивает показатель  $\omega$  до 0,88, но при этом происходит перепроизводство биодизеля (его вырабатывается больше, чем необходимо для функционирования ГТУ) и часть его необходимо направлять на продажу.

При снижении площади БАТ до 15 га возможна практически полная замена природного газа синтез-газом и биодизелем (суммарно на 98 %), однако при этом величина  $\omega$  снижается до 0,67. Одновременное достижение значений  $\omega \sim 1$  и полной замены природ-

ного газа биодизелем и синтез-газом можно получить при одновременных увеличении площади БАТ и продаже на внешнем рынке вырабатываемого биодизеля.

При увеличении площади БАТ до 15—20 га значительно (примерно в 2 раза) увеличиваются капитальные затраты и снижаются другие экономические показатели: увеличивается срок окупаемости и снижается чистая прибыль (табл. 4).

Расчеты варианта ЕА-2 проводили для площади БАТ, равной 4 га. Результаты расчета варианта ЕА-2 при различном количестве биомассы, реализуемой внешним потребителем, приведены в табл. 4. Как видно из результатов этого расчета, вариант ЕА-2 не является желательным, т. к. приводит к ухудшению большинства технологических и экономических показателей в основном за счет:

- сокращения объема перерабатываемых отходов из-за замены отходов частью биомассы;

- снижения прибыли за счет снижения продажи части биомассы на внешнем рынке;

- существенного изменения состава пирогаза и его количества.

Таким образом, переработка отходов в комплексе ВТПК + БАТ дает возможность вырабатывать полезную и реализуемую продукцию в виде тепловой и электрической энергии и сырья для производства неорганических волокон (базальтоподобный шлак) при отсутствии токсичных выбросов, а применение "зеленой" алга-технологии позволяет значительно снизить выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу и дополнительно получать моторное топливо с использованием возобновляемого сырья (микроводорослей) и 100%-м использованием получаемого по этой технологии побочного продукта (биомасса, глицерин).

Таблица 4

Сравнение результатов работы комплекса ВТПК + БАТ по вариантам Е0, ЕА-1 и ЕА-2 при различной реализации внешним организациям биодизельного топлива и алга-биомассы. Производительность комплекса по отходам 25 тыс. т/г.

Показатель	Вариант расчета											
	Е0	ЕА-1(1)	ЕА-1(2)	ЕА-1(3)	ЕА-1(4)	ЕА-1(5)	ЕА-1(6)	ЕА-1(7)	ЕА-2(1)	ЕА-2(2)	ЕА-2(3)	ЕА-2(4)
Площадь БАТ, га	—	4	4	4	4	4	20	15	4	4	4	4
Биодизельное топливо на внешний рынок, % / (т/г.)	—	$\frac{0}{0}$	$\frac{25}{4309}$	$\frac{50}{8619}$	$\frac{75}{12928}$	$\frac{100}{17238}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$
Алга-биомасса на внешний рынок, % / (т/г.)	—	$\frac{100}{12779}$	$\frac{100}{12779}$	$\frac{100}{12779}$	$\frac{100}{12779}$	$\frac{100}{12779}$	$\frac{100}{75173}$	$\frac{100}{56380}$	$\frac{75}{9585}$	$\frac{50}{6390}$	$\frac{25}{3195}$	$\frac{0}{0}$
Степень замещения природного газа биодизелем/ (биодизелем + синтез-газом)	$\frac{0}{12,3}$	$\frac{22,86}{35,16}$	$\frac{17,15}{29,45}$	$\frac{11,43}{23,73}$	$\frac{5,72}{18,02}$	$\frac{0}{12,3}$	$\frac{>100}{>100}$	$\frac{85,73}{98,03}$	$\frac{22,86}{35,80}$	$\frac{22,86}{36,44}$	$\frac{22,86}{37,08}$	$\frac{22,86}{37,72}$
Простой срок окупаемости комплекса, РВР, лет	13,40	6,20	4,51	3,73	3,24	2,97	4,47	4,61	6,96	8,03	9,66	12,42
Чистая прибыль, млн руб.	196,4	1177,2	2161,3	3142,6	4121,2	5097,1	4760,0	3696,1	958,0	738,6	519,3	300,0
EBITDA, %	37,69	76,81	83,52	86,50	88,15	89,18	93,95	93,06	73,70	69,50	63,54	54,42
Рентабельность по чистой прибыли, %	19,59	54,06	62,17	65,81	7,85	69,14	69,18	68,31	50,47	45,65	38,81	28,34
Капитальные затраты, млн руб.	4264,0	6030,0	6042,3	6054,8	6067,2	6080,7	14032,6	11492,0	6028,4	6927,0	6025,5	6024,1
Степень использования CO <sub>2</sub> , масс. доли	0,05	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,88	0,67	0,21	0,21	0,21	0,21



На рис. 5 в качестве примера приведена компоновка завода плазменной переработки ОПП производительностью 50 тыс. т отходов в г, реализующего описанную комплексную технологию плазменной переработки ОПП [7].

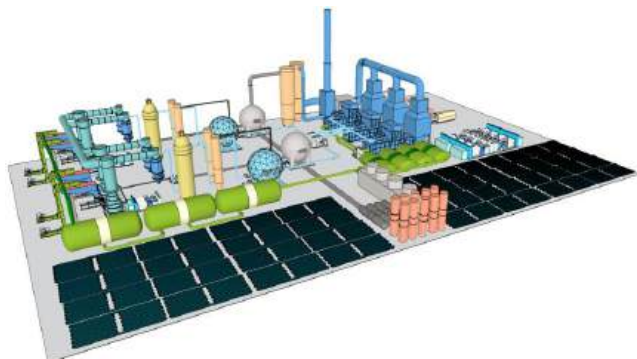


Рис. 5. Компоновка завода плазменной переработки ОПП производительностью 50 000 т отходов в г, реализующего описанную комплексную технологию плазменной переработки ОПП

### Выводы

Разработанная программа и предложенный в настоящей работе подход позволяют проводить технико-экономический анализ комплекса ВТПК + БАТ с участием не только микроводорослей *CHLORELLA VULGARIS*, но и микроводорослей *SPIRULINA PLATENSIS* и оптимизировать технологические и экономические показатели работы комплекса ВТПК + БАТ с учетом региональных особенностей.

*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., Вошинин С. А., Переславцев А. В. и др. Перспективные аспекты плазменной переработки стеклосодержащих отходов // Твердые бытовые отходы. 2018. № 3. С. 33—37.
2. Артемов А. В., Переславцев А. В., Вошинин С. А. и др. Плазменные технологии переработки иловых отходов // Твердые бытовые отходы. 2019. № 11. С. 18—22.
3. Артемов А. В., Переславцев А. В., Вошинин С. А. и др. Переработка отходов байкальского целлюлозно-бумажного комбината с использованием плазменных технологий: технико-экономический анализ // Вода: химия и экология. 2019. № 10—12. С. 114—119.
4. Артемов А. В., Переславцев А. В., Вошинин С. А. и др. Плазменная переработка медицинских отходов // Военно-медицинский журнал. 2021. Т. 342. № 4. С. 59—65.
5. Артемов А. В., Переславцев А. В., Вошинин С. А. и др. Плазменная переработка смеси коммунальных, полимерных и медицинских отходов: технико-экономический анализ // Экология промышленного производства. 2021. № 2. С. 7—12.
6. 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.
7. Артемов А. В., Переславцев А. В., Вошинин С. А., Кулыгин В. М. Новые технологии высокотемпературной пиролизической переработки отходов производства и потребления // Твердые бытовые отходы. 2017. № 8. С. 28—32.

## "Green" technologies in plasma treatment of solid wastes

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 of various kinds of solid wastes and its mixtures, such as municipal wastes, heavy oil residues, waste of polymer materials, automobile tires, waste water, sludge accumulations, medical wastes and biomass of microalgae *CHLORELLA VULGARIS* (alga-biomass) by the using of 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. The calculation of the main technical and economic indicators of the plasma treatment plant with alga technology unit was carried out by the specially developed program.*

**Keywords:** plasma treatment of wastes, alga-technology, solid municipal wastes, heavy oil residues, waste of polymer materials, medical wastes, basalt-like slag, plasmatorch, gas turbine installation.

Bibliography — 7 references.

Received March 18, 2021

УДК 50.7

DOI: 10.52190/2073-2589\_2021\_3\_8

## О возможности повышения эффективности промышленных производств строительных материалов. Влияние малых концентраций пластифицирующих веществ и ультрадисперсных добавок на прочность цементобетонов

**В. Г. ПУЗАЧ**, д-р техн. наук; **Н. Н. ШУСТРОВ**, канд. техн. наук  
Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

**Е. С. ШИТИКОВ**, канд. техн. наук; **В. А. ШАЦКАЯ**  
ООО НПП «Полигран», г. Калининград, Россия

**Е. В. ГОРДЕЕВА**  
ЦЛНМГАЗ ОАО ЦНИИС, Москва, Россия

*Показана возможность снижения расхода цемента в бетонных смесях, повышения прочности и марки бетонов без изменения состава бетонных смесей при малых концентрациях пластификаторов и наночастиц и активирования воды перед введением её в сухие бетонные смеси.*

**Ключевые слова:** золы-уноса, портландцемент, пластифицирующие добавки, суперпластификаторы С-3, гиперпластификаторы, ЛСТ-пластификаторы, нанокремнезём, нанодобавки, активированная вода.

Современные цементобетоны — это бетоны с различного рода добавками, обеспечивающими бетонным сооружениям и изделиям необходимые конструктивно-технические и эксплуатационные свойства.

Ультрадисперсные наноразмерные материалы (порошки, золи, суспензии) различной природы, как следует из данных многочисленных экспериментов, имеют перспективу широкого внедрения в промышленность строительных материалов, например стекла [1, 2], бетона [3, 4] или бетонов с золой-уноса тепловых электростанций и мусоросжигательных заводов [5, 6], для повышения прочности изделий на десятки и сотни процентов. Но наноматериалы, как правило, имеют искусственное происхождение и потому высокую стоимость. К относительно дешевым относятся гидротермальный нанокремнезём, выделяемый из термальных вод Камчатки [3]. Применение гидротермального нанокремнезёма в бетонах теснейшим образом связано с использованием пластифицирующих водоредуцирующих добавок, поскольку нанокремнезём, как и большинство кремнезёмсодержащих материалов, вызывает повышенный расход воды затво-

рения бетонных смесей, что, в свою очередь, может отрицательно сказываться и на величинах прочности, и на морозостойкости, и в конечном итоге на долговечности бетонов [7, 8].

При всём множестве видов пластификаторов бетонных смесей, предлагаемых на рынке строительных материалов, их условно можно разделить на три группы на основе:

- отходов промышленных производств, особенно отходов производств целлюлозы на целлюлозно-бумажных комбинатах — технических лигносульфонатов (пластификаторы ЛСТ);
  - продуктов конденсации нафталин(меламин)-сульфокислот с формальдегидом (суперпластификаторы типа С-3);
  - эфиров поликарбоновых (полиакриловых) кислот (гиперпластификаторы).
- Удельные расходы таких добавок (по сухому веществу) в бетонных смесях обычно лежат в диапазонах:
- для пластификаторов на основе ЛСТ — 0,2... 0,4 % от массы цемента в бетонной смеси;
  - для суперпластификаторов типа С-3 — 0,4... 0,7 %;
  - для гиперпластификаторов (ПК) — 0,07... 0,15 %.

Чаще всего суперпластификаторы и гиперпластификаторы применяют в комбинациях с пластификаторами ЛСТ, что, как правило, ещё больше повышает удельный расход добавок.

Наименее эффективными с точки зрения снижения водопотребности бетонных смесей, темпов роста и величин прочности бетонов являются пластификаторы на основе ЛСТ, наиболее эффективны полиакриловые гиперпластификаторы. Они всё более активно используются в производствах бетонов, хотя имеют и недостатки, в частности повышенное водо-

**Пузач Виктор Григорьевич**, старший научный сотрудник.

E-mail: puzach@ined.ras.ru

**Шустров Николай Николаевич**, научный сотрудник.

E-mail: nik-1938@mail.ru

**Шитиков Евгений Сергеевич**, директор.

E-mail: esh\_45@mail.ru

**Шацкая Виктория Алексеевна**, инженер.

E-mail: vshackaya786@gmail.com

**Гордеева Елена Викторовна**, заведующая лабораторией.

E-mail: Teremok-66@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 мая 2021 г.

© Пузач В. Г., Шустров Н. Н., Шитиков Е. С., Шацкая В. А., Гордеева Е. В., 2021

отделение. Поскольку цены на указанные виды пластификаторов бетонов отличаются практически на порядок в пользу вторых, нетрудно подсчитать, что применение ПК-гиперпластификаторов в бетонных смесях существенно увеличивает вклад пластифицирующей добавки в себестоимость единицы объема бетонной смеси (бетона).

Это обстоятельство поддерживает актуальность выполненной работы, целью которой была оценка возможности снижения удельного расхода супер гиперпластификаторов с помощью:

- применения нанодобавок, в частности гидротермального нанокремнезёма, в качестве наномодификатора бетонной смеси [3];
- комбинирования с техническими лигносульфонатами ЛСТ, предварительно фракционированными, окисленными, карбоксилированными и даже наномодифицированными [9], т. е. ЛСТ с изменённым химическим составом и структурой полимеров;
- применения активированной воды для замешивания бетонных смесей [10].

Не менее актуальной остается и задача снижения удельного расхода цемента как самого дорогостоящего компонента из основных заполнителей в бетонных смесях.

В экспериментах, проводившихся в течение нескольких последних лет, использовали:

- портландцементы марок ПЦ 500-ДО (СЕМ-1 42,5) и ПЦ 400-ДО (СЕМ-1 32,5) от целого ряда заводов-производителей: Белгородского, Вольского, Воскресенского, Горнозаводского, Мальцовского, Новороссийского, Старооскольского, Спасского и Якутского, а также от ООО "Холсим (Рус) СМ" (б. Щуровский). В ряде опытов использовали тампонажные цементы от Сухоложского завода марок ПЦТ-1-50 и "G";
- песок кварцевый речной по ГОСТ 8736-2014, ГОСТ 26633-2015, Мкр 2,1—2,5 от Орешкинского комбината нерудных материалов, Мансуровского и из других карьеров;
- щебень гранитный по ГОСТ 8267-93, ГОСТ 2663-2015 от ОАО "Павловскгранит", ОАО "ГраниКузнецкое", Каменноугольного и из других карьеров;
- технический лигносульфонат ЛСТ-Е от Сокольского ЦБК;
- суперпластификатор С-3 от Первоуральского завода объединения "Полипласт";
- гиперпластификаторы поликарбонатные (полиакрилатные), чаще всего от фирмы Sika [11];
- гидротермальный нанокремнезём в виде золя или сублимированного порошка [3];
- нанопорошки окислов металлов: алюминия и композиции алюминия и магния, а также вольфрама (от ИМет РАН);
- ультрадисперсный порошок наноалмазов (от ИПХЭТ РАН);
- золу-уноса от Каширской ГРЭС.

Предварительную обработку партий технического лигносульфоната сокольского ЛСТ-Е, т. е. фракционирование, окисление (карбоксилирование) и в ряде опытов наномодификацию с использованием золы-уноса ТЭС по известному методу золь-гель-перехода, проводили в аппарате роторного типа

РА-2-15 [12, 13]. Активацию воды затворения перед её введением в бетонную смесь осуществляли в проточных кавитационно-гидродинамических устройствах с рабочим элементом специальной конструкции [14, 15].

Образцы цементобетонов приготавливали в соответствии с ГОСТ 7473-94 "Смеси бетонные. Технические условия" и после затвердевания и набора прочности испытывали на сертифицированном оборудовании в соответствии с ГОСТ 10180-2000 "Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам" и ГОСТ 10181-2000 "Смеси бетонные. Методы испытаний". После затвердевания в стандартных формах образцы цементобетонов помещали в камеру нормального хранения.

Первые две серии экспериментов проводили на системах цемент—вода (цементное тесто, ЦТ) и цемент—песок—вода (мелкозернистый бетон, МЗБ) при соотношении количеств песка и цемента в смеси П/Ц = (1,5—2)/1 (т. е. при соотношениях, дающих максимум прочности образцов МЗБ-бетона по Баженову Ю. М. [7]). Водоцементное отношение в контрольных замесах без добавок было равно 0,4 для цементного теста и 0,55 для МЗБ. В смесях с добавками водоцементное отношение подбирали таким, чтобы бетонные смеси были равноподвижными с контрольными (подвижность смесей определяли по величине расплыва стандартного конуса [7]).

В первой серии опытов исследовали влияние на прочность образцов цементобетонов при сжатии (в возрасте 2 и 28 сут) и изгибе в раннем возрасте (2 сут) малых концентраций комплекса пластифицирующих добавок, состоящих из суперпластификатора С-3 и окисленного ЛСТ при соотношениях ЛСТок/С-3 = (1,5—4)/1 и суммарной концентрации менее 0,1 % от массы цемента в смеси. Смесей затворяли на активированной воде.

На рис. 1 представлена зависимость усреднённых величин прочности образцов исследованных бетонных смесей (в виде отношения к прочности контрольных образцов) от суммарной концентрации комплексной добавки С-3 + ЛСТок. Линия 1 отвечает данным по прочности при изгибе, линия 2 — по прочности при сжатии (обе — при двухсуточном возрасте образцов бетона), а линия 3 — по прочности при сжатии образцов бетона после 28-суточного твердения.

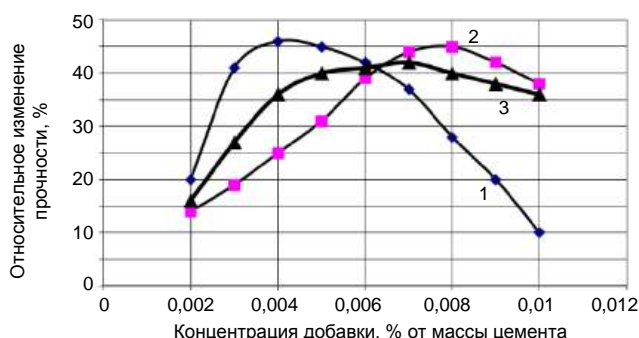


Рис. 1. Зависимость относительного изменения величин прочности образцов бетонов при сжатии и изгибе от концентрации пластифицирующих добавок

Одновременно с теми же материалами проводили замесы бетонных смесей с пластифицирующими добавками С-3 и ЛСТок (вместе и отдельно) при введении их в бетонную смесь в количествах, обычно применяемых в практике приготовления бетонных смесей на предприятиях, производящих стройматериалы.

Использовали портландцементы марки ПЦ 500-ДО: старооскольский (прочность при сжатии контрольных бездобавочных образцов бетонов через 28 сут твердения 47,0 МПа), горнозаводский (прочность контрольных образцов 48,0 МПа) и новороссийский (прочность контрольных образцов 58,0 МПа). В качестве дополнительных воздействующих факторов применяли: гидротермальный нанокремнезём в малых концентрациях и активированную воду. Результаты проведённых опытов приведены в табл. 1.

Во второй серии опытов проводили замесы бетонных смесей с гиперпластификаторами, в основ-

ном марки Sika Viscokrete 5N как наиболее эффективного по данным ранее проведённых сравнительных испытаний [11]. Использовали портландцементы марки ПЦ 500-ДО: новороссийский (с прочностью при сжатии контрольных образцов бездобавочных цементобетонов через 28 сут твердения 38,0 МПа), два образца старооскольского портландцемента: старооскольский-1 (прочность контрольных образцов 57,0 МПа) и старооскольский-2 (прочность контрольных образцов 47,0 МПа), и от ООО "Холсим(Рус)СМ" (прочность контрольных образцов 56,0 МПа).

Результаты измерений прочности образцов цементобетонов при сжатии приведены в табл. 2.

Третью серию экспериментов проводили на системе цемент—песок—щебень—вода, т. е. на "тяжелых" бетонах, в условиях строительных лабораторий. Некоторые характерные результаты сведены в табл. 3. Начальная подвижность бетонных смесей составляла 10—12 см осадки стандартного конуса.

Таблица 1

Результаты опытов

Цемент	Кол-во добавки С-3, % к массе цемента	Кол-во добавки ЛСТок, % к массе цемента	Кол-во добавки нанокремнезёма, % к массе цемента	Активация воды затворения бетонной смеси	Изменение прочности при сжатии через 28 сут твердения, %
Старооскольский	0,50	—	—	Нет	+ 30
	—	0,33	—	Нет	+ 18
	0,16	0,33	—	Нет	+ 22
	—	0,33	—	Есть	+ 40
	0,16	0,33	—	Есть	+ 42
	—	0,33	0,005	Нет	+ 44
Горнозаводский	—	0,33	0,005	Есть	+ 66
	0,50	—	—	Нет	+ 33
Новороссийский	0,50	—	0,002	Нет	+ 69
	0,50	—	—	Нет	+ 34
	0,50	—	0,002	Нет	+ 54

Таблица 2

Результаты измерений величин прочности образцов цементобетонов при сжатии

Цемент	Кол-во добавки гиперпластификатора, % к массе цемента	Кол-во добавки ЛСТок, % к массе цемента	Кол-во добавки нанокремнезёма, % к массе цемента	Активация воды затворения бетонной смеси	Относительное изменение прочности при сжатии, %
Новороссийский	0,09	—	—	Нет	+ 60
	0,09	—	0,002	Нет	+ 70
	0,05	—	—	Нет	+ 48
	0,05	—	0,0045	Нет	+ 70
	0,05	0,04	0,005	Есть	+ 116
	—	0,04	0,006	Есть	+ 55
	0,025	0,18	0,0045	Нет	+ 82
	0,020	0,08	—	Нет	+ 55
Старооскольский-1	0,06	0,29	—	Нет	+ 26
	0,06	0,29	—	Есть	+ 36
Старооскольский-2	0,025	0,28	—	Нет	+ 24
	0,025	0,24	0,040	Нет	+ 34
"Холсим(Рус)СМ"	0,09	—	—	Нет	+ 36
	0,05	0,18	—	Есть	+ 39

Таблица 3

Результаты эксперимента

Марка цемента	Удельный расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	Соотношение цемента, песка и щебня, Ц/П/Щ	Кол-во суперпластификатора, % от массы цемента	Кол-во гиперпластификатора, % от массы цемента	Кол-во добавки ЛСТок, % от массы цемента	Кол-во добавки нанокремнезёма, % от массы цемента	Прочность при сжатии через 28 сут твердения, МПа
ПЦ 500-ДО (42,5)	350	1/2,6/2,9	0,50	—	—	—	30,0
	350	1/2,6/2,9	0,30	—	0,15	—	36,0
	350	1/2,6/2,9	0,15	—	0,30	—	33,0
	450	1/1,7/2,4	0,50	—	—	—	53,0
	450	1/1,7/2,4	0,50	—	—	0,002	64,0
	480	1/1,5/2,3	—	—	—	—	34,6
ПЦ 400-ДО (32,5)	440	1/1,8/2,5	—	0,003	0,033	0,006	38,6
	430	1/1,8/2,6	—	0,030	0,330	0,060	45,5



Отдельно были проведены промышленные испытания бетонных смесей транспортного назначения с применением малых концентраций гидротермального нанокремнезёма. Испытания проводили на предприятии "Спецстройбетон- ЖБИ-17". Объём каждой партии бетонной смеси составлял 9 м<sup>3</sup>. Использовался белгородский портландцемент марки ПЦ 500-ДОН (42,5). Начальная подвижность смеси 22—25 см осадки стандартного конуса (марка бетона по подвижности П5). Наномодификатор подавали в автомиксер после загрузки бетонной смеси в виде суспензии объёмом 8—10 л. Отбор проб бетона производили через 15—20 мин перемешивания смеси в автомиксере. Результаты испытаний образцов бетона на прочность при сжатии приведены в табл. 4.

