

# ЭКОЛОГИЯ

## промышленного производства



**МЕЖОТРАСЛЕВОЙ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ**

**Выпуск 3  
Москва 2020**





## 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 образования и науки 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 (111)

Издается с 1993 г.

Москва 2020

### СОДЕРЖАНИЕ

#### ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ, УТИЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕРАБОТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Пузач В. Г., Шустров Н. Н., Шитиков Е. С., Шацкая В. А. Шлаки и золы-уноса мусоросжигательных заводов. Области возможного применения в производствах строительных материалов ..... 2

Кайракбаев А. К., Абдрахимова Е. С. Рециклинг отходов топливно-энергетического комплекса, цветной металлургии и нефтехимической промышленности в производстве безобжиговых жаростойких бетонов ..... 5

Калинина Е. В. Эколого-экономическая оценка выбора товарного продукта с использованием вторичных материальных ресурсов на примере отходов содового производства ..... 13

Уварова А. С., Виткалова И. А., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Применение отходов гальванического производства для получения термически и химически стойкой керамики ..... 18

Стеценко С. А., Абдрахимов В. З. Использование отходов топливно-энергетического комплекса и фосфорного производства в производстве керамического кирпича ..... 23

#### ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

Северюков И. Т., Кузнецов Н. П., Ильин В. В., Свиридок Е. В. Функциональное моделирование экологических рисков и управляющих воздействий при групповом хранении боеприпасов ..... 29

Волохин В. А., Гракович И. В., Кузнецов Н. П., Северюков И. Т. Динамическая неустойчивость пружинных клапанов гидропневмомагистралей как фактор экологического риска ..... 33

#### ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

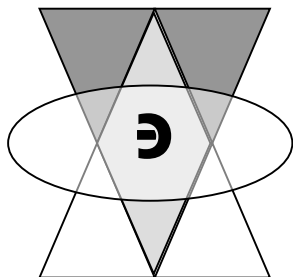
Архипов А. В., Гринюк О. Н., Михед А. Д., Алексашина О. В. Использование инновационных методов исследования загрязнения воздуха для совершенствования системы контроля атмосферы города Новомосковска ..... 39

Бурева Е. А., Чечеватова В. В., Саевский А. И., Михайлова Т. А., Кацаева Е. А., Чаплыгин В. А., Литвинов Ю. А., Минкина Т. М. Радионуклиды в наземных экосистемах природно-техногенной территории Новочеркасской ГРЭС ..... 45

#### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Амосов П. В. Прогнозные оценки времени прогрева водоема-охладителя при тепловых сбросах с атомной станции малой мощности в Арктическом регионе ..... 50