В завершение выполненной работы представлялось целесообразным провести оценку характера взаимодействия наночастиц в водной среде с различными видами портландцементов из разных областей России: белгородского ПЦ 500-ДО (СЕМ-1 42,5) как типичного представителя Европейской части РФ, якутского ПЦ 500-ДО и спасского ПЦ 400-ДО из Дальневосточной части РФ, а также двух тампонаж-

ных цементов Сухоложского предприятия марок ПЦТ-1-50 и G. Эти оценки в виде зависимости величин относительного изменения прочности при сжатии образцов цементобетонов после 28 сут твердения от количества вводимой нанодобавки в области малых концентраций представлены на рис. 2—4.

Приготовление бетонных смесей проводили на системе цемент—вода. Водоцементное отношение составляло 0,4.

На рис. 2 линия 1 соответствует использованию белгородского портландцемента и гидротермального нанокремнезёма, а линия 2 построена по осреднённым величинам прочности при использовании нанодобавок окиси алюминия, комплекса окисей алюминия и магния, а также нанопорошка вольфрама.

На рис. 3 линия 1 соответствует данным опытов с гидротермальным нанокремнезёмом цементных растворов с якутским цементом, а линия 2 — со спасским. Точка 3 соответствует результату измерений прочности образцов цементобетона на основе якутского цемента с комплексной нанодобавкой, состоящей из смеси порошков гидротермального нанокремнезёма и наноалмазов в отношении 1/1.

Таблица 4

Результаты испытаний образцов бетона на прочность при сжатии

Удельный расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	Соотношение цемента, песка и щебня, Ц/П/Щ	Кол-во гиперпластификатора, % от массы цемента	Кол-во добавки нанокремнезёма, % от массы цемента	Прочность при сжатии через 28 сут твердения, МПа	Марка бетона по величине прочности при сжатии
310	1/2,8/3,2	0,09	—	37,1	В 25
310	1/2,8/3,2	0,09	0,002	46,3	В 35
380	1/2,1/2,7	0,09	—	46,2	В 35
380	1/2,1/2,7	0,09	0,002	59,2	В 45
450	1/1,8/2,3	0,09	—	61,9	В 45
450	1/1,8/2,3	0,09	0,005	75,1	В 55

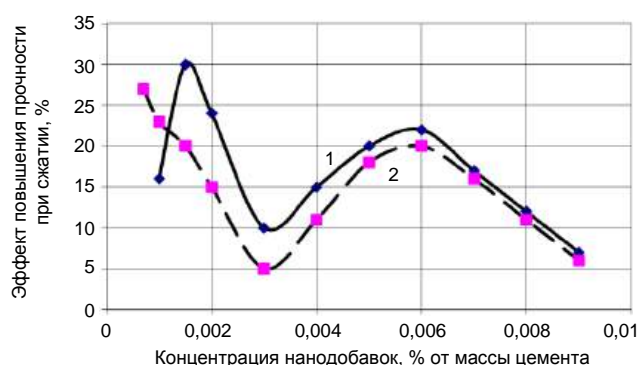


Рис. 2. Зависимость относительного увеличения прочности при сжатии образцов бетона в 28-суточном возрасте от концентрации нанодобавок (белгородский ПЦ 500-ДО)

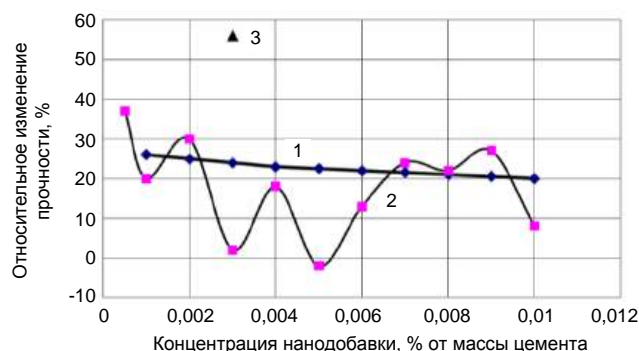


Рис. 3. Зависимость относительного увеличения прочности образцов бетонов при сжатии в 28-суточном возрасте от концентрации геотермального нанокремнезёма

На рис. 4 линия 1 отвечает данным водоцементных растворов с гидротермальным нанокремнезёмом на основе тампонажного цемента марки ПЦТ-1-50, а линия 2 — тампонажного цемента марки ПЦТ-G.

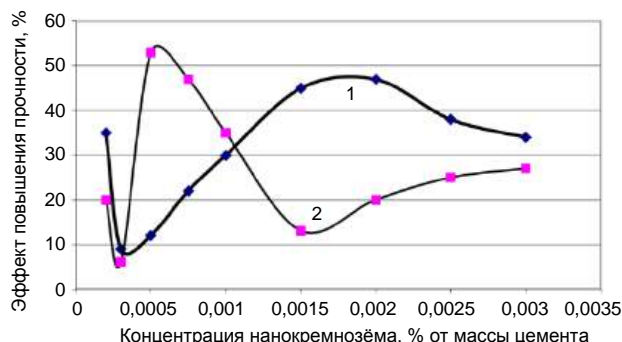


Рис. 4. Зависимость относительного изменения прочности образцов бетона при сжатии в 28-суточном возрасте от концентрации геотермального нанокремнезёма

### Выводы

Для цементных растворов и мелкозернистого бетона при использовании активаторов воды затворения возможно эффективное снижение количества вводимых пластифицирующих добавок в виде смеси суперпластификатора С-3 и фракционированного и окисленного ЛСТ до 0,1 % от массы цемента вместо 0,2—0,5 % без потери прочностных характеристик. Для тех же водоцементных систем при использовании гидротермального нанокремнезёма и фракционированного, окисленного и наномодифицированного ЛСТ возможно снижение расхода полиакрилатных гиперпластификаторов в 1,5—4,5 раза. Применение активированной воды для затворения цементных растворов и мелкозернистых бетонных смесей оказывается дополнительным фактором, повышающим величины прочности образцов бетонов ещё на 20—40 %.

Наномодифицирование окисленных технических лигносульфонатов по методу золь-гель-перехода с использованием золы-уноса ТЭС может приводить к повышению эффекта изменения прочности более чем в 2 раза (с +18 до +44 %; см. табл. 1).

Малые концентрации комплекса поликарбоксилатных гиперпластификаторов с модифицированными окислением техническими лигносульфонатами и/или с гидротермальным нанокремнезёмом способствуют снижению расхода цемента в тяжелых бетонных смесях или повышению прочности образцов бетонов до уровня, позволяющего повышать марку бетона на две единицы без изменения исходного состава бетона.

При внедрении ультрадисперсных наноматериалов в производство цементобетонов необходимо учитывать различный характер взаимодействия его

частиц с разными видами портландцементов (различных марок и от разных производителей) в водной среде, что, видимо, связано с отличиями не только в общем химическом и минералогическом составе, но и в действительном химическом составе и в распределении активных центров на поверхности частиц (зёрен) цемента [8]. Для одного типа портландцемента влияние нанодобавок различной природы (окись кремния, окислы металлов) на прочность при сжатии образцов цементобетонов имеет одинаковый характер. Применение смеси различных наноматериалов, в частности смеси порошков гидротермального нанокремнезёма и наноалмазов, обеспечило удвоенный положительный эффект по прочности образцов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шустров Н. Н., Пузач В. Г., Игнатов С. А., Шитиков Е. С. Упрочнение изделий из стекла ультрадисперсными нанодобавками // Стекло и керамика. 2015. № 8. С. 8—11.
2. Пузач В. Г., Шустров Н. Н., Мохнатов Г. Ю., Шитиков Е. С. Упрочнение изделий строительного назначения из отходов стекла ультрадисперсными добавками // Экология промышленного производства. 2015. № 1. С. 2—5.
3. Потапов В. В., Шитиков Е. С., Трутнев А. С., Горбач В. А., Портнягин С. Н. Влияние наночастиц кремнезёма на прочностные характеристики цементных образцов // Физика и химия стекла. 2011. Т. 37. С. 641—652.
4. Пузач В. Г., Шустров Н. Н., Карлов С. П., Шитиков Е. С., Червяков М. В. Наноматериалы в производстве строительных бетонов // Нанотехника. Инженерный журнал. 2013. № 1. С. 87—92.
5. Пузач В. Г., Шустров Н. Н., Шитиков Е. С., Мохнатов Г. Ю. Инновационная технология утилизации золошлаковых отходов тепловых электростанций на твердом топливе для получения строительных материалов // Экология промышленного производства. 2012. № 2. С. 16—18.
6. Пузач В. Г., Шустров Н. Н., Шитиков Е. С., Шацкая В. А. Золы и шлаки мусоросжигательных заводов. Области возможного применения в производствах строительных материалов // Экология промышленного производства. 2020. № 3. С. 2—4.
7. Баженов Ю. М. Технология бетона: учеб. пособие для вузов. — М.: Высшая школа, 1987. — 415 с.
8. Шестопёров С. В. Долговечность бетона транспортных сооружений. — М.: Транспорт, 1966. — 500 с.
9. Пузач В. Г., Шустров Н. Н., Гордеева Е. В., Шитиков Е. С., Вахрушев Л. П., Шацкая В. А. О возможности повышения эффективности производств строительных материалов. Особенности действия добавок, пластифицирующих бетонные смеси // Экология промышленного производства. 2020. № 4. С. 6—14.
10. Шитиков Е. С., Гордеева Е. В. Активированная вода — фактор повышения прочности бетонов // Транспортное строительство. 2019. № 3. С. 16—19.
11. Гордеева Е. В., Шитиков Е. С., Заикин С. А. Сравнительные исследования некоторых свойств бетонов для транспортного строительства с новыми поликарбоксилатными пластификаторами // Научные труды ОАО ЦНИИС. Вып. 239 "Технология, прочность и долговечность строительных материалов для транспортного строительства". — М.: изд-во ЦНИИС, 2007. С. 127—135.
12. Промтов М. А. Пульсационные аппараты роторного типа. Теория и практика. — М.: Машиностроение-1, 2001. — 128 с.
13. Червяков В. М., Однолько В. Г. Использование гидродинамических и кавитационных явлений в роторных аппаратах. — М.: Машиностроение, 2008. — 107 с.
14. Червяков В. М., Шитиков Е. С. и др. Гидродинамический смеситель. Патент № 2553861 Рос. Федерации № 2014106876. Заявл. 12.03.2014. Оpubл. 20.06.2015.
15. Червяков В. М., Шитиков Е. С. и др. Устройство для физико-химической обработки жидкой среды. Патент № 2587183 Рос. Федерации № 2015106521/05. Заявл. 25.02.2015. Оpubл. 20.06.2016.

## About the possibility of improving efficiency industrial production of building materials. Effect of low concentrations of plastifying substances and ultra-dispersed additive for the strength of cement

V. G. PUZACH, N. N. SHUSTROV

Joint Institute for High Temperatures of the RAS, Moscow, Russia

E. S. SHITIKOV, V. A. SHATSKAYA

LLC NPP POLYGRAN, Kaliningrad, Russia

E. V. GORDEEVA

CLNMGASZ OAO CNIIS, Moscow, Russia

*The possibility of reducing the consumption of cement in concrete mixtures, increasing the strength of concrete and increasing the grade of concrete without changes in the composition of concrete mixes at low concentrations of plasticizers and nanoparticles and activating water before introduction this into dry concrete mixtures has been established.*

**Keywords:** fly ash, Portland cement, plasticizer, super plasticizers S-3, hyper plasticizers, LST plasticizers, nanosilica, nanoadditives, active water.

Bibliography — 15 references.

*Received May 14, 2021*

УДК 666.3.016

DOI: 10.52190/2073-2589\_2021\_3\_14

## Утилизация техногенных отходов в качестве добавок для модификации малопластичного глинистого сырья

Г. М. БАТРАКОВА, д-р техн. наук; В. А. ШАМАНОВ, канд. техн. наук;  
Е. И. ПАНЬКОВА; А. Э. ЩЕНИНА

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

А. А. МАРТЫНОВА

АО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов», г. Пермь, Россия

*Представлены результаты исследования керамической массы для производства стеновой керамики из малопластичного глинистого сырья с введением добавок отходов.*

**Ключевые слова:** утилизация отходов, вторичные ресурсы, глина, малопластичное глинистое сырье, алюмосодержащий отход, гидролизный лигнин.

В "Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 г." обозначен вектор решения проблемы снижения объемов накопления отходов — ресурсосбережение, вовлечение отходов в повторное использование, развитие технологий и внедрение специального промышленного оборудования [1]. Такой подход направлен на реализацию мирового принципа обращения с отходами 3R (REDUCE/Сокращение потребления—REUSE/Повторное использование—RECYCLE/Переработка). Указанный принцип в большей степени представлены в государственных программах по внедрению раздельного сбора и переработке твердых коммунальных отходов. Не менее важно увеличивать объем вовлечения отходов в производство материалов и оценивать перспективы межотраслевого взаимодействия для поиска эффективных направлений утилизации отходов и внедрения концепции замкнутого цикла производств.

В полной мере сказанное относится к использованию техногенных отходов в производстве керамических материалов. Вторичные ресурсы из производственных отходов позволяют снижать истощение

традиционной сырьевой базы (глинистого сырья), предотвращать нарушение природных ландшафтов и наносить экологический ущерб от карьерной разработки минерально-сырьевых ресурсов, а также уменьшать негативное воздействие от размещения отходов в окружающей среде [2, 3]. Ресурсно-экономическим показателем использования вторичных материальных ресурсов принят показатель замещения (в %) природного сырья из невозобновляемых природных ресурсов на сырье из обработанных отходов.

В соответствии с требованиями ГОСТ 9169 "Сырье глинистое для керамической промышленности" глинистое сырье оценивают по следующим показателям: огнеупорность и содержание глинозема, минеральный состав, содержание крупнозернистых включений, пластичность и спекаемость. Кристаллическая структура, химический состав примесей и их количество определяют пригодность глины для производства изделий, в том числе с введением корректирующих добавок, отвечающих требованиям к качеству получаемой продукции [2—4].

В обзоре [4] обобщен мировой и отечественный опыт применения техногенных отходов в производстве строительных материалов, в том числе стеновой керамики. В качестве добавок, позволяющих улучшить технологию производства и эксплуатационные свойства товарной продукции, используют моно- и полиминеральные отходы: хвосты обогащения руд, отходы угледобычи, пески отсева, шлам химико-металлургических производств, шлам процессов водоподготовки, шлаки от сжигания угля, золы тепловых электростанций и мусоросжигательных заводов, шлам гальванических производств, отходы производства минеральных удобрений, отработанный керамический сорбент, отвалы месторождений вермикулита, осадок шахтных вод и т. д.

Органические отходы в чистом виде или с разным содержанием тяжелых металлов и минеральных соединений рекомендовано применять в основном в качестве поризующих добавок и/или в целях снижения энергопотребления при обжиге. В перечень добавок органической природы входят отходы нефтедобычи

**Батракова Галина Михайловна**, профессор кафедры "Охрана окружающей среды".

E-mail: eco@pstu.ru, gmbatrakova@mail.ru

**Шаманов Виталий Альбертович**, доцент кафедры "Строительный инжиниринг и материаловедение".

E-mail: shamanov@cems.pstu.ru

**Панькова Екатерина Илдусовна**, аспирант кафедры "Охрана окружающей среды".

E-mail: Pankovaei@pstu.ru

**Щенина Анастасия Эдуардовна**, магистр кафедры "Охрана окружающей среды".

E-mail: n.schenina@mail.ru

**Мартынова Анна Александровна**, начальник лаборатории "Охрана окружающей среды".

E-mail: Martynovaniipm@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 28 июня 2021 г.

© Батракова Г. М., Шаманов В. А., Панькова Е. И., Щенина А. Э., Мартынова А. А., 2021



(буровой шлам, нефтешлам), осадок сточных вод, в том числе обезвоженный осадок производства бумаги и картона (скоп), активный ил биологических очистных сооружений, отходы сельскохозяйственной отрасли (рисовая шелуха, жмых производства оливкового масла, отходы хлопка-сырца, сахарного тростника, чайного производства, виноделия и т. д.), отходы деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности и т. д.

Любые лигнинсодержащие отходы отнесены к ценному вторичному ресурсу. Их применяют в производстве стеновых керамических материалов в качестве выгорающей добавки и для улучшения теплоизоляционных свойств [3, 5, 6]. Обычно эти отходы имеют высокую влажность, поэтому требуют предварительного обезвоживания/высушивания. Для достижения необходимой механической прочности готовой продукции лигнинсодержащие отходы в сырьевой композиции составляют до 10 масс. % (редко до 20 масс. %) [4].

В табл. 1 представлены распространенные добавки к глинистому сырью из отходов.

Известна классификация добавок на отошающие, пластифицирующие, флюсующие, разувлажняющие, противоморозные, добавки для улучшения теплоизоляционных свойств готовых изделий, снижения пористости и водопоглощения и т. д. [2, 3]. Наиболее распространены добавки, которые не влияют на усадку, образуют минеральный скелет в отформованном изделии, повышают капиллярность керамической массы. Добавки различной дисперсности, содержащие частицы соединений металлов, являются центрами структурообразования и способствуют упрочнению получаемой продукции. Введение отошающих добавок в шихту положительно влияет на сушильные свойства, уменьшает воздушную и огневую усадку керамической массы, что позволяет сократить продолжительность сушки и исключает образование усадочных трещин.

Технология производства керамических строительных материалов предусматривает использование добавок, удовлетворяющих следующим общим характеристикам: отсутствие следовых количеств радиоактивности; влажность, не превышающая 1 %; оптимальный фракционный состав 0,1–100 мкм.

Используемые отходы должны иметь паспорт об отнесении их к IV–V классу опасности для окружающей среды.

Поисковые исследования, разработка технологий использования отходов в производстве керамических строительных материалов актуальны и в России, и за рубежом [4, 7, 8].

Пермский край имеет несколько разрабатываемых и резервных месторождений глинистого сырья [9]. Сырьевым компонентом в исследовании являлась глина одного из крупнейших месторождений кирпично-черепичных глин Пермского края — Таушинского месторождения. Глины этого месторождения пригодны для производства строительного кирпича и керамзитового гравия марки 350. Глинистое сырье относится к группе полукислых глин по суммарному содержанию  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$  в прокаленном состоянии (содержание  $Al_2O_3$  — от 16 до 21 %), отличается низким содержанием крупнозернистых включений, имеет высокое содержание оксида железа и магния.

Авторами проведены исследования возможности улучшения свойств керамической массы из малопластичного глинистого сырья за счет введения в состав шихты двух видов отходов: добавки минерального состава и выгорающей добавки. Цель исследования заключалась в поиске состава керамической массы улучшенными свойствами для производства стеновой керамики и определении влияния добавок из отходов на эксплуатационные свойства керамических образцов.

В качестве отошающей добавки использован отход с высоким содержанием  $Al_2O_3$  (более 85 %), образующийся при очистке пылегазовых выбросов процесса испытаний энергонасыщенных материалов. Состав отхода неоднороден, методом атомно-адсорбционного анализа установлены примеси (масс. %):  $Fe_2O_3$  —  $3,8 \pm 1,0$ ;  $MnO$  —  $0,04 \pm 0,01$ ;  $CuO$  —  $0,0020 \pm 0,0005$ ;  $MgO$  —  $0,010 \pm 0,003$  [10]. Сравнительная характеристика отхода по содержанию основных оксидов и массовой доле монозёрен, слагающих агрегаты до 5 мкм, показала соответствие марке ГСМ по ГОСТ 30559 "Глинозем неметаллургический". Класс опасности отхода для окружающей среды — III, установлен расчетным способом.

Таблица 1

Виды отходов, используемых в качестве добавок

Вид отходов	Количество, масс. %	Фракция, мм
Добавки для повышения эффективности процессов сушки и обжига		
Шамот	5–20	3–0,5
Золы ТЭЦ	15–20	0–3 (без ошлакованных частиц)
Шлаки топливные	3–10	3–0,5
Флотационные хвосты от обогащения угля	3–8	3–0,5
Уголь каменный бурый, антрацит	2–8	0–3
Коксовая мелочь	1–2	Не более 2
Отходы обработки древесины/лигнинсодержащие отходы	1–5/4–10	В естественном и предварительно измельченном виде
Опил	5–30	До 6–8
Добавки для повышения пластичности		
Сульфитно-спиртовая барда	0,5–3	в водном растворе
Добавки для повышения прочности		
Стеклобой	3–5	Тонкодисперсное состояние в виде клинкера
Добавки для повышения прочности, интенсификация окраски черепка		
Пиритные огарки в смеси с коксом	4–6	Не более 0,2

В мировой практике техногенное сырье с разным содержанием оксида алюминия применяют в качестве добавки для изготовления стеновых керамических и огнеупорных материалов [2—4, 11—14]. Керамика на основе  $Al_2O_3$  обладает высокой твердостью, термостойкостью, химической инертностью. Минеральная добавка с содержанием более 20 %  $Al_2O_3$  используется для придания керамическим материалам кислотоупорных свойств [3]. Крупнокристаллическая структура  $Al_2O_3$  снижает трещиностойкость керамической массы. Дисперсность и однородность минеральной добавки, низкая пористость и равномерное распределение дисперсной фазы в объеме керамической матрицы положительно влияют на механические свойства и повышение износостойкости [8].

В качестве выгорающей добавки в исследованиях использован отход из отвала закрытого гидролизного производства на территории Пермского края. Гидролизный лигнин обладал следующими характеристиками: фракция 6—8 мм; влажность 45—50 %; зольность 6,49 % с преобладанием в составе золы  $SiO_2$  (93,4 %); лигнин в составе отхода 67,4 % [15].

Испытания глинистого сырья проводили в соответствии с ГОСТ 21216 "Сырье глинистое. Методы испытаний". Предварительная подготовка добавок к сырьевой смеси заключалась в их высушивании при температуре  $(105 \pm 5)^\circ C$  с последующим измельчением в шаровой мельнице с мелющими телами и просеивании через сито № 1,0. После этого керамическую массу тщательно вымешивали с добавлением воды.

Добавка отходов положительно повлияла на физико-механические свойства (табл. 2). Так, число пластичности увеличилось до 14,56. Модифицированная смесь хорошо формовалась, несмотря на увеличение формовочной влажности до 23 %. Воздушная усадка увеличилась на 39 %, что удовлетворяет технологическим условиям. Увеличение огневой усадки до 4,33 % было связано с добавлением алюмосодержащего отхода. Увеличение алюмосодержащего отхода приводило к ухудшению формования керамической массы и нарушению связности образцов, влияя на усадочную деформацию керамической массы. При содержании в смеси 40 % отхода значение воздушной усадки увеличилось с 6,1 до 8,7 %.

Для изучения влияния вводимых в сырьевую массу двух добавок выполнен многофакторный эксперимент, в котором введение отощающей добавки оценивалось с шагом 20 %, введение добавки гидро-

лизного лигнина — с шагом 5 %. Интервал температуры обжига составлял 1000—1200 °C с шагом 100 °C. В программном продукте Microsoft Excel решена задача поиска оптимальных значений факторов (компонентный состав керамической шихты), удовлетворяющих наименьшее значение показателя водопоглощения по массе (12,97 %): глина — 70,7 %; минеральная добавка — 23,5 %; выгорающая добавка — 5,8 %. Температура обжига составляла 1150 °C. При этом значения воздушной и огневой усадки составили 7,61 и 3,17 % соответственно.

Некоторые эксплуатационно-технические характеристики полученного керамического материала оценивали в сравнении с характеристиками образца из глинистого сырья без добавок. Испытания образцов на водопоглощение, плотность и морозостойкость при объемном замораживании (циклы) проводили в соответствии с ГОСТ 7025 "Кирпич и камни керамические и силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости". Испытания образцов на прочность на сжатие и изгиб проводили в соответствии с ГОСТ 8462 "Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе". Согласно полученному компонентному составу керамической шихты при формовочной влажности были отпрессованы и обожжены при температуре 1150 °C образцы-цилиндры в количестве тридцати штук.

Водопоглощение при атмосферном давлении в кипящей воде оценивали по изменению массы пяти образцов, сравнивая высушенные до постоянной массы и насыщенные водой образцы.

На десяти образцах оценивали предел прочности на сжатие и изгиб.

Плотность определяли на всех образцах, высушенных до постоянной массы, как отношение массы к объему.

Морозостойкость определяли на образцах, насыщенных водой. Замораживание проводили в морозильной камере при температуре минус  $(15 \pm 5)^\circ C$ . Продолжительность одного замораживания 4 ч. Оттаивание проводили в сосуде с водой при температуре  $(20 \pm 5)^\circ C$ . Продолжительность оттаивания 2 ч. Одно замораживание и последующее оттаивание составляют один цикл. Образцы до и после циклов замораживания-оттаивания были оценены на визуальные дефекты, потери массы и прочности.

Результаты исследований физико-механических свойств образцов представлены в табл. 3.

Таблица 2

Характеристика керамической массы в присутствии добавок

Показатели	Значения показателей для образцов, %							
	глина	с добавкой алюмосодержащего отхода				с добавкой гидролизного лигнина		
		20	40	60	80	5	10	15
Формовочная влажность	16,65	20,49	18,62	16,22	14,02	22,07	24,80	27,99
Число пластичности	7,06	7,98	6,75	5,69	4,99	7,90	7,63	7,09
Воздушная усадка	6,1	7,0	8,7	8,8	8,9	7,3	7,1	7,7

Таблица 3

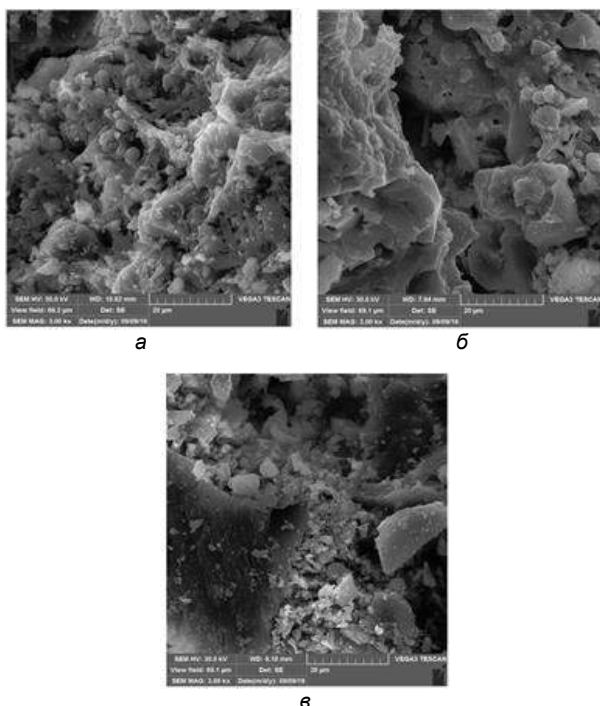
Сравнительная характеристика обожженных образцов в зависимости от состава шихты

Керамические образцы	Физико-механические свойства обожженных образцов				
	Водопоглощение, %	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности, МПа		Морозостойкость, циклы
			Сжатие	Изгиб	
Без добавок	7,5—8,5	1700—1900	10—15	2,2—2,8	>50
С минеральной и выгорающей добавками	6,67	1736,9	17,12	3,4	52

Как следует из представленных данных, прочностные характеристики и морозостойкость керамических образцов с минеральной и выгорающей добавками в составе шихты возрастают, водопоглощение уменьшается.

Согласно ГОСТ 530-2012 "Кирпич и камень керамические. Общие технические условия" значение средней плотности может достигать  $2,40 \text{ г/см}^3$ , прочность к сжатию варьирует в пределах  $10...30 \text{ МПа}$ , прочность к изгибу — в пределах  $1,4...2,2 \text{ МПа}$ , водопоглощение должно быть не менее  $6,0 \%$ , морозостойкость — не ниже 50 циклов. Указанным значениям соответствуют все образцы, что позволяет прогнозировать получение лицевого кирпича марки М150 и выше. Согласно показателям прочности (при сжатии и изгибе) полученный керамический образец с добавками соответствует маркам 175 и 200. При испытании кирпича на морозостойкость повреждений не наблюдалось, керамические образцы выдержали 52 цикла замораживания-оттаивания, что соответствует марке по морозостойкости F50.

Микроструктура керамических образцов после обжига при температуре  $1000\text{—}1200^\circ\text{C}$  показана на рисунке.



**Микроструктура керамических образцов при температуре обжига ( $^\circ\text{C}$ ):**  
а — 1000; б — 1100; в — 1200

Отмечено вполне равномерное распределение сферических частиц алюмосодержащего отхода и частичное образование поликристаллических форм муллита в зоне их присутствия. Незначительное содержание стекловидных фаз и присутствие в структуре керамики мелких пор обусловлено выгоранием гидролизного лигнина. При увеличении температуры обжига до  $1100^\circ\text{C}$  количество стекловидной фазы значительно увеличилось, частицы алюмосодержащего отхода уплотнили ее и способствовали росту игольчатых муллитоподобных образований. Рост

температуры обжига до  $1200^\circ\text{C}$  привел к появлению дефектов в структуре керамического черепка, что свидетельствует о пережоге керамики.

### Заключение

По результатам теоретических и экспериментальных исследований установлено, что для улучшения сушильных и обжиговых свойств керамических масс на основе малопластичного глинистого сырья могут быть использованы техногенные отходы.

Расчетным способом определен состав керамической шихты, позволяющий достичь оптимальных технологических характеристик керамической смеси (глина/минеральная добавка/выгорающая добавка):  $70,7 \pm 0,5/23,5 \pm 0,5/5,8 \pm 0,5 \text{ масс. } \%$ , температура обжига  $1148^\circ\text{C}$ .

При добавлении в керамическую шихту минеральной и органической добавок показатели прочности (при сжатии и изгибе) и морозостойкости возрастают, а водопоглощение снижается. Полученные керамические образцы соответствуют марке по морозостойкости F50, по прочности — маркам 175 и 200, что в соответствии с требованиями ГОСТ 530 позволяет прогнозировать получение из данной керамической массы лицевого кирпича.

Исследование микроструктуры образцов керамического материала с модифицирующими добавками установило равномерное распределение сферических частиц алюмосодержащего отхода, незначительное содержание стекловидных фаз и мелких пор, обусловленных выгоранием органической добавки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Распоряжение Правительства РФ от 25.01.2018 № 84-р "Об утверждении Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/>
2. Боженов П. И., Глибина И. В., Григорьев Б. А. Строительная керамика из побочных продуктов промышленности. — М.: Стройиздат, 1986. — 136 с.
3. Шевченко В. Я. Введение в техническую керамику. — М.: Наука, 1993. — 123 с.
4. Макаров Д. В., Мелконян Р. Г., Суворова О. В., Кумарова В. А. Перспективы использования промышленных отходов для получения керамических строительных материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 5. С. 254—281.
5. Mymrine V. A., Alekseev K. P., Zelinskaya E. V., Tolmacheva N. A., Catai R. E. Industrial sewage slurry utilization for red ceramics production // Construction and Building Materials. 2014. V. 66. P. 368—374.
6. Ширинкина Е. С. Получение экологически безопасных строительных материалов с использованием осадков сточных вод целлюлозно-бумажного производства // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 4. С. 85—92. DOI: 10/25750/1995-4301-2018-4-085-092.
7. Кобелева Е. В. Оценка и пути улучшения качества исходной шихты для производства полнотелого керамического кирпича // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2017. № 1. С. 472—473.
8. Земцова Е. Г., Монин А. В., Смирнов В. М. и др. Формирование и механические свойства алюмоокислородной керамики на основе микро- и наночастиц оксида алюминия // Физическая мезомеханика. 2014. Т. 17. № 6. С. 53—58.
9. Минерально-сырьевые ресурсы в разрезе муниципальных образований Пермского края. — Пермь: Министерство природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Пермского края, 2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://priroda.permkrai.ru/mineral/МСВ\\_rei/](http://priroda.permkrai.ru/mineral/МСВ_rei/)

10. Мартынова А. А., Батракова Г. М. Оценка состава и микроструктуры алюмосодержащего отхода для обоснования направлений его использования // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 2. С. 62—69. DOI: 10.25750/1995-4301-2018-2-062-069.

11. Огрель А. С. Алюмосодержащие отходы как потенциальное сырье для производства промышленной продукции // Экологический вестник России. 2011. № 2. С. 36—40.

12. Анциферова И. В., Кульметьева В. Б., Порозова С. Е., Ряпосов И. В. Механическая активация ультрадисперсных порошков оксида алюминия и свойства корундовой керамики // Огнеупоры и техническая керамика. 2008. № 1. С. 29—32.

13. Абдрахимов В. З. Применение алюмосодержащих отходов в производстве керамических материалов различного назначения // Новые огнеупоры. 2013. № 1. С. 13—23.

14. Abdrakhimov V. Z., Abdrakhimova E. S. Promising use of waste coal in the production of insulating material without the use of traditional natural materials // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. V. 8. № 5. P. 788—794.

15. Волосатова К. А. Исследование возможности применения гидролизного лигнина в производстве стеновых блоков для малоэтажного строительства // Инженерный вестник Дона. 2018. № 3(50). С. 125.

## Recycling of industrial waste as additives for modification of low-plastic clay raw materials

G. M. BATRAKOVA, V. A. SHAMANOV, E. I. PANKOVA, A. E. SHCHENINA  
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

A. A. MARTYNOVA  
Joint-Stock Company "Research Institute of Polymer Materials", Perm, Russia

*The results of the study of the ceramic mass for the production of wall ceramics from low-plastic clay raw materials and the introduction of waste additives are presented.*

**Keywords:** waste recycling, secondary resources, clay, low-plastic clay raw materials, aluminum-containing waste, hydrolytic lignin.

Bibliography — 15 references.

Received June 28, 2021



УДК 666.691:669.86

DOI: 10.52190/2073-2589\_2021\_3\_19

## Вопросы экологического, экономического и практического рециклинга по использованию топливно-энергетического комплекса для получения теплоизоляционных материалов

А. В. БАЛАНОВСКАЯ, канд. эконом. наук

Самарский государственный экономический университет, г. Самара, Россия

Е. С. АБДРАХИМОВА, канд. техн. наук

Самарский университет (Национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева), г. Самара, Россия

*С применением отходов топливно-энергетического комплекса получены теплоизоляционные материалы, которые по теплотехническим характеристикам в зависимости от вида отхода относятся к группе высокой эффективности и к группе повышенной эффективности.*

**Ключевые слова:** экология, отходы топливно-энергетического комплекса, экономический аспект, практический аспект, теплоизоляционные материалы, экологическая безопасность.

### Экологические вопросы

Россию можно отнести к странам, которые являются экологически загрязненными, что отрицательно сказывается на качестве жизни и пагубно влияет на здоровье людей. Возникновение экологических проблем в России, как и в других странах, связано с чрезвычайно интенсивным влиянием человека на природу, которое с каждым годом приобретает все более агрессивный характер.

Значительные площади поверхности суши уже исключены из хозяйственной деятельности вследствие накопления на них промышленных отходов и невозможности использовать для жизнедеятельности районов, где ведутся разработка и добыча полезных ископаемых [1—3]. По оценке экспертов, всего в мире нарушено почти 2 млрд га почвенных ресурсов, что составляет около 22 % общего количества пахотных земель, пастбищ, лесов и лесных массивов [4—6]. Плодородные земли, как известно, восстанавливаются гораздо медленнее, чем лесные [4]. Необходимо отметить, что выбросы вредных веществ оказывают комплексное негативное воздействие не только на окружающую природную среду, но и на здоровье людей, проживающих на этой территории [4, 7].

Человечество в начале XXI века практически вышло за пределы возможностей планеты, так как загрязненная окружающая среда уже является ограниченным ресурсом наравне с трудом, капиталом и знаниями [8—11]. Технический прогресс во многом

облегчает жизнь человека благодаря новым полезным изобретениям. Однако последствия этого прогресса напрямую связаны с экологической обстановкой во всем мире [12—15].

Проблема рационального использования природных ресурсов в XXI веке не только не решена. Положение в экологии ухудшилось в связи с увеличением и так большого количества отходов, особенно топливно-энергетического комплекса [1, 3, 5]. Топливо-электроэнергетический комплекс является одним из основных загрязнителей окружающей природной среды. Это выбросы в атмосферу (48 % всех выбросов в атмосферу), сбросы сточных вод (36 % всех сбросов), а также образование твердых отходов (30 % всех твердых загрязнителей).

В законодательстве передовых стран Евросоюза, США, Канады, Австралии, Новой Зеландии понятие "окружающая среда" включает человека, природную среду, сооружения, транспортные средства и промышленные объекты. Поэтому в этих странах законодательство по окружающей среде рассматривает риски как для здоровья человека, так и для природной среды (собственно экологические риски) и все риски, связанные с промышленной деятельностью и промышленной продукцией, т. е. законодательство по экологической безопасности является неразрывной частью законодательства об окружающей среде и безопасность природной среды неотделима от безопасности человека, его жизни и здоровья [16—18]. В российском законодательстве произошло смещение в сторону рационального природопользования [19—21].

Под экологической безопасностью в первую очередь понимают защищенность окружающей природной среды, жизни и здоровья людей, подвергающихся вредным хозяйственным и иным действиям предприятий, приводящим к чрезвычайным ситуациям и катастрофам [22—24].

**Балановская Анна Вячеславовна**, доцент, доцент кафедры "Учет, анализ и экономическая безопасность".

E-mail: balanovskaya@mail.ru

**Абдрахимова Елена Сергеевна**, доцент, доцент кафедры "Химия".

E-mail: 3375892@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16 июня 2021 г.

© Балановская А. В., Абдрахимова Е. С., 2021

Ежегодно в России накапливается огромное количество отходов [23]. На их удаление и хранение затрачивается 8—10 % стоимости продукции [24].

Российские надзорные органы пока относятся довольно лояльно к образованию отходов, если они проходят утилизацию и обезвреживание по нормативам и правилам [25]. За рубежом образование каких-либо отходов в результате производственной деятельности считается большим технологическим недостатком. Загрязнение окружающей среды различными веществами, основными источниками которых являются промышленные предприятия, отрицательно сказывается на здоровье населения и является острой природоохранной проблемой [26—28]. Кроме того, добыча сырья не обходится без аварий, что сопровождается дополнительным загрязнением окружающей среды [25].

Рост антропогенного воздействия на компоненты окружающей среды указывает на необходимость создания эффективной системы управления, направленной на предупреждение, выявление действующего законодательства в области охраны окружающей среды и формирование социальной ответственности для обеспечения экологической безопасности.

Многими учеными мира установлено (данные разных ученых практически совпадают), что в начале XXI века на каждого жителя планеты добывается порядка 20 т/г. минерального сырья, но при этом менее 10 % сырьевых компонентов превращается в продукцию, а остальные 90 % переходят в отходы, которые представляют большую опасность для природной экосистемы Земли [29—32]. Многие из токсичных элементов в природных условиях находятся в малорастворимой форме или защищены от контакта с окружающей средой, но в процессе переработки такого сырья эти токсичные элементы переходят в растворимую, легко усваиваемую форму и представляют большую опасность для всего живого.

Из-за хищнического обращения с природой в ней обнаружили существенные негативные, часто необратимые сдвиги. Человечеству следует понять, что под действием антропогенных факторов природная ситуация катастрофически быстро меняется. Необходимо осознать себя активной частью природы, почувствовать единство с ней [33—35].

Под действием антропогенных факторов происходит смена биоценозов, которые связаны с генетическими изменениями в организмах животных и растений, концентрацией рассеянной энергии в виде теплового загрязнения, накоплением в биосфере газообразной, жидкой и твердой форм химикатов, пестицидов, тяжелых металлов и радиоактивных веществ.

Под антропогенным фактором понимают непосредственное воздействие человека на окружающую природную среду, приводящее к нарушению естественных экосистем. Практически любая территория при современном уровне развития промышленности и сельского хозяйства в большей или меньшей степени подвержена антропогенной нагрузке.

Действующая система экологического регулирования в России оторвалась от реального контекста, в котором должна существовать [29].

Многочисленные попытки исправить ситуацию привели к обратному эффекту [29]. В частности, "доход" от экологии для государственного бюджета напрямую зависит от того, сколько грязи выбрасывает предприятие в окружающую среду. Сам принцип "чем грязнее, тем лучше" мог бы работать, если бы собираемые с предприятий средства шли непосредственно на мероприятия по восстановлению нашей среды обитания. Однако это не так. Экологическая ситуация, по данным Минприроды России, с каждым годом ухудшается, количество и острота социальных конфликтов на экологической почве возрастают [29].

Согласно европейскому законодательству (Директива Европейского Парламента и Совета Европейского Союза 2008/98/ЕС) существует приоритетность методов управления отходами. Наиболее приемлемым вариантом утилизации отходов с сопутствующим повышением энергоэффективности композиционного производства является их переработка в целях повторного использования в качестве полученных продуктов [16, 36—38].

Знакомство с национальным проектом "Экология" и сопоставление его с накопленным в странах Евросоюза опытом в области управления природоохранной деятельностью со стороны административных органов власти позволяет отметить существенно меньший объем нормативной базы прямого действия, а также средств и систем контроля за ее выполнением [4]. Поэтому экологические проблемы при необходимой оценке эффективности работы всех отраслей с точки зрения баланса между массой полезного продукта и объемом полученных отходов не решаются.

Россия еще не готова к реализации циркулярной экономики замкнутого цикла с минимизацией использования природных ресурсов при создании всех видов товаров и услуг. Россия обязана включиться в принятую всеми экономически развитыми странами программу перехода от линейной экономики индустриальной эпохи к постиндустриальной циркулярной или с замкнутым циклом производства с включением переработки отходов в целях повторного их использования [4, 39—44]. Опыт передовых зарубежных стран показал техническую осуществимость этого направления и возможность применения его еще и как инструмента защиты природной среды от загрязнения. Вместе с тем из отходов или из отходов в комбинации с природным сырьем могут быть изготовлены практически все основные строительные материалы.

### Экономические вопросы

Постановка проблемы "экология и экономика" имеет явный подтекст невольного противостояния экономических устремлений человека и целей природы. С другой стороны, в самих терминах содержится их смысловое единство, так как оба названия имеют один корень — "экос" (дом) и рассматривают две стороны глобального обитания человека в пределах Земли. Одной из причин такого противостояния является ограниченность природных ресурсов, включая и естественные условия развития челове-

чества. Ограниченность природных ресурсов существенно воздействует на производительные силы общества и через них — на социальные и производственные отношения.

При ограниченном государственном финансировании геологоразведочных работ и истощении природных сырьевых ресурсов весьма важным является принятие оптимальных управленческих решений по выбору объектов первоочередного освоения. Сюда можно отнести использование отходов производств в качестве сырьевых материалов для изготовления строительных материалов [45, 46].

Вовлечение отходов производств в производство строительных керамических материалов исключает затраты на геологоразведочные работы, на строительство и эксплуатацию карьеров, освобождаются значительные земельные участки от воздействия негативных антропогенных факторов. Кроме того, стоимость сырьевых материалов (глинистых, отощителей и т. д.) для производства керамических материалов достигает 40—45 % [47—50]. Поэтому эффективным решением проблемы по снижению цены сырьевых материалов для производства керамических изделий является использование отходов производств.

Отходы топливно-энергетического комплекса целесообразно использовать в качестве выгорающих добавок, например вместо угля и антрацита. Выгорающие добавки вводят для повышения пористости керамического черепка и улучшения спекаемости глин [25—28] (например, буровой шлам Оренбургской области, нефтяной шлам Самарской области, отходы флотации углеобогащения горно-обогатительной фабрики (ГОФ) "Томусинская", шламы флотационного обогащения и т. д., т. е. те отходы, у которых теплотворная способность превышает 2000 ккал/кг). Исследования показали, что содержание углерода и теплотворная способность сланцевой золы определены согласно ГОСТ 147-84. В исследуемой золе  $C_a$  (углерода) 7,44 %, теплотворная способность 2200 ккал/кг. Для производства теплоизоляционных материалов, к которым относятся легковесный кирпич и пористый заполнитель, целесообразно использовать отходы топливно-энергетического комплекса, которые имеют повышенное содержание несгоревших остатков (углерода), что значительно сокращает потребность в топливе и исключает применение выгорающих добавок при обжиге керамических материалов.