**Главный редактор А. Г. Ишков,**д-р хим. наук, проф., акад. РАЕН,  
заместитель начальника Департамента —  
начальник Управления ПАО «Газпром»**Заместители главного редактора:****В. Ф. Гракович**, д-р техн. наук, проф., акад. РАЕН,  
председатель правления Национального Фонда содействия устойчивому развитию регионов; **Н. П. Кузнецов**,  
д-р техн. наук, проф., Ижевский государственный  
технический университет им. М. Т. Калашникова**Ответственный секретарь К. В. Трыкина**,  
начальник отдела научных и информационных  
изданий ФГУП «НТЦ оборонного комплекса  
«Компас»**Редакционный совет:****А. М. Амирханов**, канд. биол. наук, зам. руководителя  
Федеральной службы по надзору в сфере природо-  
пользования; **Э. В. Гирусев**, д-р филос. наук, проф.,  
акад. Российской экологической академии, Московская  
государственная академия делового администрирова-  
ния; **Н. П. Тарасова**, чл.-кор. РАН, д-р хим. наук, проф.,  
директор Института проблем устойчивого развития**Редакционная коллегия:****С. С. Бабкина**, д-р хим. наук, проф., Институт тонких  
химических технологий Московского технологического  
университета; **Я. И. Вайсман**, д-р мед. наук, проф.,  
Пермский национальный исследовательский политех-  
нический университет; **В. А. Грачев**, чл.-кор. РАН,  
д-р техн. наук, проф., президент, генеральный дирек-  
тор Неправительственного экологического фонда  
им. В. И. Вернадского; **М. Н. Дадашев**, д-р техн. наук,  
проф., РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина; **В. Г. Иса-  
ков**, д-р техн. наук, проф., акад. Академии военных наук  
РФ, Ижевский государственный технический универси-  
тет им. М. Т. Калашникова; **М. А. Корепанов**, д-р техн.  
наук, Институт прикладной механики Уральского отде-  
ления РАН; **Б. С. Ксенофонтов**, д-р техн. наук, проф.,  
МГТУ им. Н. Э. Баумана; **В. Ю. Мелешко**, д-р техн. наук,  
проф., Институт химической физики им. Н. Н. Семенова  
РАН; **В. В. Минасян**, канд. техн. наук, генеральный дирек-  
тор ООО «Фрэком»; **Е. А. Найман**, канд. техн. наук,  
Краковский технический университет им. Тадеуша  
Костюшко (Польша); **А. Ю. Недре**, канд. техн. наук, зам.  
директора ФГАУ "НИИ "Центр экологической промыш-  
ленной политики"; **Е. И. Пупырев**, д-р техн. наук, проф.,  
генеральный директор ОАО «МосводоканалНИИпро-  
ект»; **И. Ш. Сайфуллин**, д-р хим. наук, проф., зам.  
директора Научно-исследовательского института  
инновационного развития промышленности Российско-  
го экономического университета им. Г. В. Плеханова;  
**В. А. Тенев**, д-р физ.-мат. наук, проф., Ижевский госу-  
дарственный технический университет им. М. Т. Ка-  
лашникова; **Ю. В. Трофименко**, д-р техн. наук, проф.,  
директор Научно-исследовательского института энер-  
гоэкологических проблем автотранспортного комплекса  
при МАДИ© Федеральное государственное унитарное пред-  
приятие «Научно-технический центр оборонного ко-  
мплекса «Компас» (ФГУП «НТЦ оборонного комплекса  
«Компас»), 2020



# Обезвреживание, утилизация и переработка промышленных отходов

УДК 50.7

## Шлаки и золы-уноса мусоросжигательных заводов. Области возможного применения в производствах строительных материалов

**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

*Проведены исследования по определению условий, позволяющих использовать отходы заводов по сжиганию бытового и промышленного строительного мусора для производства бетонов высокого качества.*

**Ключевые слова:** шлаки, зола-уноса, суспензии наночастиц, активированная вода, портландцемент.

Утилизация бытового и промышленного строительного мусора становится все более актуальной экологической задачей в плане безопасного проживания народонаселения, особенно крупных мегаполисов. Поэтому в России намечено строительство большого количества мусоросжигательных заводов (МСЗ). В ходе термической переработки бытового и строительного мусора на МСЗ образуются два вида твердых отходов: стекловидные шлаки и пылевидные золы-уноса, улавливаемые последовательно в циклонах и рукавных фильтрах.

В [1] отмечено, что шлаки и золы-уноса МСЗ при определенных условиях (в частности, при исполь-

зовании активированной воды) могут быть применены в производствах строительных материалов/мелко-зернистых цементобетонов в качестве заполнителя.

Авторами представлены результаты экспериментов со шлаками и золами-уноса МСЗ, которые позволяют дать более расширенные оценки областей возможного применения этих отходов.