В работах [29, 30] показано, что около 65—75 % золошлаковых материалов характеризуется высоким содержанием несгоревших остатков угля. Суммарное количество потребности всей керамической промышленности в топливе 50—60 %.

К теплоизоляционным материалам, теплопроводность которых не более 0,25 Вт/(м·°С), проявляется повышенный интерес, так как изменились нормативы по теплотехническим параметрам ограждающих конструкций. Тем не менее производство и потребление эффективных теплоизоляционных материалов в России гораздо меньше, чем в странах Европы и Северной Америке, несмотря на то что там во многих странах климат гораздо мягче.

Актуальные проблемы в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности в системах теплоснабжения обусловили принятие Государственной программы РФ "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 г.". Анализ мирового опыта в решении проблемы энергосбережения показывает, что экономия тепловой энергии является стратегической задачей государства. Использование эффективных легковесных кирпичей как стеновых материалов способствует сокращению потерь тепла в отапливаемых зданиях, значительно уменьшает расход топлива, что особенно актуально, так как в России третья часть теплоснабжения составляют потери [51—56]. Исследования показали, что в России на отопление жилой площади расходуется в 2—3 раза больше энергии, чем в странах Европы. Так, например, на индивидуальные жилые дома в России расходуется от 600 до 800 кВт/(м<sup>2</sup>·г.), в Германии — 250 кВт/(м<sup>2</sup>·г.), в Швеции — 139 кВт/(м<sup>2</sup>·г.). Использование теплоизоляционных материалов в индивидуальных домах значительно снизит потери тепла.

Использование теплоизоляционных материалов на основе отходов топливно-энергетического комплекса позволит значительно снизить расходы энергии на отопление жилой площади в России (с 600—800 до 250—300 кВт/(м<sup>2</sup>·г.)). В связи с этим оптимизация процесса распределения определенного лимита тепловых ресурсов за счет исключения потерь может стать одним из возможных решений данной проблемы.

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

**Цель работы** — получение экономически выгодного теплоизоляционного материала — легковесного кирпича на основе отходов топливно-энергетического комплекса.

## Практические вопросы

**Минерально-сырьевая база для строительных материалов.** Минерально-сырьевая база стройиндустрии складывается из двух блоков сырья: природного и техногенного (промышленные отходы) [12, 57—63]. По каждому блоку имеются свои проблемы, которые в конечном счете сказываются на качестве строительных материалов и стоимости.

За счет вовлечения промышленных отходов можно кардинально изменить параметры сырьевой базы России. Требуется менять подход к ней, отходя от классических рамок. Направления использования близких (подобных) химических и минеральных составов природного и техногенного сырья, позволяют рассматривать эти две группы сырья как единую сырьевую базу стройиндустрии. Только такое решение позволит выпускать требуемую (широкую) номенклатуру строительных материалов высокого качества. В то же время проектирование и производство новых

строительных материалов, а также известных материалов с новым диапазоном свойств возможно на современном уровне с использованием отходов производства.

Потребность в применении отходов производств в изготовлении строительных материалов сомнений не вызывает. Однако развитие практических основ по использованию отходов производств невозможно без создания глубокой теоретической базы, поиска альтернативных источников техногенного сырья и создания на его основе новых подходов к формированию структуры и свойств материала.

Углубленное изучение вопросов, связанных с использованием техногенного сырья, требует повышения образовательного уровня, высококвалифицированных специалистов и наличия лабораторной и производственной баз.

Необходимо разработать критерий оценки принадлежности природного и техногенного сырья для создания банка данных и определить приоритетные задачи в этой области науки [12].

Наиболее дешевым и доступным является использование отходов топливно-энергетического комплекса, повсеместно распространенного и постоянно возобновляемого, длительное хранение которого способствует попаданию вредных веществ и ионов тяжелых металлов в воду и почву [64—68].

Производство стеновых керамических материалов — одна из самых материалоемких отраслей народного хозяйства. Рациональное использование топлива,

сырья и других материальных ресурсов становится решающим фактором успешного развития данной отрасли в условиях проводимой экономической реформы. Применение в керамических материалах отходов производства приобретает особую актуальность [64—68].

**Результаты исследования.** К теплоизоляционным материалам относятся легковесный кирпич и пористые заполнители. На основе топливно-энергетического комплекса получены легковесные кирпичи без применения традиционных природных материалов.

**Сырьевые материалы.** Для получения легковесного кирпича в качестве глинистого компонента использовали межсланцевую глину (МГ) [21, 29, 44, 48, 69, 70]. МГ является отходом горючих сланцев и образуется при их добыче на сланцеперерабатывающих заводах (на шахтах). Химический состав МГ представлен в табл. 1, фракционный — в табл. 2, а технологические свойства — в табл. 3.

В качестве отошителей и выгорающих добавок для производства легковесного кирпича использовали отходы углеобогащения: К1 — отходы флотации углеобогащения фабрики "Томусинская" (ГОФ, Кемеровская область); К2 — угольные шламы флотационного углеобогащения "Обуховская" (ЦОВ, Ростовская область); К3 — отходы углеобогащения "Абашевская" (ЦОФ, Новокузнецк); К4 — отходы углеобогащения "Коркинский разрез" (ЦОФ, Челябинская область) [71—76].

Таблица 1

Химический состав компонентов

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

Примечание: п.п.п. — потери при прокаливании; R<sub>2</sub>O = Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O.

Таблица 2

Фракционный состав компонентов

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

Таблица 3

Технологические показатели компонентов

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



Отходы топливно-энергетического комплекса с повышенной теплотворной способностью ( $>1500$  ккал/кг; табл. 3) целесообразно использовать в качестве выгорающих добавок в производстве легковесного кирпича. К группе выгорающих добавок относятся различные виды твердого топлива, в частности антрацит, коксовая мелочь и т. д. Их вводят в состав шихты до 3—5 % по объему, т. е. до 60—80 % от общей потребности топлива на обжиг изделий [71—77].

**Получение легковесного кирпича.** Керамическую массу готовили пластическим способом при влажности 18—22 %. Из нее формовали кирпичи размером  $250 \times 120 \times 65$  мм [77]. Высушенные до остаточной влажности не более 5 % кирпичи обжигали в интервале температур 150—1100 °С. При содержании в отходах топливно-энергетического комплекса 20—30 % органики положительный эффект достигался добавкой в шихту не более 30 % отходов углеобогащения. При таких условиях исследуемые отходы способны заменить вводимый в шихту уголь, создать восстановительную среду в толще обжигаемого материала и при достаточном количестве в компонентах оксидов железа ( $> 3\% \text{ Fe}_2\text{O}_3$ ) перевести оксиды в закисные соединения, что способствует интенсификации процесса обжига. В табл. 4 приведены составы керамических масс, а в табл. 5 — физико-механические свойства легковесного кирпича при температуре обжига 1000 °С.

Таблица 4

Составы керамических масс

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

Таблица 5

Физико-механические показатели легковесного кирпича

Показатели	Составы			
	1	2	3	4
Предел прочности при сжатии, МПа	11,8	11,4	12,6	13,2
Предел прочности при изгибе, МПа	2,7	2,6	2,9	3,1
Пористость, %:				
– открытая	42,4	45,7	40,8	38,4
– закрытая	4,8	5,2	4,2	3,3
– общая	47,2	50,9	45	41,7
Морозостойкость, циклы	28	27	31	34
Усадка, %	7,3	7,4	7,5	7,3
Термостойкость, теплосмены	2	3	2	2
Плотность, кг/см <sup>3</sup>	1140	1130	1180	1250
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,19	0,18	0,20	0,23

Теплоизоляционный материал подразделяют в зависимости от плотности на три класса: А — от 700 до 1000 кг/м<sup>3</sup>; Б — от 1000 до 1300 кг/м<sup>3</sup>; В от 1300 до 1450 кг/м<sup>3</sup>. Как видно из табл. 5, все составы теплоизоляционного материала относятся к классу Б.

Согласно ГОСТа 530-2007 "Кирпич и камень керамические. Общие условия" теплотехнические харак-

теристики изделий оцениваются по коэффициенту теплопроводности в сухом состоянии  $\lambda$ , Вт/(м·°С): до 0,20 — группа высокой эффективности; от 0,20 до 0,24 — группа повышенной эффективности; от 0,24 до 0,36 — эффективные; от 0,36 до 0,46 — условно-эффективные; от 0,46 — малоэффективные (обычные).

Как видно из табл. 5, полученные легковесные кирпичи составов 1—4 по теплотехническим характеристикам относятся к различным группам: составы 1 и 2 — к группе высокой эффективности, 3 и 4 — к группе повышенной эффективности.

## Выводы

Российские надзорные органы относятся довольно лояльно к образованию отходов, тогда как за рубежом образование каких-либо отходов в результате производственной деятельности считается большим технологическим недостатком.

Россия еще не готова к реализации циркулярной экономики замкнутого цикла с минимизацией использования природных ресурсов при создании всех видов товаров и услуг. Россия обязана включиться в принятую всеми экономически развитыми странами программу перехода от линейной экономики индустриальной эпохи к постиндустриальной циркулярной или с замкнутым циклом производства с включением переработки отходов в целях повторного их использования.

В современных экономических условиях при ограниченном государственном финансировании геологоразведочных работ и истощении природных сырьевых ресурсов весьма важным является принятие оптимальных управленческих решений по выбору объектов первоочередного освоения. К таким объектам можно отнести использование в качестве сырьевых материалов отходов производств для изготовления строительных материалов.

Использование промышленных отходов в производстве строительных керамических материалов исключает затраты на геологоразведочные работы, на строительство и эксплуатацию карьеров, освобождаются значительные земельные участки от воздействия негативных антропогенных факторов. Кроме того, стоимость сырьевых материалов (глинистых, отощителей и т. д.) для производства керамических материалов достигает 40—45 %. Поэтому эффективным решением проблемы по снижению цены сырьевых материалов для производства керамических изделий является использование отходов производств.

Минерально-сырьевая база стройиндустрии складывается из двух блоков сырья: природного и техногенного (промышленные отходы). По каждому блоку имеются свои проблемы, которые в конечном счете сказываются на качестве строительных материалов и их стоимости.

За счет вовлечения промышленных отходов можно кардинально изменить параметры сырьевой базы России. Поэтому нужно менять подход к ней, отходя от классических рамок. Близкие (подобные) химический и минеральные составы природного и техногенного сырья, направления их использования позволя-

ют рассматривать эти две группы сырья как единую сырьевую базу стройиндустрии. Только такое решение позволит выпускать требуемую (широкую) номенклатуру строительных материалов высокого качества. В то же время проектирование и производство новых строительных материалов, а также известных материалов с новым диапазоном свойств возможно на современном уровне с использованием отходов производств.

Наиболее дешевым и доступным является использование отходов топливно-энергетического комплекса, повсеместно распространенного и постоянно возобновляемого. Топливо-электроэнергетический комплекс является одним из основных загрязнителей окружающей природной среды. Это выбросы в атмосферу (48 % всех выбросов в атмосферу), сбросы сточных вод (36 % всех сбросов), а также образование твердых отходов (30 % всех твердых загрязнителей).

Производство стеновых керамических материалов — одна из самых материалоемких отраслей народного хозяйства. Рациональное использование топлива, сырья и других материальных ресурсов становится решающим фактором ее успешного развития в условиях проводимой экономической реформы. В связи с этим применение в керамических материалах отходов производства приобретает особую актуальность.

С применением отходов топливно-энергетического комплекса получены теплоизоляционные материалы, которые по теплотехническим характеристикам в зависимости от вида отхода относятся к группе высокой эффективности и к группе повышенной эффективности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кайракбаев А. К., Абдрахимова Е. С. Рециклинг отходов топливно-энергетического комплекса, цветной металлургии и нефтехимической промышленности в производстве безобжиговых жаростойких бетонов // Экология промышленного производства. 2020. № 3. С. 5—12.
2. Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З. Кислотоупорные плитки из отходов черной и цветной металлургии Казахстана // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. 2020. № 1. С. 62—67.
3. Ильина Л. А., Абдрахимов В. З. Экологические и экономические аспекты использования в производстве строительных материалов отходов топливно-энергетического комплекса и их классификация. // Экологические системы и приборы. 2020. № 8. С. 28—44.
4. Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Использование алюмосодержащего техногенного сырья для получения высокопрочного сейсмостойкого кирпича на основе легкоплавкой глины Актюбинской области // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 11. С. 14—18.
5. Стеценко А. А., Абдрахимов В. З. Использование отходов топливно-энергетического комплекса и фосфорного производства в производстве керамического кирпича // Экология промышленного производства. 2020. № 3. С. 23—28.
6. Abdrakhimov V. Z., Abdrakhimova E. S. Oxidation Processes in the Firing of Porous Filler Based on Oil Production Wastes and Inter-shale Clay // ISSN 0040-5795, Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2020. V. 54. № 4. P. 750—755.
7. Абдрахимов В. З. Использование отходов углеобогащения в производстве легковесного кирпича способствует оптимизации землеустройства и кадастров // Экология промышленного производства. 2021. № 1. С. 2—7.
8. Ильина Л. А., Абдрахимов В. З. Использование отхода топливно-энергетической промышленности — золошлакового материала — в производстве пористого заполнителя на основе жидкостеклянной композиции // Экология промышленного производства. 2018. № 4. С. 16—18.
9. Абдрахимов В. З. Использование шламов флотационного углеобогащения в производстве пористого заполнителя на основе жидкого стекла // Экология промышленного производства. 2019. № 4. С. 25—29.
10. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Рециклинг отходов топливно-энергетического комплекса: нефтяного шлама и межсланцевой глины в производстве пористого заполнителя на основе жидкостеклянной композиции // Бурение и нефть. 2020. № 6. С. 42—49.
11. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Исследование фазового состава при различных температурах обжига керамического образца на основе ферропелли и межсланцевой глины // Химическая технология. 2021. Т. 22. № 1. С. 8—15.
12. Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З. Использование отходов цветной металлургии и топливно-энергетического комплекса в производстве сейсмостойкого кирпича снижает экологический ущерб водоемам и водостокам Самарской области // Эксперт: теория и практика. 2021. № 1. С. 25—37.
13. Абдрахимов В. З. Экологический менеджмент, экономические и практические аспекты использования отходов топливно-энергетического комплекса в производстве теплоизоляционных материалов // Основы экономики, управления и права. 2021. № 1. С. 11—16.
14. Абдрахимов В. З., Хабибулина Л. Е., Абдрахимов Д. В. Исследование регрессивным методом анализа влияния шлама от выплавки ферросплавов на физико-механические показатели керамического кирпича // Эксперт: теория и практика. 2020. № 6. С. 48—59.
15. Kairakbaev A. K., Abdrakhimova E. S., Abdrakhimov V. Z. Innovative Approaches to Using Kazakhstan's Industrial Ferrous and Nonferrous Tailings in the Production of Ceramic Materials // Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. 2020. V. 989. P. 54—61.
16. Абдрахимов В. З. Рециклинг отходов топливно-энергетического комплекса в производстве легковесного кирпича на основе глинистых материалов различного минерального состава // Экология промышленного производства. 2020. № 1. С. 11—16.
17. Kairakbaev A. K., Abdrakhimova E. S., Abdrakhimov V. Z. Use of Nonferrous Metallurgy Waste: Clayey Portion of the Zirconium Ore Gravity Tailings and Pyrite Cinders in Tile-Making: Materials Science Forum. — Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. 2020. V. 989. P. 47—53.
18. Абдрахимов В. З. Применение отходов флотационного обогащения антрацитов в производстве пористого заполнителя на основе жидкостеклянных композиций // Construction and Geotechnics. Пермский национальный исследовательский политехнический университет. 2020. Т. 11. № 1. С. 92—101.
19. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Школьное образование и экология // Вестник Прикамского социального института. 2019. № 2. С. 60—69.
20. Абдрахимов В. З., Лазарева Н. В. Использование шламовых металлургических отходов в производстве пористого заполнителя снижает загрязнение реки Самара и оптимизирует кадастры и землеустройство // Эксперт: теория и практика. 2020. № 5. С. 15—23.
21. Абдрахимов В. З. Экологические и технологические аспекты использования отходов горючих сланцев в производстве различных теплоизоляционных материалов // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 4. С. 24—29.
22. Абдрахимов В. З., Кайракбаев А. К. Экологический менеджмент. — Актобе: Учреждение Актыбинского университета им. академика С. Баишева, 2019. — 240 с.
23. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Использование техногенного сырья цветной металлургии в производстве керамических материалов без применения природного традиционного сырья // Экология и промышленность России. 2011. № 6. С. 49—51.
24. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Экологические аспекты использования отходов производств и классификация по пригодности для изготовления керамического кирпича // Экология и промышленность России. 2009. № 6. С. 41—43.
25. Абдрахимов В. З., Колпаков А. В. Аспекты использования отходов топливно-энергетического комплекса и химической промышленности в производстве керамического кирпича // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 1. С. 11—14.
26. Абдрахимов В. З., Кайракбаев А. К., Абдрахимова Е. С. Использование в производстве клинкерного кирпича отходов цветной металлургии и энергетики Восточного Казахстана // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 3. С. 4—18.
27. Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Исследование методом ЯГР-спектроскопии оксидов железа в кислотоупорных керамических материалах на основе отходов производства // Новые огнеупоры. 2020. № 3. С. 56—60.
28. Абдрахимова Е. С. Использование горелой породы и бурового шлама в производстве пористого заполнителя на основе жидкостеклянной композиции // Экологические системы и приборы. 2020. № 5. С. 12—23.

29. **Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С.** Снижение экологического ущерба экосистем за счет использования отходов горючих сланцев в производстве легковесного кирпича и пористого заполнителя // *Экологическая химия*. 2017. Т. 26. № 4. С. 190—197.
30. **Абдрахимов В. З.** Физико-химические исследования отходов цветной металлургии Восточного Казахстана — глинистой части "хвостов" гравитации циркон-ильменитовой руды // *Экологическая химия*. 2020. № 1. С. 49—58.
31. **Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С.** Структура пористости и технические свойства клинкерных материалов на основе отходов цветной металлургии Восточного Казахстана // *Стекло и керамика*. 2020. № 2. С. 44—45.
32. **Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С.** Влияние золы легкой фракции на технологические свойства шликера, пресс-порошка и физико-механические показатели // *Уголь*. 2020. № 4. С. 45—50.
33. **Абдрахимов В. З.** Вопросы экологии и утилизации техногенных отложений в производстве керамических композиционных материалов. — Самара: Самарская академия государственного и муниципального управления, 2010. — 160 с.
34. **Абдрахимов В. З.** Экологические и технологические принципы использования золошлакового материала и карбонатного шлама для производства высокомарочного кирпича в Самарской области. — Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2009. — 164 с.
35. **Абдрахимов В. З.** Концепция современного естествознания. — Самара: Самарский государственный экономический университет, 2015. — 340 с.
36. **Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З.** Влияние золошлакового материала "АО АКТОБЕ ТЭЦ" на предельное напряжение при сушке кирпича // *Уголь*. 2020. № 3. С. 76—81.
37. **Абдрахимов В. З.** Снижение экологического ущерба за счет использования отходов цветной металлургии и энергетики в производстве легковесных огнеупоров // *Экологические системы и приборы*. 2020. № 2. С. 23—34.
38. **Абдрахимов В. З.** Влияние нанотехногенного сырья на сушильные свойства и физико-механические показатели керамического кирпича // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2020. № 1. С. 29—34.
39. **Абдрахимов В. З.** Использование флотационного углеобогащения в производстве пористого заполнителя на основе жидкого стекла // *Экология промышленного производства*. 2019. № 4. С. 25—29.
40. **Абдрахимов В. З.** Влияние отходов производства минеральной ваты — диабазовой шихты на физико-механические показатели и фазовый состав керамического кирпича // *Изв. вузов. Строительство*. 2019. № 8. С. 37—44.
41. **Абдрахимов В. З.** Рециклинг отходов энергетики и цветной металлургии в производстве керамического кирпича способствует энергетической безопасности биосферы // *Биологическая совместимость: человек, регион, технологии*. 2019. № 3. С. 71—80.
42. **Абдрахимов В. З.** Влияние полевошлатового концентрата на фазовый состав плитки для полов на основе отходов цветной металлургии // *Изв. вузов. Строительство*. 2019. № 11. С. 33—42.
43. **Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С.** Использование отходов цветной металлургии и ортофосфорной кислоты в производстве жаростойкого бетона // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 2. С. 42—48.
44. **Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С.** Использование отходов горючих сланцев в производстве керамических материалов // *Экологическая химия*. 2021. № 1. С. 51—58.
45. **Абдрахимов В. З.** Технические свойства и структура пористости клинкерных материалов на основе отходов цветной металлургии Восточного Казахстана // *Химическая технология*. 2019. № 11. С. 499—506.
46. **Абдрахимов В. З.** Использование флотационного углеобогащения в производстве пористого заполнителя на основе жидкого стекла // *Экология промышленного производства*. 2019. № 4. С. 25—29.
47. **Шевандо В. В., Абдрахимов А. В., Вдовина Е. В., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С.** Использование золошлакового материала на основе бейделлитовой глины в производстве керамического кирпича // *Промышленное и гражданское строительство*. 2008. № 10. С. 46—47.
48. **Абдрахимов В. З.** Экономические и практические аспекты использования отходов горючих сланцев в производстве легковесного кирпича // *Экономика строительства*. 2020. № 1. С. 64—73.
49. **Вдовина Е. В., Шевандо В. В., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С., Абдрахимов А. В.** Промышленные отходы для керамического кирпича // *Жилищное строительство*. 2007. № 4. С. 31—33.
50. **Абдрахимов В. З.** Снижение экологического ущерба экосистемам за счет использования нанотехногенного шлама щелочного травления алюминия в производстве пористого заполнителя на основе жидкого стекла // *Экологические системы и приборы*. 2018. № 5. С. 45—53.
51. **Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С., Ковков И. В.** Технология керамических материалов. — Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2009. — 92 с.
52. **Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С., Ковков И. В.** Курс лекций по дисциплине "Технология керамических материалов". — Самара: ООО ЦПР, 2007. — 98 с.
53. **Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С.** Технология стеновых материалов и изделий. — Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2005. — 194 с.
54. **Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С.** Химическая технология керамического кирпича с использованием техногенного сырья. — Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2007. — 432 с.
55. **Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С.** Использование отходов топливно-энергетического комплекса в качестве выгорающих компонентов для снижения теплопроводности и теплоизоляционных материалов // *Изв. вузов. Строительство*. 2016. № 5. С. 46—47.
56. **Абдрахимов В. З., Никулина Е. Ю., Абдрахимова Е. С.** Инновационные направления по использованию отходов топливно-энергетического комплекса в производстве керамических материалов // *Изв. вузов. Строительство*. 2015. № 9. С. 24—27.
57. **Абдрахимов В. З.** Исследование предельного напряжения сдвига состава пиррофиллит — глинистый компонент — вода при повышенных температурах // *Новые огнеупоры*. 2019. № 7. С. 55—57.
58. **Кайракбаев А. К., Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З.** Экономические, экологические и практические аспекты использования горелых пород и бурового шлама в производстве пористого заполнителя // *Экология и промышленность России*. 2019. Т. 23. № 11. С. 26—31.
59. **Абдрахимов В. З.** Использование отхода обогащения угля и бейделлитовой глины в производстве пористого заполнителя на основе жидкостекольных композиций // *Изв. вузов. Строительство*. 2019. № 7. С. 25—34.
60. **Абдрахимов В. З.** Использование нефтяного шлама в производстве пористого заполнителя способствует развитию "зеленой" экономики и транспортно-логистической инфраструктуры // *Бурение и нефть*. 2019. № 11. С. 54—59.
61. **Абдрахимов В. З.** Использование обожженного солевого шлама для получения высокопрочного сейсмологического кирпича // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2019. № 5. С. 45—50.
62. **Абдрахимов В. З., Ильина Т. А.** Использование золошлакового материала в производстве пористого заполнителя способствует развитию "зеленой" экономики и транспортно-логистической инфраструктуры // *Уголь*. 2019. № 11. С. 59—63.
63. **Кайракбаев А. К., Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З.** Температурный коэффициент линейного расширения керамического материала на основе отходов цветной металлургии, глазури и ее механизм формирования в процессе обжига // *Стекло и керамика*. 2019. № 9. С. 45—50.
64. **Сафронов Е. Г., Сунтеев А. Н., Коробкова Ю. Ю., Абдрахимов В. З.** Экологические, экономические и практические аспекты использования многотоннажных отходов топливно-энергетического комплекса — сланцевой золы в производстве пористого заполнителя // *Уголь*. 2019. № 4. С. 44—49.
65. **Абдрахимов В. З.** Повышение экологической безопасности за счет использования золошлакового материала и отработанного катализатора в производстве керамического кирпича на основе бейделлитовой глины // *Биологическая совместимость: человек, регион, технологии*. 2019. № 2. С. 35—42.
66. **Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С.** Структура пористости пористого заполнителя на основе горелой породы, глиежий и жидкостекольных композиций // *Химическая технология*. 2019. Т. 20. № 8. С. 354—360.
67. **Abdrakhimov V. Z., Abdrakhimova E. S.** Study of the Distribution of Iron Oxides in Intershal Clay and Oil Sludge Porous Filler with Mossbauer Spectroscopy // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2019. V. 53. Iss. 4. P. 703—707.
68. **Абдрахимов В. З.** Использование золошлакового материала и нанотехногенного карбонатного шлама в производстве кирпича на основе бейделлитовой глины // *Строительство и реконструкция*. 2019. № 2. С. 81—89.

69. Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З. Использование замазученного грунта от нефтедобычи Актюбинской области в производстве легковесного кирпича на основе межсланцевой глины // Эксперт: теория и практика. 2021. № 1. С. 36—41.

70. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Сейсмостойкий кирпич на основе межсланцевой глины и алюмосодержащего шлака производства металлического хрома. // Новые огнеупоры. 2021. № 4. С. 53—57.

71. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Использование отходов углеобогащения в производстве теплоизоляционных материалов // Химия твердого топлива. 2012. № 2. С. 67—73.

72. Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З. Исследование керамического композиционного материала на основе бейделлитовой глины и золошлаковых отходов // Химия твердого топлива. 2012. № 3. С. 49—55.

73. Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З. Свойства конструкционно-изоляционных керамических материалов из смеси

межсланцевой глины и отходов флотационного обогащения антрацитов // Химия твердого топлива. 2014. № 5. С. 30—34.

74. Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З. Фазовый состав теплоизоляционных материалов, полученных из углеродосодержащих отходов // Химия твердого топлива. 2014. № 4. С. 52—58.

75. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Экологические, теоретические и практические аспекты использования шламов флотационного углеобогащения в производстве теплоизоляционных материалов // Кокс и химия. 2013. № 3. С. 39—44.

76. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Влияние отходов углеобогащения на тепломассообменные процессы при обжиге легковесного кирпича // Кокс и химия. 2011. № 2. С. 41—44.

77. Федоренко Р. В., Абдрахимов В. З. Использование отходов горючих сланцев для получения легковесного кирпича способствует в Самарской области развитию "зеленой" экономики и транспортно-логической инфраструктуре // Экологические системы и приборы. 2021. № 3. С. 16—27.

## Issues of environmental, economic and practical recycling for the use of the fuel and energy complex for the production of thermal insulation materials

A. V. BALANOVSKAYA

Samara State University of Economics, Samara, Russia

E. S. ABDRAKHIMOVA

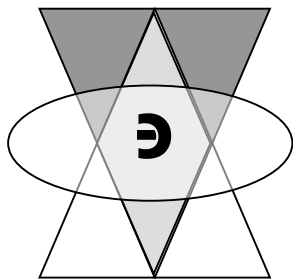
Samara University (National Research University named after the Russian Academy of Sciences) academician S. P. Korolev), Samara, Russia

*Heat-insulating materials were obtained with the use of waste from the fuel and energy complex, which, according to their thermal characteristics, depending on the type of waste, belong to the high-efficiency group and to the group of high-efficiency group.*

**Keywords:** ecology, waste of the fuel and energy complex, economic aspect, practical aspect, thermal insulation materials, environmental safety.

Bibliography — 77 references.

Received June 16, 2021



# Водоподготовка и водоочистка

УДК 663.18:579.695

DOI: 10.52190/2073-2589\_2021\_3\_27

## Рациональное количество биохимических стимуляторов для процесса очистки высококонцентрированных буровых сточных вод

Е. В. МАСЛЕННИКОВА; В. В. ЕРМАКОВ, канд. техн. наук

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет», г. Самара, Россия

*Представлен ресурсосберегающий метод определения рационального количества биохимических стимуляторов — пивной дробины (ПД) и ферментного препарата (ФП), позволяющий с максимальной эффективностью интенсифицировать очистку высококонцентрированных буровых сточных вод (БСВ) от минеральных примесей.*

**Ключевые слова:** ферментативная деструкция, отработанный буровой раствор, высококонцентрированные буровые сточные воды, полисахариды, пивная дробина, ферментный препарат, биохимические стимуляторы.

Нефтяная и газовая отрасли заинтересованы в высокой скорости утилизации образующихся при бурении отходов. При наклонно направленном бурении проблема очистки БСВ стоит особенно остро, поскольку необходимо в кратчайший срок утилизировать данный отход и провести рекультивацию выведенной среды из хозяйственного оборота земли. Полимерные реагенты стабилизируют коллоидно-дисперсную систему бурового раствора, что объясняет их широкое применение при приготовлении композиций буровых растворов [1].

В [2] была доказана эффективность применения таких биостимуляторов, как ПД и ФП, для интенсификации очистки высококонцентрированных БСВ, содержащих в своем составе полисахариды. Данные биостимуляторы путем инициации ферментативной деструкции полимерной матрицы ускоряют процесс осаждения минеральной части БСВ в шламовом амбаре, что позволяет существенно снизить время на разделение твердой и жидкой фаз данного отхода.

Данное исследование является логическим продолжением предыдущего [2] и ставит перед собой цель определить рациональное количество добавляе-

мых ФП и ПД, что позволит с максимальной эффективностью интенсифицировать очистку высококонцентрированных БСВ от минеральных примесей.

Высококонцентрированные БСВ — сложная по своим физико-химическим характеристикам система. Отдельный шламовый амбар имеет свою уникальную характеристику по химическому составу, физическим параметрам, содержанию нефтепродуктов, микроорганизмам и т. д. Однако поскольку лимитирующей скоростью осаждения минеральной части БСВ установлена скорость деполимеризации, основными факторами, влияющими на процесс интенсификации очистки БСВ, являются концентрация полисахаридов в данном отходе и количество добавляемых биостимуляторов.

Применяемые в композициях буровых растворов полисахариды имеют различное строение полимерной цепи. Функциональные группы и пространственное строение определяют реакционную способность и стабильность конкретного полимерного раствора [2]. На реакционную способность полимеров при химических превращениях существенное влияние оказывает стереоизомерия цепи, а также конформационный и надмолекулярный эффекты [3]. Первый связан с изменением конформации цепей в ходе химического превращения. При этом может изменяться доступность реагента к функциональным группам макромолекулы [3]. Реакция гидролиза некоторых полимеров может ускоряться за счёт разворачивания цепи в ходе реакции. Второй эффект обусловлен тем, что макромолекулы вступают во взаимодействие друг с другом и образуют агрегаты различной степе-

**Масленникова Елена Викторовна**, аспирант кафедры "Химическая технология и промышленная экология".

E-mail: levlen13@rambler.ru

**Ермаков Василий Васильевич**, доцент кафедры "Химическая технология и промышленная экология".

E-mail: wassiliy@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 29 декабря 2020 г.

© Масленникова Е. В., Ермаков В. В., 2021



ни сложности с различным временем жизни. Надмолекулярной структурой называется физическая структура полимеров, обусловленная различными видами упорядочения во взаимном расположении макромолекул. Наличие надмолекулярных образований приводит к уменьшению скорости диффузии низкомолекулярного реагента к функциональным группам полимера [3].

Непрерывно растет число новых модифицированных полимеров. В конкретном буровом растворе может присутствовать несколько полимерных соединений. Известны исследования эффектов парного воздействия полимеров в различных смесях на изменение структурно-реологических показателей технологических параметров буровых растворов [4].

Существенное влияние на вязкость растворов оказывают макромолекулы полисахаридов, свернутые в спираль [5]. Деструкция одного вида полисахарида из всей композиции инициирует разворачивание всей спирали. Логично предположить достаточно активное снижение вязкости сложных композиций буровых растворов даже при деструкции одного из нескольких видов полимеров. Мономеры, образовавшиеся после деполимеризации полисахаридов, более не способны поддерживать коллоидную систему. Они переходят в раствор, в то время как твердая фаза начинает активно осаждаться [4]. Изменение реакционной способности функциональных групп или звеньев под влиянием уже прореагировавшей группы, расположенной по соседству с данной, называется эффектом соседа. Влияние "соседей" вызывает изменение скорости и механизма реакций в полимерах. При этом скорость реакции может повышаться в  $10^3$ — $10^4$  раз [3]. Таким образом, даже если в БСВ присутствует полимер, не поддающийся деструкции с использованием выбранных биостимуляторов, вязкость стоков снижается за счет тех полисахаридов, которые деполимеризовались под действием ПД или ФП.

Производные целлюлозы, такие, как простые эфиры целлюлозы, в частности карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) и полианионная целлюлоза (ПАЦ), вследствие низкой токсичности и быстрой биодеструкции являются экологически безопасными и эффективными реагентами для систем буровых растворов на водной основе [6], что объясняет их популяр-

ность при приготовлении буровых растворов. Модифицированный крахмал, также ввиду своей доступности и свойств, улучшающих параметры бурового раствора, достаточно популярен. Гуаровая камедь широко применяется в области добычи нефти и газа [7], поскольку она предотвращает потерю воды из вязкого бурового раствора и хорошо суспензирует бентонитовую глину, используемую в буровом растворе.

## Материалы и методы

Экспериментальные исследования в рамках данной работы посвящены подбору рационального количества ПД и ФП к отходу с определенной концентрацией полисахаридов в своем составе.

Исследования проводили на модельных растворах полисахаридов, наиболее популярных при приготовлении буровых промывочных жидкостей: крахмала, КМЦ, ПАЦ, гуаровой камеди (табл. 1). При проведении экспериментов со смесью полисахаридов добавляли ксантановую камедь, которая не подвергается деструкции при использовании выбранных биостимуляторов.

Концентрация полисахаридов в БСВ зависит от их начальной концентрации в буровом растворе. Однако при бурении вязкость раствора снижается за счет частичного разрушения полимерной матрицы при осуществлении процесса, а также за счет наличия микроорганизмов-деструкторов полисахаридов. В связи с этим предлагается использовать вискозиметр, определяющий вязкость высококонцентрированных БСВ непосредственно в шламовом накопителе перед внесением биостимулятора.

Эффективность деполимеризации оценивали с помощью изменения условной вязкости растворов, влияющей на скорость осаждения частиц. Вязкость раствора при добавлении пивной дробины или ферментного препарата сравнивали с изменением вязкости исходного раствора с аналогичной концентрацией полисахарида. Условную вязкость модельных растворов полисахаридов определяли с помощью вискозиметра ВБР-2.

Время истечения жидкости определяли с помощью секундомера.

Таблица 1

Параметры эксперимента

Полисахарид	Концентрация в растворе, %	Количество экспериментов по каждому раствору
КМЦ	1; 2	3
ПАЦ	1; 2	3
Крахмал	1; 2	3
Гуаровая камедь	1; 2	3
Смесь полисахаридов + ксантановая камедь	0,1 (КМЦ); 0,1 (ПАЦ); 0,1 (крахмал); 0,1 (гуаровая камедь); 0,05 (ксантановая камедь) 0,2 (КМЦ); 0,2 (ПАЦ); 0,2 (крахмал); 0,2 (гуаровая камедь); 0,1 (ксантановая камедь)	3

Исходная пивная дробина представляла собой густую консистенцию грубоизмельченного зернового продукта со сроком хранения от одних суток до 3 месяцев (табл. 2).

Таблица 2

## Химический состав сырой пивной дробины

Усредненные показатели сырой дробины	Состав, %
Влажность, %	75
Сухие вещества, %	25
Органические вещества, г/кг	970
Протеин, г/кг	260
Клетчатка, г/кг	180
Жиры, г/кг	82
Зола, г/кг	40
БЭВ, г/кг	438

Состав ферментного препарата (продуцируемого микробной культурой *Trichoderma viride*): целлюлоза ( $2000 \pm 200$ ) ед./г; ксиланаза — до 8000 ед./г;  $\beta$ -глюканаза — до 1500 ед./г; глюкоамилаза — до 20 ед./г.

Рациональное количество устанавливали исходя из значения эффективности деполимеризации, достаточной для ускорения осаждения минеральной части БСВ (минимум 30 %), и экономически не обременительного количества биостимулятора.

## Результаты исследования

Усредненные результаты определения эффективности деполимеризации по каждой серии экспериментов представлены на рис. 1—4 и в табл. 3—6.

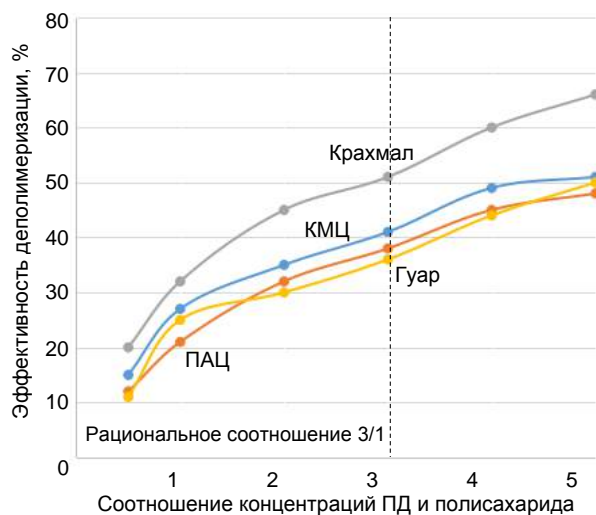


Рис. 1. Рациональное количество пивной дробины

Таблица 3

## Эффективность деполимеризации при использовании ПД (спустя 48 ч, %)

Биостимулятор/полисахарид	Соотношение концентраций в растворе					
	1/2	1/1	2/1	3/1	4/1	5/1
ПД/КМЦ	15	27	35	41	49	51
ПД/ПАЦ	12	21	30	38	45	50
ПД/крахмал	20	32	45	51	60	66
ПД/гуаровая камедь	11	25	30	36	44	50

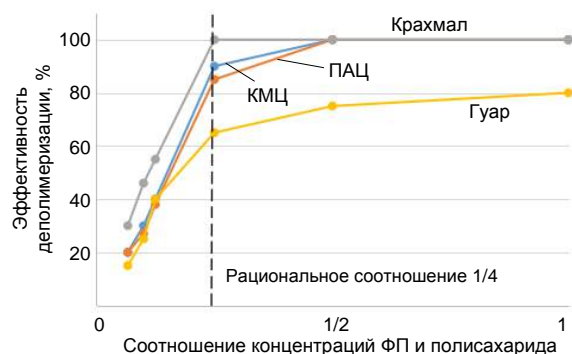


Рис. 2. Рациональное количество ферментного препарата

Таблица 4

## Эффективность деполимеризации при использовании ФП (спустя 20 мин, %)

Биостимулятор/полисахарид	Отношение концентраций в растворе					
	1/15	1/10	1/8	1/4	1/2	1/1
ФП/КМЦ	20	30	40	90	100	100
ФП/ПАЦ	20	27	38	85	100	100
ФП/крахмал	30	46	55	100	100	100
ФП/гуаровая камедь	15	25	40	65	75	80

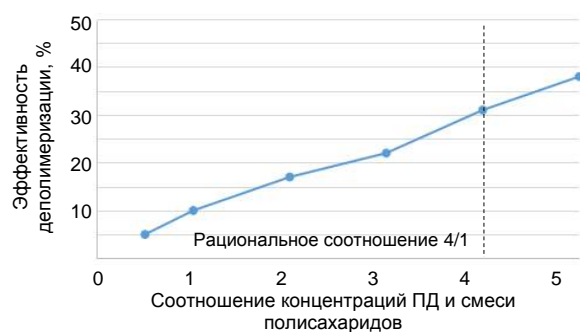


Рис. 3. Рациональное количество пивной дробины для смеси полисахаридов. Состав растворов: КМЦ (0,1 %); гуар (0,1 %); ПАЦ (0,1 %); крахмал (0,1 %); ксантан (0,05 %)

Таблица 5

## Эффективность деполимеризации раствора со смесью полисахаридов при использовании ПД (спустя 48 ч, %)

Соотношение концентраций в растворе					
1/2	1/1	2/1	3/1	4/1	5/1
5	10	17	22	31	38

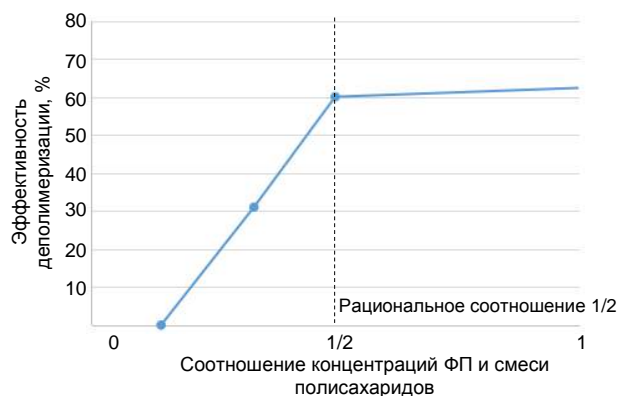


Рис. 4. Рациональное количество ферментного препарата для смеси полисахаридов

Таблица 6

Эффективность деполимеризации раствора со смесью полисахаридов при использовании ФП (спустя 80 мин, %)

Соотношение концентраций в растворе			
1/7	1/3	1/2	1/1
0	31	60	67

### Заключение

По итогам проделанной экспериментальной работы установлено рациональное количество биостимуляторов, добавляемых в шламовый амбар, способных с максимальной эффективностью интенсифицировать очистку высококонцентрированных БСВ от минеральных примесей. Данное исследование позволяет максимально просто в полевых условиях определять необходимое количество выбранного биостимулятора для конкретного стока, имеющего уникальные параметры вязкости, pH среды и концентрации полисахаридов и минеральных примесей.

Дальнейшие исследования связаны с экспериментами по определению совместного влияния биостимуляторов на интенсификацию очистки БСВ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолаева Л. В. Буровые растворы: учеб. пособие. — Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. — 60 с.
2. Масленникова Е. В., Ермаков В. В. Интенсификация очистки высококонцентрированных буровых сточных вод с использованием биохимических стимуляторов // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 9. С. 1274—1284.
3. Максина Е. В., Пименов А. А., Ермаков В. В., Быков Д. Е. Экспериментальная оценка возможности применения ферментативного обезвреживания отработанного бурового раствора // Нефтяное хозяйство. 2014. № 9. С. 125—127.
4. Куренков В. Ф. Химия высокомолекулярных соединений. Конспект лекций. — Казань: Редакция "Бутлеровские сообщения". 2004. С. 91—94.
5. Валиева О. И., Шарова О. Ю., Клеттер В. Ю., Мулюков Р. А., Борисов И. М. Исследование эффектов синергетического взаимодействия ксантановой и гуаровой смол в водных растворах // Вестник Башкирского университета. 2013. Т. 18. № 1. С. 52—55.
6. <https://burneft.ru/archive/issues/2019-03/18>
7. <http://www.pro-gas.org/2012/07/blog-post.html>

## A rational amount of biochemical stimulators for the treatment of highly concentrated drilling wastewater

E. V. MASLENNIKOVA, V. V. ERMAKOV

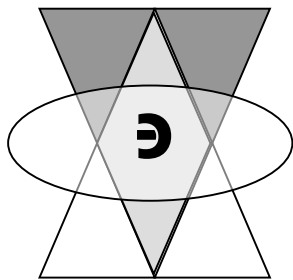
Samara State Technical University (SSTU), Samara, Russia

*This article presents a resource-saving method for determining the rational amount of biochemical stimulants — brewing waste (BW) and an enzyme preparation (EP), which allows to intensify the purification of highly concentrated drilling waste water (DWW) from mineral impurities with maximum efficiency.*

**Keywords:** enzymatic degradation, spent drilling mud, highly concentrated drilling waste water, polysaccharides, brewing waste, enzyme preparation, biochemical stimulants.

Bibliography — 7 references.