Следует сразу отметить, что по сравнению с золами-уноса тепловых электростанций, работающих на твердом топливе, шлаки и золы МСЗ значительно отличаются по химическому составу (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав шлаков и зол-уноса МСЗ

Наименование	SiO <sub>2</sub> , %	CaO, %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	MgO, %	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O, %	SO <sub>3</sub> , %	Потери при прокаливании, %
Шлаки МСЗ	46—57	9,0—15,6	6,0—9,4	9,0—16,3	1,6—2,8	6,6—8,5	0,8—2,2	6,1—7,7
Золы-уноса МСЗ	24—43	16,8—24,5	8,6—13,0	3,3—7,0	0,7—3,6	3,4—13,2	2,8—7,3	2,3—4,1
Сланцевая зола-уноса (Золэст-бет)	27,8	36,6	7,0	4,2	4,3	4,4	10,3	4,9
Зола-уноса Рефтинской ГРЭС	57,7	2,4	26,4	5,6	0,9	0,8	0,2	1,3

**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

Статья поступила в редакцию 7 мая 2020 г.

© Пузач В. Г., Шустров Н. Н., Шитиков Е. С., Шацкая В. А., 2020

Из табл. 1 видно, что шлаки и золы МСЗ находятся в промежуточном положении между типичной кальциевой формой зол-уноса (сланцевая Золэст-бет) и типичной кремниевой формой (зола-уноса Рефтинской ГРЭС), причем зола-уноса МСЗ в большей степени смещена к кальциевой форме, чем шлаки. Различие между кальциевой и кремниевой формами зол-уноса [2] заключается в том, что первая обладает гидравлическими и/или пуццолановыми свойствами, а вторая может проявлять только пуццолановые

свойства). Можно ожидать, что области возможного применения шлаков и зол-уноса МСЗ, например в производствах мелкозернистого бетона, будут отличаться.

В данной работе использованы:

- портландцемент СЕМ-1 42,5 от ООО "Холсим (Рус) СМ" (Щуровский ПЦ 500);
- строительный песок Мкр 2,1 Сычевского карьера;
- измельченный шлак (от МСЗ № 4);
- зола-уноса, улавливаемая в циклоне (от МСЗ № 4);
- зола-уноса, улавливаемая в рукавном фильтре (от МСЗ № 4);
- вода из сети московского водопровода и вода, активированная в гидродинамическом смесителе [3];
- нанодобавки (смесь наночастиц кремнезема, кобальта и вольфрама).

Далее в тексте и таблицах использованы следующие сокращения: цемент — Ц; песок — П; вода — В; активированная вода — аВ; шлак МСЗ — Шл; циклонная зола-уноса — Зц; зола-уноса из рукавного фильтра — Зрф.

Проведено несколько серий опытов с замесами мелкозернистого бетона со шлаком и золой-уноса МСЗ в сочетаниях с песком и без песка, в которых определяли такие характеристики затвердевших образцов, как плотность, прочность, водонасыщение,

относительное объемное расширение. Для приготовления образцов мелкозернистого бетона использовали стандартные формы 4×4×16 см.

Нанодобавки в смеси вводили в виде суспензии в активированной воде в количестве 0,004—0,005 % от массы цемента [4, 5].

Количество твердого заполнителя (песка, измельченного шлака, золы-уноса) по отношению к массе цемента в смесях чаще всего принимали равным 3:1, но в двух сериях опытов оно составляло 3,5:1 и 0,5:1.

Водоцементное отношение (В/Ц) при замешивании смеси сухих порошков цемента и заполнителей подбирали так, чтобы бетонные смеси получались равноподвижными с контрольной смесью (большая часть цемента—песок).

Прочностной характеристикой приготовленных образцов мелкозернистого бетона служила прочность при сжатии, которую определяли через 3, 7 и 28 сут твердения образцов в нормальных условиях (20 °С; относительная влажность не менее 90 %).

Некоторые результаты экспериментов представлены в табл. 2—4.

Характерной особенностью смесей мелкозернистого бетона/строительного раствора с измельченным шлаком и золой-уноса МСЗ являлось быстрое схватывание и ускоренное твердение (90 % от величины прочности смеси после 28 сут твердения достигалось через 3—7 сут).