Received December 29, 2020



# Экологический контроль. Прогнозирование

УДК 004.9

DOI: 10.52190/2073-2589\_2021\_3\_31

## Автоматизация расчёта и отображения рисков для объектов котлонадзора

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

Институт информатики и математического моделирования — обособленное подразделение  
ФГБУ науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской  
академии наук», г. Апатиты, Мурманская обл., Россия

*Рассмотрены вопросы информатизации для одного из опасных сценариев — взрыва сосуда (котла, резервуара). Предложено автоматизировать процесс оценки риска с использованием геоинформационных технологий с применением программных средств с открытым исходным кодом.*

**Ключевые слова:** ГИТ, QGIS, промышленная безопасность, расчёты риска.

В соответствии с [1] оборудование, функционирующее под давлением более 0,07 МПа, идентифицирует опасный производственный объект. В качестве рабочей среды могут быть использованы пар, газ (в газообразном или сжиженном состоянии), вода при температуре более 115 °С и иные жидкости при температуре выше точки кипения.

Для указанных опасных объектов устанавливают следующие классы опасности:

- III класс для объектов теплоснабжения, а также иных объектов, на которых применяют оборудование под избыточным давлением 1,6 МПа и более (за исключением автозаправочных станций) или при температуре рабочей среды 250 °С и более;

- IV класс для иных опасных объектов.

К опасным производственным объектам не относятся работающие под давлением природного или сжиженного углеводородного газа до 0,005 МПа сети газораспределения и сети газопотребления.

Для газораспределительных станций и сетей устанавливают следующие классы опасности:

II класс для объектов, предназначенных для транспортировки природного газа под давлением

свыше 1,2 МПа или сжиженного углеводородного газа под давлением свыше 1,6 МПа;

- III класс для объектов, предназначенных для транспортировки природного газа под давлением от 0,005 до 1,2 МПа или сжиженного углеводородного газа под давлением от 0,005 до 1,6 МПа.

Планирование борьбы с авариями осуществляется посредством разработки и утверждения планов мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах. Порядок разработки планов и требования к содержанию этих планов устанавливает Правительство Российской Федерации.

### Анализ аварийности и травматизма при эксплуатации российских опасных производственных объектов (2016—2020 гг.), на которых используется оборудование

Основными травмирующими факторами являются термический ожог (60 % случаев), механическое воздействие оборудования (20 %), воздействие взрывной волны (16 %), асфиксия (4 %) [2].

Более половины (52 %) из общего числа аварий зафиксировано при эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды. При этом следует отметить, что количество технических устройств данного вида (около 55000 единиц) гораздо меньше количества паровых и водогрейных котлов (около 78000 единиц, 13 % аварий), а также сосудов, работающих под давлением (более 325000 единиц, 35 % аварий).

---

**Шемякин Алексей Сергеевич**, младший научный сотрудник.

E-mail: shemyakin@iimm.ru

**Шестаков Алексей Владимирович**, стажёр-исследователь.

E-mail: shestakov@iimm.ru

**Яковлев Сергей Юрьевич**, старший научный сотрудник.

E-mail: yakovlev@iimm.ru

Статья поступила в редакцию 29 апреля 2021 г.

© Шемякин А. С., Шестаков А. В., Яковлев С. Ю., 2021

Анализ основных причин аварий и несчастных случаев показывает, что с эксплуатационными дефектами оборудования связано 15 % происшествий. При этом более половины из них произошло по причине низкого качества проведения обслуживания, освидетельствования, диагностирования и экспертизы промышленной безопасности оборудования.

Таким образом, задача оценки и снижения рисков для оборудования, работающего под избыточным давлением, весьма актуальна. Одним из перспективных направлений её решения является использование современных информационных технологий. Далее рассматриваются вопросы информатизации для одного из опасных факторов — воздействия взрывной волны.

Основное содержание статьи разбито на две части. В первой приводится обзор существующих подходов к оценке риска воздействия взрывной ударной волны, анализируется программное обеспечение, используемое для этих целей. Во второй части предлагается авторский подход к оценке последствий на основе геоинформационных технологий. В заключении сформулированы основные выводы.

### **Существующие подходы к оценке последствий воздействия взрывной волны**

В задачах, связанных с анализом и оценкой аварийных ситуаций в случаях взрыва газопроводов, газгольдеров и прочих резервуаров со сжатым газом или взрывоопасными веществами и распространением взрывной ударной волны, используют разные методики и технологии. В большинстве случаев для этих нужд применяют программное обеспечение фирмы Ansys: Ansys Fluent, Ansys Autodyn, Ansys Flotran-fluid.

В работе [3] при помощи Ansys Fluent смоделирована и проанализирована аварийная ситуация в виде разрыва в газопроводе с высоким давлением, проводящим метан. В ходе численного эксперимента выделены зона, опасная для человека и животных, а также границы области поражения в случае взрыва газа (метана).

Наряду с Fluent для моделирования воздействия ударной волны широко применяют Ansys Autodyn. Данный модуль также используют при анализе и оценке аварийных ситуаций с котлами, газопроводами, моделировании ударных волн и их воздействия на окружающие объекты (здания, хозяйственные постройки и т. д.).

Например, Fluent использовали при моделировании ударной волны в работе [4], в которой главной задачей являлся анализ ударно-волновой структуры, возникающей в результате взрыва. Из встроенной библиотеки материалов и их свойств для моделирования взрыва в качестве активного было выбрано вещество C4.

В [5] при помощи Ansys Autodyn разработана и описана технология для задач, связанных с расчётом взрывной нагрузки на строительные конструкции. Похожая ситуация рассмотрена в [6], где численно исследованы гофрированные сэндвич-панели с наполнителем из поливинилхлорида (ПВХ) с гофри-

рованным сердечником, подвергшиеся воздушному взрыву, а также оценены динамические характеристики панелей, подвергшихся взрывной нагрузке.

В [7] при помощи модуля LS-DYNA программного комплекса Autodyn исследованы напряжённо-деформированные состояния и предельная взрыво-сопротивляемость образцов из стеклопластика в условиях подводного взрыва различной мощности. Стоит отметить работу [8], где при помощи LS-DYNA смоделировано воздействие ударной волны на железобетонную плиту.

В [9] выполнено численное моделирование распространения воздушной ударной волны, вызванной взрывом. Рассмотрено два условия взрыва: взрыв непосредственно над землёй и взрыв, произведённый в воздухе. Основное моделирование осуществлялось при помощи комплекса LS-DYNA.

Также можно отметить родственное исследование [10], где произведёно рассмотрение методов моделирования взрывной ударной волны (ВУВ) с использованием газодинамики. Методы моделирования рассматривались в целях анализа действия ВУВ на здания. Численное моделирование производилось в программном комплексе LS-DYNA.

Ещё одним примером применения пакета Ansys является исследование [11], где при помощи модуля Flotran-Fluid представлено численное моделирование процесса распространения акустического импульса в слое атмосферы высотой вплоть до 200 км и исследованы основные этапы эволюции акустической волны по мере её распространения над эпицентром возмущения. В работе исследован непосредственно процесс распространения ударной волны, воздействие на объекты окружающей среды не рассматривается.

Упомянутые работы показывают, что когда дело касается изучения динамики распространения ударных волн, в большинстве случаев используются программные средства семейства Ansys. Однако в некоторых случаях применяют и альтернативные программные средства. Например, в [12] для оценки воздействия взрывной волны на геодезическую оболочку использовали программный комплекс Dytran, при помощи которого оценивали прочность и устойчивость конструкции.

В исследованиях [1—12] изучались механизмы воздействия ударной волны на различные объекты как таковые, в отрыве от задач, которые нужно решать в сфере промышленной безопасности. В этом смысле можно выделить работы [13, 14], где оценка воздействия взрывных волн на объекты окружающей среды рассматривали в контексте промбезопасности.

Так, в исследовании [13] авторы рассматривали методики по оценке результата действия воздушной ударной волны на здания. Расчёт производили на основе метода конечных элементов с использованием частей методики, описанной в приказе МЧС России № 404 от 10.07.2009 г. "Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах". Рассмотрены два сценария: взрыв во внутреннем пространстве резервуара и воспламенение горючего газа на открытом пространстве. Далее даны характеристики ВУВ и её поражающие свойства.



В [14] представлена проблема моделирования газового взрыва и рассмотрены характеристики распространения ВУВ при разном уровне заполненности пространства вокруг эпицентра взрыва. В качестве примера смоделирован взрыв смеси метана с воздухом в замкнутом пространстве. Проведено сравнение результатов, полученных численным экспериментом и рекомендуемыми методиками РД 03-409-01, руководством РБ Г-05-039-96, а также выявлена погрешность между ними. Смоделирован взрыв смеси метана с воздухом в захламлённом пространстве. Расчёты для анализа производили в программе AutoReaGas.

Данный обзор не претендует на полноту, однако позволяет сделать некоторые выводы относительно текущего состояния дел в сфере автоматизации расчёта и отображения рисков при оценке последствий взрывов сосудов, работающих под избыточным давлением (СПД). Основная часть работ посвящена изучению непосредственно воздействия ВУВ на конкретный объект, без учёта рельефа прилегающей местности и окружающей обстановки. Более того, практически во всех рассмотренных работах (за исключением [11]) воздействие ВУВ оценивалось локально. Для решения задач промышленной безопасности этого недостаточно. Например, при составлении паспортов безопасности опасных промышленных объектов требуется рассчитать риски поражения объектов, расположенных на некотором удалении от эпицентра взрыва, и рекомендуется использовать соответствующие методики. С учётом потенциальной обширности зон поражения использование упомянутых методик зачастую является нецелесообразным.

При решении задач оценки риска на значительных площадях (масштаба промплощадки и прилегающей местности) удобно использовать геоинформационные технологии. В данной работе рассмотрен предложенный авторами подход, позволяющий использовать геоинформационные системы с открытым исходным кодом для оценки зон поражения взрывной волной, — на примере взрыва котла, используемого для теплоснабжения промышленной площадки пищевого предприятия.

#### Применение геоинформационных систем для оценки зон поражения взрывной волной

В качестве платформы, используемой для автоматизации расчётов зон поражения, авторы предлагают Quantum GIS (QGIS) [15]. В данной системе требуемый функционал можно получить за счёт подключаемых модулей расширения. За счёт открытости платформы такие модули можно разрабатывать самостоятельно.

Для расчёта зон поражения в качестве методической базы предлагается использовать РБ Г-05-039-96 (РБ05, Руководство) [16]. В этом руководстве исходными данными является давление в сосуде, находящемся под избыточным давлением, а основным параметром, который определяет степень поражения, — величина избыточного давления на переднем фронте взрывной ударной волны.

В самом РБ05 приводятся функциональные зависимости избыточного давления от расстояния до точки, в которой нужно оценить степень поражения, и давления в сосуде. Однако все зависимости приведены на графиках, табличные данные отсутствуют, а для нужд автоматизации расчётов эти графики не подходят. В связи с этим необходимо было преобразовать графические зависимости в аналитический вид. Путём интерполяции получены функции для различных величин давления в сосудах. Например, для давления в 15 кгс/см<sup>2</sup> при расчетах зависимости избыточного давления на фронте ударной волны от расстояния до СПД использовалась следующая функция:

$$\frac{\Delta P_{\Phi}}{P_0} = -0,3005 + \frac{7,8942}{x},$$

где  $\Delta P_{\Phi}$  — величина избыточного давления на переднем фронте ВУВ;

$P_0$  — атмосферное давление;

$x$  — расстояние между СПД и точкой, в которой необходимо оценить степень поражения ВУВ.

QGIS предлагает разработчикам модулей расширения обширный API, при помощи которого можно взаимодействовать с самой геоинформационной платформой. В частности, для автоматизации расчётов зон поражения в данном исследовании использованы следующие объекты, методы и интерфейсы:

- `QgsVectorLayer` для работы с конкретным слоем проекта QGIS (электронной картой) [17]. Метод `getFeature` используется для получения доступа к конкретному объекту, расположенному на соответствующем слое карты, метод `addFeature` — для добавления объектов на слой карты.
- `QgsProject`. При помощи метода `addMapLayer` [18] в проект добавляется слой, на котором впоследствии отображаются зоны поражения.
- `QgsGeometry` для формирования геометрии (контуров, формы, заливки) объекта на карте QGIS [19]. В данном случае под геометрией понимается контур зоны поражения.

В общих чертах алгоритм построения зон поражения на электронной карте показан на рис. 1.

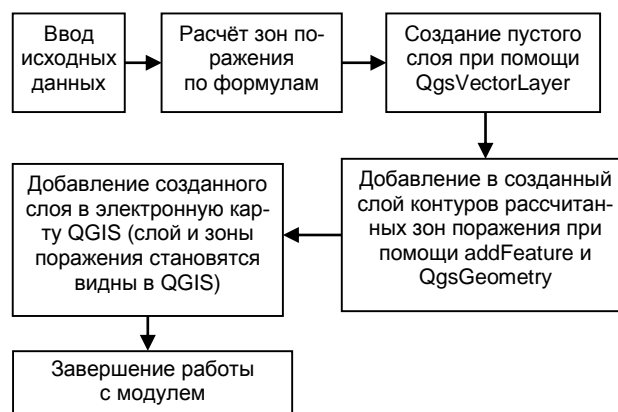


Рис. 1. Общий алгоритм работы модуля расширения

Модули расширения для QGIS можно создавать как на языке программирования C++, так и на Python. Однако в силу того, что сама геоинформационная система написана преимущественно на Python, рекомендуется использовать именно этот язык. Интерфейс модулей расширения рекомендуется создавать при помощи Qt Designer [20]. Также полезным будет модуль расширения QGIS Plugin Builder [21], при помощи которого создают шаблоны исходных кодов для разрабатываемого модуля.

С использованием упомянутого инструментария (модули расширения, средства разработки, программные интерфейсы) авторами разработан модуль расширения QGIS, позволяющий рассчитывать зоны поражения ВУВ на основе РБ05 и визуализировать их на электронной карте. Внешний вид диалоговых окон разработанного модуля и результатов его работы показан на рис. 2. На программную разработку получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [22].

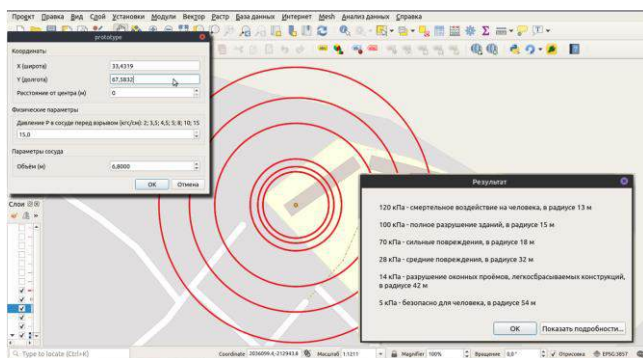


Рис. 2. Результаты работы модуля

### Заключение

Рассмотрены существующие подходы к оценке последствий воздействия взрывной волны на окружающую технологическую среду. Большинство исследований направлено на изучение непосредственно механики воздействия взрывной ударной волны на тот или иной объект. Подобные подходы, несомненно, могут довольно точно оценивать последствия разрушений, однако для нужд промышленной безопасности эти методы слабо применимы. Практически во всех рассмотренных случаях изучались локальные воздействия взрывной волны, в то время как при оценке риска взрыва сосуда, работающего под избыточным давлением, требуется оценить последствия на довольно большой площади (для большого объема). Использование указанных подходов в таких ситуациях будет чрезмерно трудозатратным и нецелесообразным.

Авторы предлагают автоматизировать процесс оценки риска при помощи геоинформационных технологий с применением программных средств с открытым исходным кодом. На основе руководства по анализу опасности аварийных взрывов РБ Г-05-039-96 разработан модуль расширения, позволяющий автоматизировать расчёт и построение зон поражения взрывной волной в результате взрыва сосуда, работающего под избыточным давлением.

Предложенный подход позволяет на основе небольшого количества исходных данных провести оценку потенциальных разрушений на значительной территории, что существенно упрощает решение задачи оценки риска при взрывах сосудов, работающих под избыточным давлением.

Предложенная методика успешно апробирована на одном из пищевых предприятий Мурманской области.

*Работа выполнена в рамках темы госзадания № 0226-2019-0035 "Модели и методы конфигурирования адаптивных многоуровневых сетевых систем управления региональной безопасностью в Арктической зоне Российской Федерации".*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон № 116-ФЗ от 20.06.1997 "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" (ред. 08.12.2020).
2. Состояние аварийности и травматизма при эксплуатации опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gosnadzor.ru/industrial/equipment/Analysis/> (дата обращения: 12.03.2021).
3. Варсегов А. В., Варсегова Е. В. Зоны поражения при аварийной разгерметизации газопровода // Изв. Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 4(50). С. 288—296.
4. Кочепанова М. Н., Босов В. Д. Опыт определения взрывной нагрузки с использованием современных программных комплексов и методик расчета // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2017. Т. 1. С. 134—140.
5. Вальгер С. А., Данилов М. Н., Федорова Н. И., Федоров А. В. Сравнение данных моделирования ударно-волнового воздействия на сооружения с использованием ПК Ansys, Autodyn и Ls-dyna // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 11(671). С. 77—92.
6. Alogla A., Helal M., ElShafey M. M., Fathallah E. Numerical Analysis for Critical Structures Protection against Blast Loading Using Metallic Panels // Applied Sciences. 2020. № 10(6). P. 2121. <https://doi.org/10.3390/app10062121>
7. Дульнев А. И., Неклюдова Е. А., Вайс И. Ю. Взрывосопротивляемость полимерных композиционных материалов при неконтактном подводном взрыве // Тр. Крыловского государственного научного центра. 2017. № 2(380). С. 54—64.
8. Герцик С. М., Новожилов Ю. В., Михалюк Д. С. Численное моделирование динамики и прочности железобетонной плиты под воздействием воздушной ударной волны // Вычислительная механика сплошных сред. 2020. Т. 13. № 3. С. 298—310.
9. Мкртычев О. В., Савенков А. Ю. Численное моделирование фронта воздушной ударной волны при взрыве в воздухе и над землей в программном комплексе Ls-dyna // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 6. С. 467—474.
10. Мкртычев О. В., Савенков А. Ю. Методы моделирования фронта воздушной ударной волны для расчета промышленного сооружения // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 2. С. 223—234.
11. Лебедев С. В., Павлов В. А. Компьютерное моделирование воздействия землетрясений и мощных взрывов на атмосферу // Вестник СПбГУ. Сер. 4. Физика. Химия. 2009. № 2. С. 53—62.
12. Лахов А. Я., Супрун А. Н. Компьютерное моделирование взрывных воздействий на геодезические оболочки // Приволжский научный журнал. 2018. № 4(48). С. 9—14.
13. Рыбаков А. В., Иванов Е. В., Лебедев А. Ю. Варианты оценки защищенности зданий при аварийных взрывах // Энергетическая политика. 2020. № 1(143). С. 88—95.
14. Дульнев А. И., Чижевский В. В. Моделирование газового взрыва и оценка влияния на его параметры загроможденности пространства // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. 2011. № 60(344). С. 23—34.
15. QGIS. A Free and Open Source Geographic Information System [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.qgis.org/en/site/> (дата обращения: 12.03.2021).

16. РБ Г-05-039-96 Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия. Утв. постановлением Госатомнадзора России № 100 от 31.12.1996.

17. QgsVectorLayer Class Reference [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://qgis.org/api/classQgsVectorLayer.html> (дата обращения: 12.03.2021).

18. Class: QgsProject [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://qgis.org/pyqgis/3.4/core/QgsProject.html> (дата обращения: 12.03.2021).

19. QgsGeometry Class Reference [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://qgis.org/api/classQgsGeometry.html> (дата обращения: 12.03.2021).

20. What is Qt Designer? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://build-system.fman.io/qt-designer-download> (дата обращения: 12.03.2021).

21. QGIS Plugin Builder [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://g-sherman.github.io/Qgis-Plugin-Builder/> (дата обращения: 12.03.2021).

22. Шестаков А. В., Шемякин А. С., Яковлев С. Ю. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664449 от 13.11.2020. Федеральная служба по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ) "Программа расчёта и визуализации риска для сосудов под давлением".

## Automation of risk calculation and display for boiler facilities supervision

A. S. SHEMYAKIN, A. V. SHESTAKOV, S. Yu. YAKOVLEV

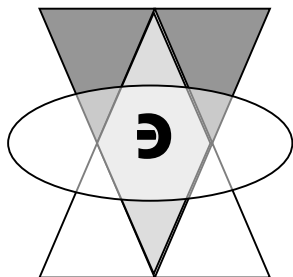
Institute for Informatics and Mathematical Modeling — Subdivision of the Federal Research Centre  
"Kola Science Centre of the RAS", Apatity, Murmansk region, Russia

*This article discusses issues of informatization for one of dangerous scenarios — explosion of a vessel (boiler, reservoir). The authors propose to automate the risk assessment process using geoinformation technologies with open source software.*

**Keywords:** geoinformation technologies, QGIS, industrial safety, risk assesment.

Bibliography — 22 references.

Received April 29, 2021



# Очистка промышленных газовых выбросов

УДК 621.431.36: [621.43.057+621.365.29]  
DOI: 10.52190/2073-2589\_2021\_3\_36

## Система снижения оксидов азота в отработавших газах

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

*Представлена концепция установки для максимального снижения содержания вредных оксидов азота в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания и промышленных энергоустановок с помощью высокотемпературного разряда.*

**Ключевые слова:** вредные выбросы, оксиды азота, углекислый газ, кислород, высокотемпературный разряд.

В последнее время активно происходит борьба с вредными выбросами, в том числе образующимися в процессе горения. Это касается двигателей внутреннего сгорания (ДВС), котельных, производственных предприятий и т. д. Основными продуктами процесса горения являются  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_4$ . Одним из способов снижения вредных выбросов служит переход на альтернативные виды топлива, к примеру природный газ, углеводородный газ, синтез-газ, биоэтанол, однако во всех них присутствует углерод. Если использовать неуглеродное топливо, к примеру водород, то образования углеродных выбросов можно избежать, в отличие от  $\text{NO}_x$  [1–6]. Оксиды азота ( $\text{NO}_x$  означает неопределенную смесь  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ ) образуются в основном из  $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$  при высокотемпературном сгорании топлива. Оксид  $\text{NO}_x$  вызывает красно-коричневую дымку в городском воздухе. Он создает проблемы с сердцем и легкими и может быть канцерогенным. Оксиды азота также способствуют возникновению кислотных дождей, поскольку они соединяются с водой с образованием азотной ( $\text{HNO}_3$ ) и других кислот. К естественным источникам оксидов азота относятся те, которые образуются в процессе метаболизма определенных почвенных бактерий [7]. Для уменьшения выбросов используют каталитические нейтрализаторы.

Авторами предложен способ, позволяющий избежать образования  $\text{NO}_x$ : замена воздуха, используемого для окисления топлива и последующего горения, на смесь углекислого газа и кислорода. Подобные исследования уже ведутся учеными. Они используют окислитель  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  для промышленных печей, газовых горелок и т. д., однако в основном применяют чистый кислород, не отделяя его от углекислого газа.

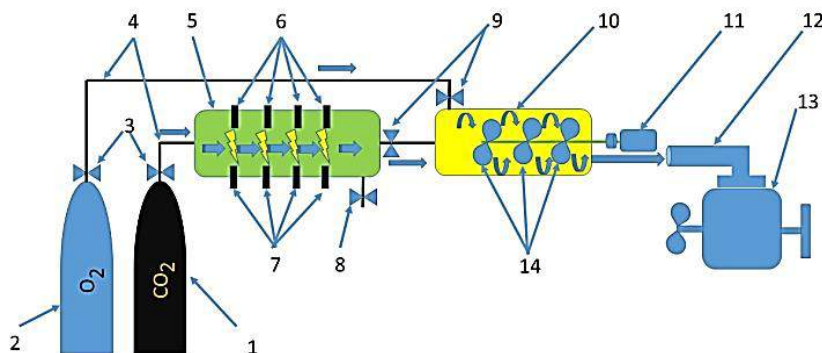
## Материалы и методы

Как известно, чистый кислород взаимодействует с углеводородными топливами и маслами очень активно, что приводит к самовоспламенению. Поэтому подавать в камеру сгорания чистый кислород опасно. Исходя из этого авторами было решено снизить концентрацию кислорода до приемлемой за счет углекислого газа. Более того, было решено отделить кислород от углерода посредством высокотемпературного разряда. Так как молекулярная связь кислорода с углеродом очень сильна, порвать цепь можно за счет очень высокой температуры. Российскими и японскими учеными проведен эксперимент по расщеплению углекислого газа. Его облучали плазмой разряда гиротрона, стреляющего мощным электромагнитным излучением [8]. Однако данное оборудование экспериментальное и широко не применяется. Авторская концепция установки предполагает более широкое применение. Принципиальная схема установки, позволяющей отказаться от использования воздуха в качестве окислителя, представлена на рисунке.

**Овчинников Евгений Валентинович**, научный сотрудник лаборатории "Двигатели и ходовые системы".  
E-mail: evo-xpro-info@yandex.ru  
**Уюттов Сергей Юрьевич**, младший научный сотрудник.  
E-mail: s\_ujutov@mail.ru  
**Крючков Виталий Алексеевич**, ведущий научный сотрудник.  
E-mail: kryuchkov.vitaliy@gmail.com

Статья поступила в редакцию 19 июня 2021 г.

© Овчинников Е. В., Уюттов С. Ю., Крючков В. А., 2021



**Принципиальная схема установки с высоковольтным разрядом:**

- 1 — баллон с CO<sub>2</sub>; 2 — баллон с O<sub>2</sub>; 3 — запорная арматура баллонов с O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>; 4 — газопроводы;  
 5 — камера для расщепления CO<sub>2</sub>; 6 — катоды; 7 — аноды; 8 — запорная арматура для стравливания;  
 9 — регулировочный клапан подачи O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>; 10 — камера для перемешивания O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>; 11 — электродвигатель;  
 12 — впускной коллектор ДВС; 13 — ДВС; 14 — вентиляторы для смешивания газа

Система работает следующим образом. Из баллона с углекислым газом по магистрали газ поступает в камеру, в которой установлены аноды и катоды на пути следования газа. Между анодом и катодом происходит высоковольтный разряд, обладающий высокой температурой (порядка  $10^4$  K). Воздействие высокой температуры на газ позволяет частично разорвать соединение CO<sub>2</sub> на углерод и кислород. Количество разорванных связей зависит от проходного сечения, скорости потока газа, площади и частоты разряда и количества пар анод—катод. Далее по магистрали смесь газов попадает в смесительную камеру, в которую также поступает чистый кислород. В зависимости от концентрации кислорода в смеси с углекислым газом количество подаваемого кислорода меняется. В смесительной камере установлены вентиляторы, которые вращаются за счет электропривода и обеспечивают равномерное смешивание углекислого газа с кислородом, образуя карбоген. После смесительной камеры смешанные газы поступают во впускной коллектор ДВС и осуществляют окисление топлива с последующим горением. На двигателе также можно устанавливать систему рециркуляции отработавших газов, которая позволит повторно направлять отработавшие газы в камеру сгорания для более полного сгорания.

Большинство предыдущих исследований, касающихся горения газообразного топлива в среде O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>, было сосредоточено на пламени при нормальном давлении. Эти знания полезны при проектировании и эксплуатации промышленных печей с применением технологий сжигания O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>. Кроме того, это имеет значение для разработки технологии сжигания с использованием O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> в качестве окислителя при высоких давлениях газовой турбины [9, 10]. Тем не менее исследования пламени в атмосфере O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> при повышенных давлениях совершенно недостаточны. Из-за эффекта разбавленного CO<sub>2</sub> и высокого давления вероятны гашение пламени и обратная вспышка, и трудно сформировать стабилизированное пламя в камере сгорания, что вызывает затруднения при проведении экспериментов при высоких давлениях.

## Заключение

Как показал обзор литературы, рассмотренная проблематика активно исследуется. Необходимо проводить натурные эксперименты и изучать влияние отказа от воздуха в качестве окислителя в пользу промышленных газов. Подобную систему можно будет устанавливать на любую энергоустановку или технологические печи, тем самым практически избавляясь от вредных выбросов. Вопрос, касающийся углеродных выбросов, остается открытым, поскольку только экспериментальным путем можно определить его полноту сгорания и концентрацию в отработавших газах. Также есть предложение использовать в качестве носителя другой газ, чтобы отказаться от углеродного газа (к примеру, гелий или аргон).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Menghan Li, Hongjian Tian, Zhangning Wei, Qiang Zhang, Boxiong Shen. Ammonia and nitrous oxide emissions of a stoichiometric natural gas engine operating with high caloric value and low caloric value fuels // Fuel. 2021. V. 285. P. 119166. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119166>
2. Nevalainen P., Kinnunen N. M., Kirveslahti A., Kallinen K., Maunula T., Keenan M., Suvanto M. Formation of NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O in a modern natural gas three-way catalyst designed for heavy-duty vehicles: the effects of simulated exhaust gas composition and ageing // Applied Catalysis A: General. 2018. V. 552. P. 30—37. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2017.12.017>
3. Grigoratos Th., Fontaras G., Giechaskiel B., Zacharof N. Real world emissions performance of heavy-duty Euro VI diesel vehicles // Atmospheric Environment. 2019. V. 201. P. 348—359. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.12.042>
4. Xiangyu Meng, Hua Tian, Yihui Zhou, Jiangping Tian, Wuqiang Long, Mingshu Bi. Comparative study of pilot fuel property and intake air boost on combustion and performance in the CNG dual-fuel engine // Fuel. 2019. V. 256. P. 116003. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116003>
5. Muniyappan M., Tamil Prabakaran S., Gopi P., Shanmugam Mohanraj, Bhuvendran Arun, Shaisundaram V. S. Hydrogen behavior in dual fuel mode diesel engine with nano diesel // Materials Today: Proceedings. 2021. V. 37. Part 2. P. 2401—2405. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.248>
6. Akhmetshin M. R., Nyashina G. S., Romanov D. S. Analysis of Anthropogenic Emissions during Direct Combustion of Oil Products and Oily Industrial Wastes // Chem. Petrol. Eng. 2021. № 56. P. 846—852. <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00851-x>
7. Brusseau M. L., Matthias A. D., Comrie A. C., Musil S. A. Chapter 17 — Atmospheric Pollution // Environmental and Pollution

Science (Third Edition). — Academic Press, 2019. P. 293—309. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814719-1.00017-3>

8. Sintsov S. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2020. № 53. P. 305203. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab8999>

9. Krieger G. C., Campos A. P. V., Takehara M. D. B., Alfaia da Cunha F., Gurgel Veras C. A. Numerical simulation of oxy-fuel combustion for gas turbine applications // Applied Thermal Engineering. 2015. V. 78. P. 471—481. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.001>

2015. V. 78. P. 471—481. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.001>

10. Xiaochun Zhang, Zijian Zhang, Xing Li, Yufang Chen, Xiaohan Wang. Study on stretch extinction characteristics of methane/carbon dioxide versus oxygen/carbon dioxide counterflow non-premixed combustion under elevated pressures // J. Natural Gas Science and Engineering. 2021. V. 92. P. 103994. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103994>

## Exhaust nitrogen oxides reduction system (ExNORS)

E. V. OVCHINNIKOV, S. Yu. UYUTOV, V. A. KRYUCHKOV

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

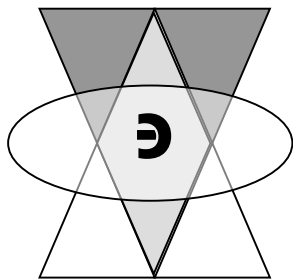
*This article presents the concept of an installation for the maximum reduction of harmful nitrogen oxides in the exhaust gases of internal combustion engines and industrial power plants using a high-temperature discharge.*

**Keywords:** harmful emissions, nitrogen oxides, carbon dioxide, oxygen, high temperature discharge.

**Bibliography** — 10 references.

*Received June 19, 2021*





## Общие вопросы

УДК 621.436.24

DOI: 10.52190/2073-2589\_2021\_3\_39

### Обзор современных систем подачи топливной смеси на основе водорода в автотракторные двигатели (Обзор)

**Р. С. ФЕДОТКИН**, канд. техн. наук; **Е. В. ОВЧИННИКОВ**;  
**В. А. КРЮЧКОВ**, канд. техн. наук; **К. С. ДМИТРИЕВ**

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

*Приведен обзор существующих технологий и технических средств подачи топливной смеси на основе водорода в автотракторные двигатели внутреннего сгорания (ДВС). Выделены системы с непосредственным впрыском водорода в камеру сгорания ДВС и во впускной коллектор, многотопливные системы с синтез-газом на основе водорода, системы баллонного типа и со встроенными генераторами водорода (электролизерами), системы с техническими средствами нейтрализации отработавших газов, выделенных при сгорании топливных смесей на основе водорода, а также системы, содержащие технические средства обеспечения безопасности процесса хранения, подачи водорода и предупреждения негативных последствий утечек, возгораний, взрывов и т. д. Отмечено, что результаты существующих исследований и разработок реализованы преимущественно в экспериментальных установках, которые позволяют исследовать отдельные процессы: сгорание топлива на основе водорода с определением оптимального состава топливной смеси и массовой доли водорода, в частности оптимальных параметров подачи водорода; выпуск и нейтрализацию отработавших газов с определением количества вредных выбросов и разработкой мероприятий по их снижению до предельно допустимых концентраций (ПДК) и т. д. Данные исследования позволяют дать оценку мощностных, топливно-экономических, экологических и других параметров ДВС. Следует отметить, что системы подачи водорода в ДВС теряют свою актуальность ввиду общемировой тенденции перехода от ДВС к автоматизированному электроприводу с энергоустановками на основе альтернативных источников энергии. Для дальнейших исследований намечены обзор и анализ работ по созданию энергоустановок для транспортных и транспортно-технологических средств на основе водорода.*

**Ключевые слова:** водород, водородное топливо, экология, дизельный двигатель внутреннего сгорания, экологическая безопасность, альтернативное топливо, водородная топливная ячейка, система подачи водорода.

---

**Федоткин Роман Сергеевич**, ведущий научный сотрудник.

E-mail: frs89@bk.ru

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

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

**Крючков Виталий Алексеевич**, ведущий научный сотрудник.

E-mail: kryuchkov.vitaliy@gmail.com

**Дмитриев Кирилл Сергеевич**, инженер.

E-mail: kir0597@yandex.ru

---

Статья поступила в редакцию 19 июля 2021 г.

© Федоткин Р. С., Овчинников Е. В., Крючков В. А.,  
Дмитриев К. С., 2021

Фактор экологичности является важнейшим в определении технологичности того или иного технического процесса. Этот тезис применим и к транспортно-тяговым машинам разнообразного назначения. Ярко выражены следующие тенденции:

- Повышение экологической безопасности двигателей тяговых и транспортных машин. Сюда можно отнести борьбу со множеством негативных факторов, связанных с загрязнением окружающей среды, например парниковый эффект, углеродный след, смог и многое другое.

- Замещение углеводородного топлива альтернативными источниками энергии. Этот аспект также тесно связан с проблемами экологии, однако к нему можно отнести и рост цен на топливо, постоянный рост количества потребителей нефтепродуктов, а также истощение этих нефтепродуктов.

Важнейшим направлением по реализации этих тенденций является применение альтернативных видов топлива (природный газ, метанол, пропанобутановые смеси, растительное масло, водород и многие другие). Все эти направления отражены в распоряжениях Правительства Российской Федерации № 1455-р от 7.07.2017 "Стратегия развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2030 года" и № 1523-р от 9.06.2020 "Энергетическая Стратегия Российской Федерации на период до 2035 года".

### Основная часть

Созданию технологий и технических средств применения альтернативных видов топлива в двигателях тяговых и транспортных машин посвящено множе-

ство работ. Данные технологии реализованы в том числе в концептуальных и серийных транспортных средствах.

Так, в лаборатории авторов создана автоматизированная система адаптации автотракторных дизельных двигателей к работе на сжиженном углеводородном газе (СУГ) [1]. За счет замещения до 80 % дизельного топлива сжиженным газом удалось снизить количество вредных выбросов по показателям CO, CH и NO<sub>x</sub> до 50 % по сравнению с дизельным топливом, а также улучшить показатели топливной экономичности. Данная система реализована в составе трактора Беларус 320.4 тягового класса 0.6 (0.9) (рис. 1).

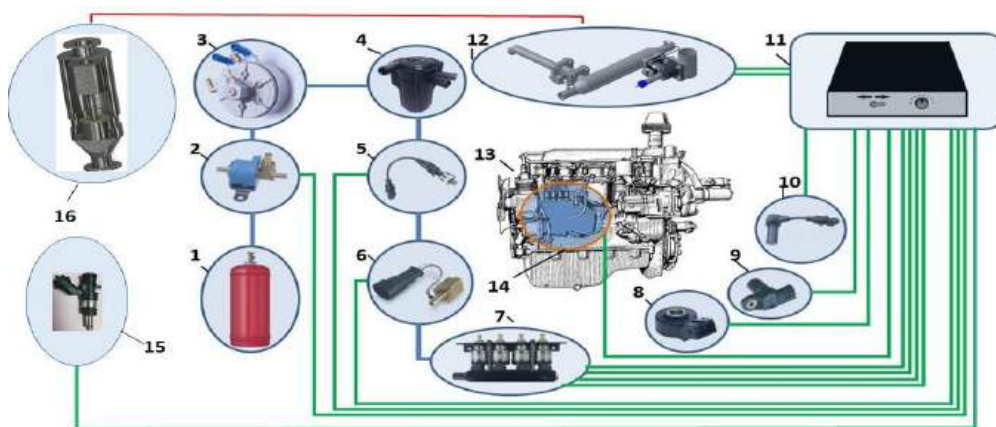
Также была реализована многотопливная система питания растительными маслами и СУГ в стендовой установке на базе двигателя Д 243 (рис. 2) [2].

Применение альтернативных видов топлива в ДВС в целом позволяет обеспечить показатели мощности и тягового усилия на уровне дизельных двигателей [2]. Кроме того, процессы сгорания такого топлива и сопутствующие термо- и газодинамические процессы позволяют не вносить существенных изменений в конструкцию двигателя.



**Рис. 1. Система адаптации тракторного дизельного двигателя к работе на сжиженном углеводородном газе:**

1 — верхний лямбда-зонд; 2 — каталитический нейтрализатор; 3 — блок управления впрыска мочевины; 4 — форсунка впрыска мочевины; 5 — нижний лямбда-зонд; 6 — система рециркуляции отработавших газов; 7 — бак для активатора горения; 8 — блок управления двигателем; 9 — баллон для СУГ; 10 — бак для мочевины с насосом; 11 — фильтр для СУГ; 12 — теплообменник-испаритель для СУГ; 13 — заправочное устройство для СУГ; 14 — электрофорсунки для СУГ



**Рис. 2. Оборудование для адаптации дизельного двигателя к работе на сжиженном углеводородном газе:**

1 — баллон с СУГ; 2 — клапан подачи газа; 3 — газовый редуктор-испаритель; 4 — газовый фильтр; 5 — датчик давления газа; 6 — датчик температуры газа; 7 — рампа с клапанами распределенной подачи газа; 8 — датчик детонации; 9 — датчик фазовой отметки газораспределительного механизма; 10 — датчик положения коленчатого вала; 11 — электронный блок управления; 12 — система рециркуляции отработавших газов с управляемой заслонкой; 13 — двигатель Д-243; 14 — топливный насос высокого давления с электронным управлением рейкой; 15 — форсунка для подачи мочевины; 16 — каталитический нейтрализатор отработавших газов

Однако продуктом сгорания таких топлив являются углеродсодержащие соединения, что не соответствует современному тренду по снижению углеродного следа (так называемой декарбонизации). В свете изложенного наиболее полно современным требованиям экологии удовлетворяет водородное топливо. Кроме того, к достоинствам водорода как топлива можно отнести следующее:

- практически не ограниченное количество водорода на Земле;
- низкие показатели вредных выбросов;
- высокая калорийность водородного топлива;
- возможность создания экологически чистых топливных элементов.

### Анализ существующих работ по созданию энергоустановок, работающих на водороде

Использование водорода в качестве бортового источника энергии можно разбить на два типа:

- Водородные топливные ячейки (элементы) для комбинированных энергоустановок, электрических и гибридных транспортных средств (ТС) (рис. 3). Разработкой топливных элементов занимается в том числе Институт проблем физической химии РАН.
- Системы подачи водорода в ДВС. Существуют установки с бортовыми генераторами водорода, приготовления синтез-газа и газобаллонным оборудованием (рис. 4).

Созданием систем подачи водорода в двигатель внутреннего сгорания и изучением особенностей работы бортовых генераторов водорода, бортовых систем приготовления синтез-газа, рецептов и химических составов топливных смесей, систем газобаллонного оборудования (ГБО), а также изучением вопросов экологической безопасности, в частности по снижению  $\text{NO}_x$  и безопасности при хранении и использовании водорода, занимаются многие исследователи. Результаты таких исследований легли в основу конструкций лабораторных установок, направленных на изучение отдельных явлений, процессов и технологий.

Столь широкий круг исследователей, занимающихся изучением вопросов по этой тематике, подтверждает стремление к созданию дизельной энергоустановки с оптимальными по сложности и стоимости доработками. Основной целью указанных исследований можно считать возможность доказать применимость водорода в топливной смеси дизельного двигателя с учетом отсутствия ущерба заявленных характеристик исследуемых двигателей. Пристальное внимание уделяется следующим характеристикам дизельных энергоустановок: состав вредных выбросов, экономические и мощностные параметры. Примерами, подтверждающими сказанное, можно считать работы исследователей из разных стран [3—7]. Для полноценного описания общей концепции данного типа экспериментов рассмотрим характерный пример подобного исследования ученых из Индии (рис. 5) [8].



Рис. 3. Компоновочная схема транспортного средства с водородными топливными ячейками

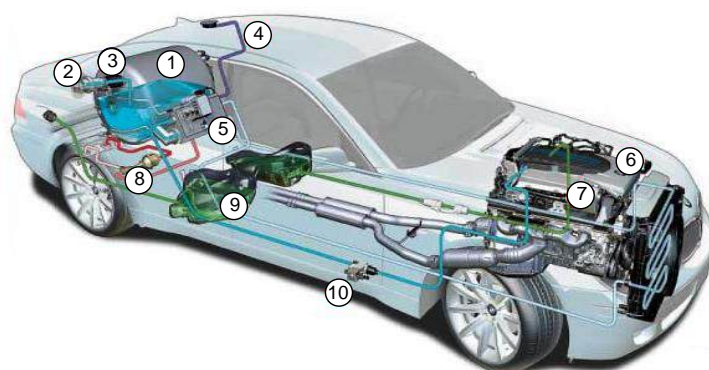
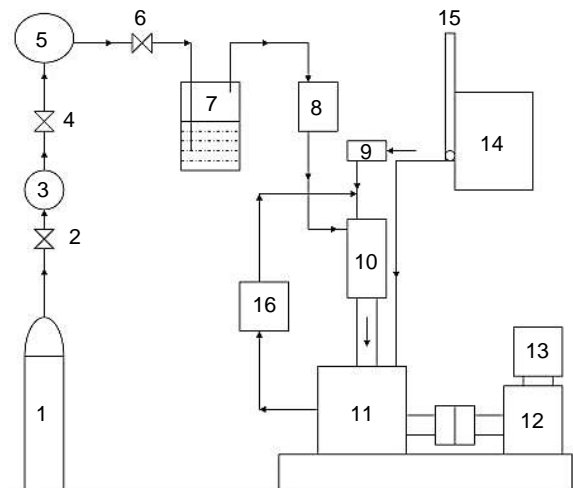


Рис. 4. Компоновочная схема транспортного средства с водородной топливной системой:

- 1 — баллон для водорода; 2 — заправочный вентиль водорода; 3 — заправочный канал водорода; 4 — предохранительный клапан; 5 — жаропонижающее устройство и контрольный клапан; 6 — ДВС с принудительным зажиганием; 7 — водородная топливная рейка; 8 — система охлаждения; 9 — бензобак; 10 — редукционный клапан



**Рис. 5. Принципиальная схема экспериментальной установки:**

- 1 — баллон с водородом; 2 — регулятор давления; 3 — расширительный бак водорода; 4 — фильтр; 5 — цифровой регулятор массового расхода; 6 — обратный клапан; 7 — пламегаситель; 8 — аварийный противопожарный клапан; 9 — форсунка подачи водорода; 10 — инфракрасный датчик; 11 — электронный блок управления; 12 — двигатель; 13 — динамометр; 14 — дизельный топливный бак; 15 — датчик уровня дизельного топлива; 16 — электронный блок управления водородной топливной системы

В исследовании приведен дизельный двигатель, использующий водород в качестве топлива, с дизельным топливом в качестве источника воспламенения водорода. Водород впрыскивали во впускной коллектор, а дизельное топливо — непосредственно внутрь цилиндра. Эксперименты показали, что при добавлении водорода в топливно-воздушную смесь КПД увеличивается с 23,59 до 29 % при оптимальных условиях. Выбросы, такие, как CO, CO<sub>2</sub> и CH, уменьшаются в среднем на 10—15 %. Выброс дыма снижается с 6,8 до 2,3. Эксперимент еще раз доказывает эффективность применения водорода в качестве топлива в дизельных двигателях. Варианты непосредственного распыления водорода (непосредственно в камеру сгорания или диффузионным методом) наиболее полно описаны в работе исследователей из Научного университета Тайваня [3].