Таблица 2

Влияние измельченного шлака и циклонной золы-уноса МСЗ на прочность образцов мелкозернистого бетона

П/Ц, %	Шл/Ц, %	Зц/Ц, %	В/Ц	аВ/Ц	Нанодобавки	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Водонасыщение, %	Прочность через 28 сут твердения, МПа
300	—	—	0,83	—	—	2050	1,45	20,0
—	300	—	—	1,0	Есть	1880	1,35	18,0
—	—	300	—	1,1	Есть	1620	11,50	17,0
100	100	100	—	1,0	Есть	1800	0,70	22,0

Таблица 3

Влияние активации воды и нанодобавки на степень объемного расширения и прочность образцов мелкозернистого бетона с измельченным шлаком и золой-уноса МСЗ

Шл/Ц, %	Зц/Ц, %	Зрф/Ц, %	В/Ц	аВ/Ц	Нанодобавки	Плотность образцов бетона, кг/м <sup>3</sup>	Степень объемного расширения, %	Прочность после 28 сут твердения, МПа
200	100	50	1,3	—	—	1470	16,0	7,0
200	100	50	—	1,0	Есть	1700	6,0	14,0

Таблица 4

Влияние измельченного шлака и золы-уноса МСЗ на относительное объемное расширение и прочность при сжатии образцов мелкозернистого бетона /строительного раствора

П/Ц, %	Шл/Ц, %	Зц/Ц, %	Зрф/Ц, %	В/Ц	аВ/Ц	Нанодобавки	Плотность образцов бетона, кг/м <sup>3</sup>	Степень объемного расширения, %	Прочность через 28 сут твердения, МПа
50	—	—	—	0,44	—	—	1960	—	45,0
—	50	—	—	0,45	—	—	2000	—	26,0
—	50	—	—	—	0,40	—	2030	—	38,0
—	—	50	—	0,55	—	—	1550	15,0	24,0
—	—	35	15	0,57	—	—	1600	11,0	24,0
—	—	25	—	—	0,42	—	1610	9,0	23,0

На основе полученных в экспериментах данных можно сделать следующие выводы.

- Замена песка в мелкозернистых бетонах на шлак и золу-уноса МСЗ без существенного снижения эксплуатационных характеристик возможна лишь при использовании в качестве воды затворения активированной воды или суспензии наночастиц в активированной воде.

- Введение измельченных шлаков и зол-уноса МСЗ в водоцементные системы резко увеличивает водопотребность (до 50 %), но применение активированной воды или суспензии наночастиц в активированной воде снижает этот отрицательный эффект (до 10—20 %).

- С точки зрения прочностных характеристик и водонасыщения (косвенно-водонепроницаемости) мелкозернистых бетонов и строительных растворов измельченный шлак предпочтительнее зол-уноса МСЗ.

- Применение активированной воды и суспензии наночастиц в активированной воде способствует росту прочности при сжатии образцов мелкозернистого бетона со шлаком и золой-уноса МСЗ до 100 % по сравнению с образцами, приготовленными на неактивированной воде.

- При одинаковой прочности образцы мелкозернистого бетона со шлаком МСЗ имеют меньший на 10—15 % вес, чем образцы с песком.

- При использовании вместо песка в качестве заполнителя мелкозернистого бетона смеси (песок + измельченный шлак + циклонная зола-уноса в равных долях по массе) обнаруживается синергетический эффект, проявляющийся в снижении водонасыщения вдвое (с 1,45 до 0,7 %) и росте прочности при сжатии в 28-суточном возрасте на 10 %.

- Улавливаемая в циклонах часть золы-уноса на МСЗ при добавлении к цементному раствору способствует увеличению объема образца цементного камня при затвердевании. Степень увеличения объема растет с повышением количества добавки: 9 % при добавлении 25 % от массы цемента циклонной золы-уноса; 15 % при добавлении 50 %. При этом прочность образцов при сжатии остается на одном уровне.

- Измельченный шлак и зола-уноса, улавливаемые в рукавных фильтрах, свойствами увеличения объема бетонной смеси не обладают, но могут слу-

жить в качестве дополнительного регулятора степени расширения объема.

Таким образом, измельченный шлак мусоросжигательных заводов может быть использован для частичной или полной замены песка в мелкозернистых бетонах. Наиболее эффективным заполнителем в них оказывается смесь песка, шлака и циклонной золы-уноса при условии использования для затворения бетонных смесей активированной воды или суспензии наночастиц в активированной воде (при оптимальном количестве вводимой нанодобавки 0,004—0,006 % от массы цемента).

Циклонная зола-уноса МСЗ может быть использована в качестве расширяющей добавки для цементных растворов, предназначенных для заполнения пустот, неровностей в недоступных местах, например в тампонажных системах нефтегазобурения и ремонта скважин.

Однако к широкому применению шлаков и зол-уноса МСЗ надо подходить с осторожностью ввиду повышенного содержания в их химическом составе щелочей (окислов натрия и калия), которые через реакцию щелочь—кремнезем способны вызывать внутреннюю коррозию бетонов, ведущую к разрушению бетонного материала. Возможно, дополнительно потребуется введение ингибиторов коррозии [6, 7].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пузач В. Г., Шустров Н. Н., Червяков В. М., Жолтовский А. И., Шитиков Е. С. О возможности повышения прочности бетонов, содержащих кремнезем, шлаки и золы тепловых станций на твердом топливе и мусоросжигательных заводов // Экология промышленного производства. 2019. № 3. С. 38—41.
2. Збигнев Гергичны. Зола-уноса в составе цемента и бетона. — Санкт-Петербург: ЗАО "ПрофЦементВектор", 2013. — 189 с.
3. Червяков В. М., Шитиков Е. С. Гидродинамический смеситель. Патент РФ № 2558621, 2015.
4. Тевяшев А. Д., Шитиков Е. С. О возможности управления свойствами цементобетонов с помощью наномодификаторов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2009. № 4/7 (40). С. 35—40.
5. Пузач В. Г., Шустров Н. Н., Шитиков Е. С. Наноматериалы в производстве строительных бетонов // Нанотехника. 2013. № 1. С. 87—92.
6. Рояк Г. С., Москвин В. М. Коррозия бетона при действии щелочей цемента на кремнезем заполнителя. — М.: Гос. изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам. 1962. — 164 с.
7. Рояк Г. М., Рояк Г. С. Специальные цементы. — М.: Стройиздат, 1993. — 125 с.

## Slags and fly ash of incineration plants. Areas of possible application in production building material

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

*Studies have been carried out to determine the conditions that allow the use of waste from household and industrial construction waste incinerators for the production of high-quality concrete.*

**Keywords:** slags, fly ash, suspension of nanoparticles, active water, portland cement.

**Bibliography** — 7 references.

*Received May 7, 2020*

УДК 691.421-431.002

## Рециклинг отходов топливно-энергетического комплекса, цветной металлургии и нефтехимической промышленности в производстве безобжиговых жаростойких бетонов

А. К. КАЙРАКБАЕВ, канд. физ.-мат. наук

ТОО «Технопарк Zerek» учреждения «Актюбинский университет имени С. Баишева»,  
г. Актобе, Казахстан

Е. С. АБДРАХИМОВА, канд. техн. наук

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева,  
г. Самара, Россия

*С применением отходов топливно-энергетического комплекса (золошлакового материала), цветной металлургии (ватержакетного шлака) и химической промышленности (алюмосодержащего нанотехногенного сырья на основе фосфатных связующих) получен жаростойкий бетон с высокими физико-механическими показателями. Благодаря использованию ортофосфорной кислоты в качестве связующего удается утилизировать 80–90 % отходов топливно-энергетического комплекса, цветной металлургии и нефтехимической промышленности, что способствует снижению антропогенной нагрузки на окружающую среду и человека. Исследования показали, что жаростойкие бетоны на основе железосодержащего связующего в нормальных условиях твердения в суточном возрасте приобретают прочность, достаточную для распалубки, транспортировки и монтажа изделий. Фосфатное связующее, полученное путем затворения ватержакетного шлака 70%-й ортофосфорной кислотой, способствует росту прочности примерно прямо пропорционально времени твердения в воздушных условиях и в 7-суточном возрасте стабилизируется на уровне 65–70 МПа.*

**Ключевые слова:** золошлаковый материал, ватержакетный шлак, отработанный катализатор, фосфатные связующие, жаростойкие бетоны.