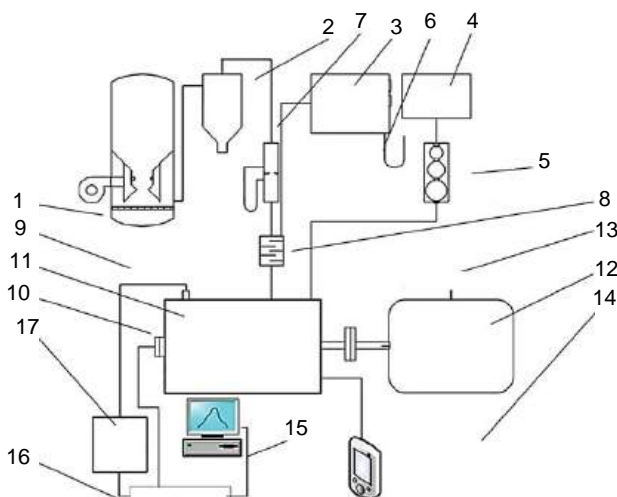
Не менее важной задачей является хранение на транспортно-тяговом средстве (ТТС) нужного для нормальной работы количества водорода [9]. Повышенная взрывоопасность водорода сильно усложняет технологию его использования в ДВС мобильных машин. В связи с этим актуальны исследования по производству необходимого количества водорода прямо на борту ТТС.

Ученые из Таиланда [9] в своей работе приводят концепцию экспериментальной установки, продемонстрированную на рис. 6.

В данном исследовании произведена оценка влияния количества пилотного топлива на производительность и выбросы газодизельного двигателя с применением в качестве топлива водорода и дизельного топлива.

В лабораторной установке генерация газа осуществлялась за счет горения биомассы (древесного угля). Применение описываемой системы на транспортных средствах повышает мобильность и увеличивает длительность работы. Однако в ходе экспериментов была выявлена прямая зависимость увеличения выброса CO до 15 % и улучшения экономических показателей, что говорит о том, что применять данную концепцию можно лишь в условиях высокой нагрузки двигателя. К недостаткам генератора водорода такого типа можно отнести высокую стоимость устройства и энергетического сырья, повышенные меры безопасности, неопределенность по утилизации шлаков, получаемых в результате реакции. Однако для обеспечения безопасности от нежелательного возгорания водорода следует рассматривать не только аспекты его хранения в ТТС. Также важно обеспечить противодействие возгоранию водорода, находящегося в топливной системе, но еще не попавшего в саму камеру сгорания.

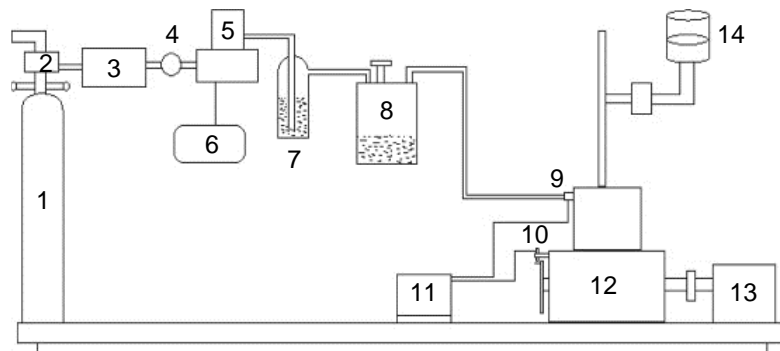
Исследователи из Индии [10] приводят свой метод решения описанных проблем (рис. 7).



**Рис. 6. Схематичная диаграмма экспериментальной установки:**

- 1 — газогенератор; 2 — узел очистки и охлаждения газа; 3 — короб впускного коллектора; 4 — топливный бак; 5 — датчик расхода топлива; 6 — манометр; 7 — форсунка для подачи газа со встроенным манометром; 8 — воздушно-газовый смеситель; 9 — датчик давления; 10 — датчик положения коленчатого вала; 11 — двигатель внутреннего сгорания; 12 — динамометр; 13 — контроллер динамометра; 14 — газоанализатор (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub>); 15 — компьютер; 16 — порт ввода данных; 17 — усилитель сигнала





**Рис. 7. Принципиальная схема экспериментальной установки:**

1 — баллон с водородом; 2 — регулятор давления; 3 — расширительный бак водорода; 4 — фильтр; 5 — регулятор массового расхода; 6 — блок управления регулятором расхода; 7 — пламегаситель; 8 — аварийный противопожарный клапан; 9 — форсунка подачи водорода; 10 — инфракрасный датчик; 11 — электронный блок управления; 12 — ДВС; 13 — динамометр; 14 — дизельный бак

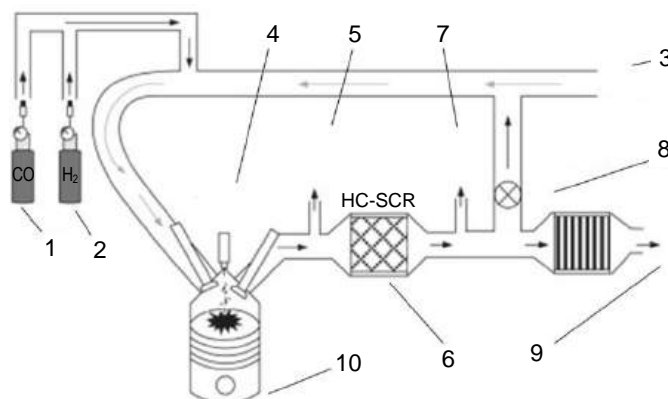
Далее приведены результаты экспериментального исследования подачи воздуха, обогащенного водородом, в систему дизельного двигателя. На экспериментальной установке в качестве меры безопасности на стенку пламегасителя была прикреплена полиэтиленовая диафрагма. В случае серьезной обратной вспышки эта диафрагма лопается, что предотвращает повышение давления, ведущее к взрыву. В качестве результатов экспериментов исследователи приводят улучшенные показатели эффективности и экологичности до 15 % по отношению к традиционному топливу. Основным достоинством данной работы является модернизация механизма пламегасителя, что увеличивает безопасность эксплуатации подобной установки в быту.

В описанных ранее исследованиях одним из основополагающих положительных свойств использования водорода в качестве топлива являлась его экологичность. Однако многочисленные исследования [3, 4, 7, 11] доказали, что помимо улучшения некоторых экологических показателей, также наблюдается рост количества  $\text{NO}_x$  в отработавших газах по сравнению с дизельным топливом. Исследователи из Тайланда в своей работе [12] привели решения по нейтрализации  $\text{NO}_x$  и прочих вредных выбросов (рис. 8).

В данном исследовании произведена оценка повышения в выхлопных газах дизельного двигателя отношения  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  при работе двигателя в двухтопливном режиме. Приведенная экспериментальная установка способна обеспечить измерение давления в цилиндре, среднего эффективного давления (IMEP), процентного коэффициента вариации (% COV) значений IMEP и процента COV пикового давления в цилиндре, среднего угла поворота коленчатого вала для задержки зажигания и других характеристик горения.

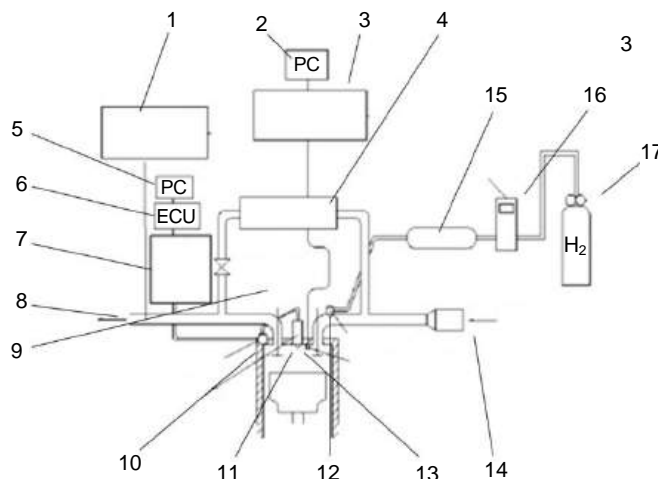
Проведенные эксперименты позволили судить об эффективности системы очистки выхлопных газов двигателя, работающего в двухтопливном режиме. Характеристики сгорания с REGR снижают выбросы  $\text{NO}_x$  из двигателя на 10 %. Также система способствует снижению выбросов  $\text{NO}_x$  в системах последующей обработки. Присутствие  $\text{H}_2$  в выхлопных газах способствует активности катализатора по восстановлению  $\text{NO}_x$ , тогда как наличие  $\text{NO}_2$  поддерживает окисление сажи через DPF. В целом система способна одновременно снизить выбросы  $\text{NO}_x$  до 18 %.

В работе японских ученых [13] описана система рециркуляции газов с их охлаждением (рис. 9). На экспериментальной установке было достигнуто уменьшение дымности до 50 %.



**Рис. 8. Схема экспериментальной установки:**

1 — баллон для газа  $\text{CO}$ ; 2 — баллон для газа  $\text{H}_2$ ; 3 — впускной коллектор для воздуха; 4 — топливная форсунка; 5 — входное отверстие системы снижения токсичности выхлопа; 6 — система снижения токсичности выхлопа углеводорода; 7 — выходное отверстие системы снижения токсичности выхлопа; 8 — клапан системы рециркуляции выхлопных газов; 9 — сажевый фильтр выхлопной системы; 10 — дизельный одноцилиндровый двигатель



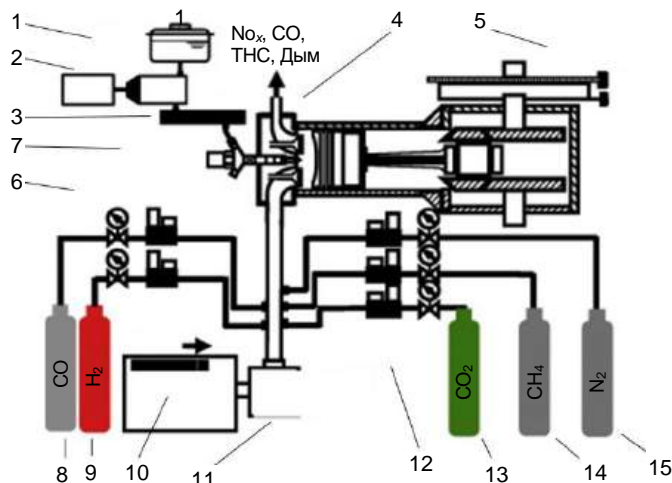
**Рис. 9. Экспериментальная установка:**

1 — анализатор выбросов; 2 — компьютер обработки данных; 3 — анализатор горения; 4 — охлаждение системы вентиляции картерных газов; 5 — компьютер; 6 — бортовой ЭБУ; 7 — топливный насос; 8 — выхлоп; 9 — клапан системы вентиляции картерных газов; 10 — топливная система "Common rail"; 11 — форсунка дизельного топлива; 12 — форсунка подачи газа; 13 — датчик давления в камере сгорания; 14 — впускной коллектор; 15 — расширительный бак; 16 — датчик массового расхода; 17 — баллон с водородом

В данном исследовании произведена оценка характеристик сгорания и выбросов отработавших газов в дизельном двигателе, работающем на смеси водорода и дизельного топлива, в зависимости от их соотношения. Особенностью экспериментальной установки можно считать наличие системы рециркуляции выхлопных газов с одновременным их охлаждением. Такая система позволила уменьшить дымовыделение на 50 % с учетом добавления водорода в камеру сгорания. Также учитывается уменьшение присутствия в выхлопных газах  $\text{NO}_x$  на 12 %.

Технология рециркуляции отработавших газов, применяемая в экспериментальной установке, позволяет получить лучшие результаты по некоторым параметрам вредных выбросов. Однако в данном исследовании не приведено ни одного упоминания влияния подобной системы на количество  $\text{NO}_x$  в выхлопе.

В исследованиях работы двигателя внутреннего сгорания на водороде также можно проследить тенденцию подачи его в синтезе с другими газами. Несмотря на все существенные недостатки применения водородного топлива, исследователи не прекращают эксперименты по его использованию в качестве топлива дизельного двигателя. Одним из наиболее реалистичных способов обеспечения поэтапного перехода к водородной энергетике в транспортной отрасли является синтез-газ, содержащий в своем составе водород и окись углерода, производящийся непосредственно на борту транспортного средства с использованием каталитического риформинга части основного (газообразного или жидкого) углеводородного топлива энергетической установки (рис. 10). Компоненты, входящие в состав синтез-газа, могут оказывать положительное влияние на параметры рабочих процессов ДВС.



**Рис. 10. Схематическая диаграмма экспериментальной установки:**

1 — топливный бак; 2 — топливный насос; 3 — топливная система "Common rail"; 4 — выхлопная система; 5 — датчик верхней мертвой точки; 6 — регулятор давления; 7 — форсунка для впрыска дизельного топлива; 8 — емкость с газом  $\text{CO}$ ; 9 — емкость с газом  $\text{H}_2$ ; 10 — впускной коллектор; 11 — расходомер и расширительный бак; 12 — регулятор массового расхода; 13 — емкость с газом  $\text{CO}_2$ ; 14 — емкость с газом  $\text{CH}_4$ ; 15 — емкость с газом  $\text{N}_2$



Подробно результаты работы дизельного двигателя в двухтопливном режиме с применением синтез-газа описывают в своих экспериментах исследователи из Японии [14].

В данном исследовании произведена оценка характеристик сгорания и выбросов отработавших газов в дизельном двигателе, работающем на смеси водорода и дизельного топлива, в зависимости от состава синтез-газа. В ходе испытаний обнаружено, что при соблюдении определенных рабочих условий сгорание в обычном двигателе может быть преобразовано в сгорание с двухступенчатым тепловыделением. Сгорание с двухступенчатым тепловыделением может улучшить характеристики двигателя и повысить его эффективность. Оно наблюдалось для всех типов синтез-газа, исследованных в этой статье. Результаты также показали, что когда содержание  $\text{CO}_2$  в газе достигает 34 %, скорость максимального повышения давления, а также средняя температура сгорания, ИМЕР, тепловой КПД и выбросы  $\text{NO}_x$  снижаются, несмотря на увеличение массовой доли сжигаемого топлива во время второй стадии тепловыделения.

Разработки по использованию водорода также проводили советские ученые. Был создан прототип трактора с бортовым генератором водорода и системой его подачи в цилиндры ДВС [15]. Производство водорода осуществляли путем разложения воды гидроксилирующими металлами. До настоящего времени проводились исследования по созданию генератора водорода на основе использования сплавов алюминия.

В ходе выполнения испытаний в качестве объекта был использован трактор Т-16 с дизелем воздушного охлаждения Д-21А (2Ч 10,5/12) (рис. 11).



Рис. 11. Экспериментальный трактор Т-16

Установлено, что при использовании 4 % массового расхода водорода по отношению к дизельному топливу и примерно пятикратному расходу пара по отношению к расходу водорода расход дизельного топлива снижается на 8—13 %.

В отработавших газах существенно уменьшаются дымность, а также содержание окислов азота и углеводородов (в 2—2,8; 2,0—2,5; 10; 1,4—1,6 раза соответственно).

## Заключение

Дальнейшей реализации данных технологий в серийных машинах не последовало ввиду следующих сдерживающих факторов конструкторско-технологического характера:

- повышенное содержание  $\text{NO}_x$  в выхлопных газах;
- взрыво- и пожароопасность;
- специфические особенности горения водородного топлива;
- сложность конструкции и изготовления топливной водородной системы;
- необходимость изменения конструкции ДВС.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать следующий вывод: преодоление указанных сдерживающих факторов является первоочередным и более сложным вопросом, чем реализация самой системы подачи водорода в ДВС.

Исследования и разработки по созданию технологий и технических средств применения водорода в качестве топлива в двигателе внутреннего сгорания и тем более их реализация на тяговых и транспортных машинах ограничены отсутствием инфраструктуры для обеспечения экологической, взрыво- и пожаробезопасности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников Е. В., Измайлов А. Ю., Уютов С. Ю., Федоткин Р. С. Система адаптации дизельного двигателя для работы в помещениях с ограниченным воздухообменом // Экология промышленного производства. 2021. № 1(113). С. 46—50.
2. Измайлов А. Ю., Савельев Г. С., Кочетков М. Н. и др. Автотракторный дизельный двигатель, адаптированный к работе на сжиженном углеводородном газе по газодизельному процессу // Изв. МГТУ МАМИ. 2018. № 1(35). С. 10—15.
3. Syu-Ruei Jhang, Kang-Shin Chen, Sheng-Lun Lin et al. Reducing pollutant emissions from a heavy-duty diesel engine by using hydrogen additions // Fuel. 2016. № 172. P. 89—95.
4. Yilmaz I. T., Demir A., Gumus M. Effects of hydrogen enrichment on combustion characteristics of a CI engine // International J. Hydrogen Energy. 2017. № 42. P. 10536—10546.
5. Masood M., Ishrat M. M., Reddy A. S. Computational combustion and emission analysis of hydrogen-diesel blends with experimental verification // International J. Hydrogen Energy. 2007. № 32. P. 2539—2547.
6. Pan H., Pournazeri S., Princevac M. et al. Effect of hydrogen addition on criteria and greenhouse gas emissions for a marine diesel engine // International J. Hydrogen Energy. 2014. № 39. P. 11336—11345.
7. Sandalcı T., Karagöz Y. Experimental investigation of the combustion characteristics, emissions and performance of hydrogen port fuel injection in a diesel engine // International J. Hydrogen Energy. 2013. № 114. P. 26—34.
8. Saravanan N., Nagarajan G., Dhanasekaran C. et al. Experimental investigation of hydrogen port fuel injection in DI diesel engine // International J. Hydrogen Energy. 2007. № 32. P. 4071—4080.
9. Pisarn Sombatwong, Prachasanti Thaiyasuit, Kulachate Pianthong. Effect of Pilot Fuel Quantity on the Performance and Emission of a Dual Producer Gas-Diesel Engine // Energy Procedia. 2013. № 34. P. 218—227.
10. Saravanan N., Nagarajan G. An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system // International J. Hydrogen Energy. 2008. № 33. P. 1769—1775.
11. Talibi M., Hellier P., Balachandran R. et al. Effect of hydrogen-diesel fuel co-combustion on exhaust emissions with verification

using an in-cylinder gas sampling technique // International J. Hydrogen Energy. 2014. № 39. P. 15088—15102.

12. **Chong J. J., Tsolakis A., Gill S. S. et al.** Enhancing the NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio in compression ignition engines by hydrogen and reformate combustion, for improved aftertreatment performance // International J. Hydrogen Energy. 2010. № 35. P. 8723—8732.

13. **Toru Miyamoto, Hirokazu Hasegawa, Masato Mikami et al.** Effect of hydrogen addition to intake gas on combustion and exhaust emission characteristics of a diesel engine // International Journal of Hydrogen Energy. 2011. № 36. P. 13138—13149.

14. **Ulugbek Azimov, Eiji Tomita, Nobuyuki Kawahara et al.** Effect of syngas composition on combustion and exhaust emission characteristics in a pilot-ignited dual-fuel engine operated in PREMIER combustion mode // International J. Hydrogen Energy. 2011. № 36. P. 11985—11996.

15. **Kolbenev I. K., Kolpakov V. E., Soldatkin A. V.** Hydrogen diesel fuel engine for application on a universal tractor: Hydrogen Energy Progr. VIII. 7-th World Hydrogen Energy Conf. 1988. P. 2095—2104.

## Overview of modern systems for supplying a fuel mixture based on hydrogen in automotive engines

(Review)

**R. S. FEDOTKIN, E. V. OVCHINNIKOV, V. A. KRYUCHKOV, K. S. DMITRIEV**  
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

*The article provides an overview of technologies and technical means for supplying a hydrogen-based fuel mixture to automotive internal combustion engines (ICE). Systems with hydrogen injection into the combustion chamber of an internal combustion engine and into the intake manifold, multi-fuel systems with synthesis gas based on hydrogen, balloon-type systems and with built-in hydrogen generators (electrolyzers), systems with technical means for neutralizing exhaust gases released during the combustion of fuel mixtures hydrogen-based systems, as well as systems containing technical means to ensure the safety of the storage process, hydrogen supply and prevent the negative consequences of leaks, fires, explosions, etc. The results of existing research and development are implemented mainly in experimental installations that allow one to study individual processes: combustion of hydrogen-based fuel with the determination of the optimal composition of the fuel mixture and the mass fraction of hydrogen, in particular, the optimal parameters of hydrogen supply; release and neutralization of exhaust gases with the determination of the amount of harmful emissions and the development of measures to reduce them to maximum permissible concentrations (MPC), etc. These studies ultimately make it possible to assess the power, fuel and economic, environmental and other parameters of the internal combustion engine. Nevertheless, it was noted that the systems for supplying hydrogen to the internal combustion engine are currently losing their relevance in view of the global trend of transition from internal combustion engines to an automated electric drive with power plants based on alternative energy sources. For further research, a review and analysis of work on the creation of power plants for transport and transport-technological facilities based on hydrogen is planned.*

**Keywords:** hydrogen, hydrogen fuel, ecology, diesel internal combustion engine, environmental safety, alternative fuel, hydrogen fuel cell, hydrogen supply system.

Bibliography — 15 references.

Received July 19, 2021

Экология промышленного производства: Межотр. науч.-практ. журнал / ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2021. Вып. 3. С. 1—48.

Редактор *О. А. Константинова*

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

Подписано в печать 08.09.2021.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 5,6. Уч.-изд. л. 5,8.

Тираж 250 экз. Заказ 1978.

Свободная цена.

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

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».

<http://ntckompas.ru>

Отпечатано: 101000, Москва,

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

ИП Кириченко Алексей Викторович.

Индекс 80090.

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

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

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

**Наши реквизиты:**

Полное наименование организации: \_\_\_\_\_

Сокращенное наименование организации: \_\_\_\_\_

ИНН/КПП \_\_\_\_\_

ОКПО \_\_\_\_\_

Расчётный счёт № \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_

к/с \_\_\_\_\_ БИК \_\_\_\_\_

Юридический адрес: \_\_\_\_\_

Почтовый адрес: \_\_\_\_\_

Контактное лицо \_\_\_\_\_ тел. \_\_\_\_\_

E-mail: \_\_\_\_\_

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

**Справочно:**

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

E-mail: secretariat@ntckompas.ru

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

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

E-mail: ivleva@ntckompas.ru

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

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».