### Экологические проблемы

К экологическим проблемам относят, во-первых, изменение окружающей среды, ведущее к антропогенным нарушениям не только структуры, но и функционирования природы, во-вторых — результат стихийных бедствий [1–5].

Известны источники и причины, способствующие загрязнению окружающей среды [6–8]. К таким причинам можно отнести антропогенную человеческую деятельность [9–12].

По уровню негативного воздействия на окружающую среду на первом месте стоят отходы топливно-энергетического комплекса, на втором — металлургические производства, на третьем — нефтехимическая промышленность.

На первое место по выживанию человечества выходит востребованность заботы о состоянии

окружающей среды обитания, а это в постиндустриальной цифровой экономике обязывает творцов глобализации заниматься сохранением долгосрочного биосферного равновесия [13–17]. Уже значительные площади поверхности суши исключены из хозяйственной деятельности человечества вследствие накопления на них крупнотоннажных промышленных отходов, что значительно увеличило и степень отрицательного воздействия не только на окружающую среду, но и на человека [18–21]. Учитывая значительное накопление промышленного загрязнения, можно предположить, что такое загрязнение окружающей среды будет становиться все более опасным и в конечном счете негативно отразится на здоровье людей [22–26].

Неотъемлемыми элементами при производственной деятельности любого предприятия должны быть обеспечение экологической безопасности, забота о сохранении окружающей среды и финансовая ответственность руководителей предприятий [27–30].

Одно из основных условий обеспечения защиты окружающей среды — тесная интеграция научного, образовательного и промышленного потенциалов. Каждый человек имеет право на благоприятную

Кайракбаев Аят Крымович, доцент.

E-mail: kairak@mail.ru

Абдрахимова Елена Сергеевна, доцент.

E-mail: 3375892@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24 апреля 2020 г.

© Кайракбаев А. К., Абдрахимова Е. С., 2020

окружающую среду, поэтому развитие научно-технического прогресса не должно сопровождаться неконтролируемым ростом антропогенного воздействия не только на биосферу, но и на здоровье людей.

Знакомство с национальным проектом "Экология" и сопоставление его с накопленным опытом в странах Евросоюза в областях управления природоохранной деятельностью со стороны административных органов власти позволяет отметить существенно меньший объем нормативной базы прямого действия, средств и систем контроля за их выполнением [19, 20]. Поэтому экологические проблемы при необходимости оценки эффективности работы всех отраслей с точки зрения баланса между массой полезного продукта и объемом полученных отходов не решаются [21].

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.

Один из четырех законов Барри Коммонера (1917—2012 гг.) гласит: "Природа знает лучше". Процессы самоочищения происходят и без участия человека, но для их ускорения необходимы дополнительные условия [31]. К дополнительным условиям можно отнести европейское законодательство (Директива Европейского Парламента и Совета Европейского Союза 2008/98/ЕС), которое подчеркивает, что существует приоритетность методов управления отходами, где наиболее приемлемым вариантом считается утилизация отходов и их переработка с сопутствующим повышением энергоэффективности композит-

ного производства в целях повторного использования полученных при этом продуктов [32, 33]. Опыт передовых зарубежных стран показал техническую осуществимость этого направления и его применения еще и как инструмента защиты природной среды от загрязнения [32, 33]. Вместе с тем из отходов или из отходов в комбинации с природным сырьем могут быть изготовлены практически все основные строительные материалы [34—38].

Основная цель данной работы — установление возможности использования крупнотоннажных минеральных отходов: в качестве наполнителя и частично выгорающей добавки используют золошлаковый материал, в качестве железосодержащего наполнителя — ватержакетный шлак, а в качестве алюмосодержащего — отработанный катализатор для получения жаростойкого бетона, отвечающего современным требованиям безопасности и обладающего необходимыми конкурентными преимуществами.

Еще одна цель показать возможность снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду и человека за счет использования крупнотоннажных отходов топливно-энергетического комплекса (золошлакового материала), цветной металлургии (ватержакетного шлака) и нефтехимической промышленности (отработанного катализатора в производстве жаростойких бетонов на основе фосфатных связующих).

### Сырьевые материалы

Для получения жаростойкого бетона использовали золошлаковый материал, ватержакетный шлак и отработанный катализатор, оксидный химический состав которых представлен в табл. 1, а поэлементный состав золошлакового материала и отработанного катализатора — в табл. 2. На рис. 1 представлены микроструктуры исследуемых отходов, а на рис. 2 — их минералогические составы.

Таблица 1

Химический оксидный состав отходов производств

Отход	Содержание элементов, масс. %							п.п.п.
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O	
Золошлаковый материал	41—43	16—18	9—12	1—2	4—6	—	3—3,5	19—21
Ватержакетный шлак	33—35	6—7	48—49	1—1,5	7—9	—	2—3	—
Отработанный катализатор	11,9	70,5	0,15	0,1	—	14,8	1,58	—

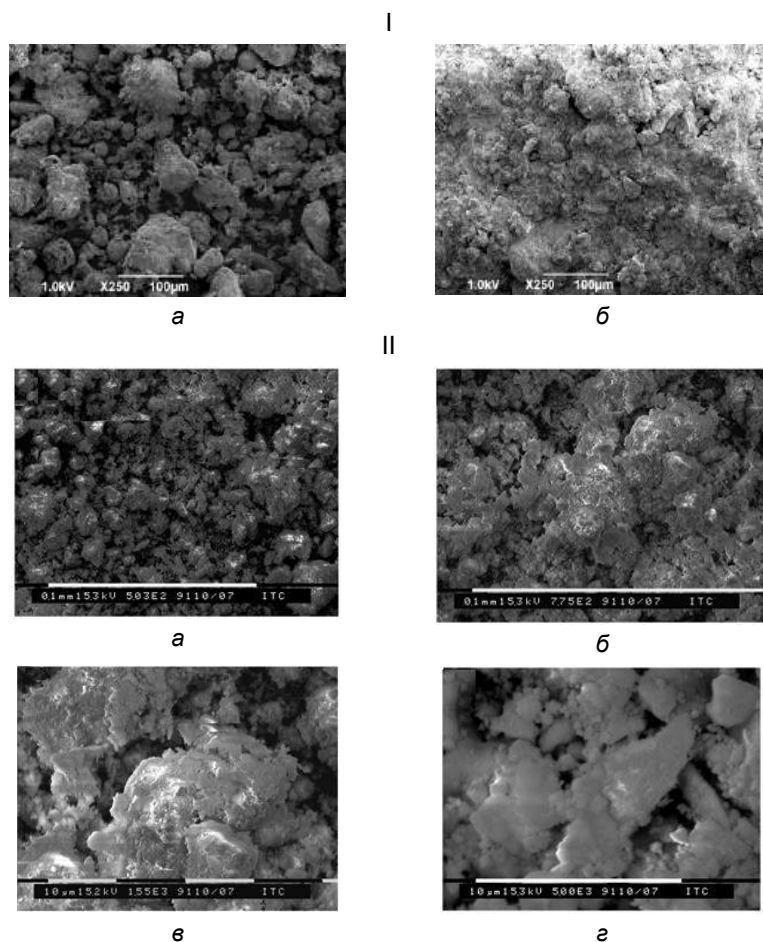
Примечание: п.п.п. — потери при прокаливании; R<sub>2</sub>O = K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O.

Таблица 2

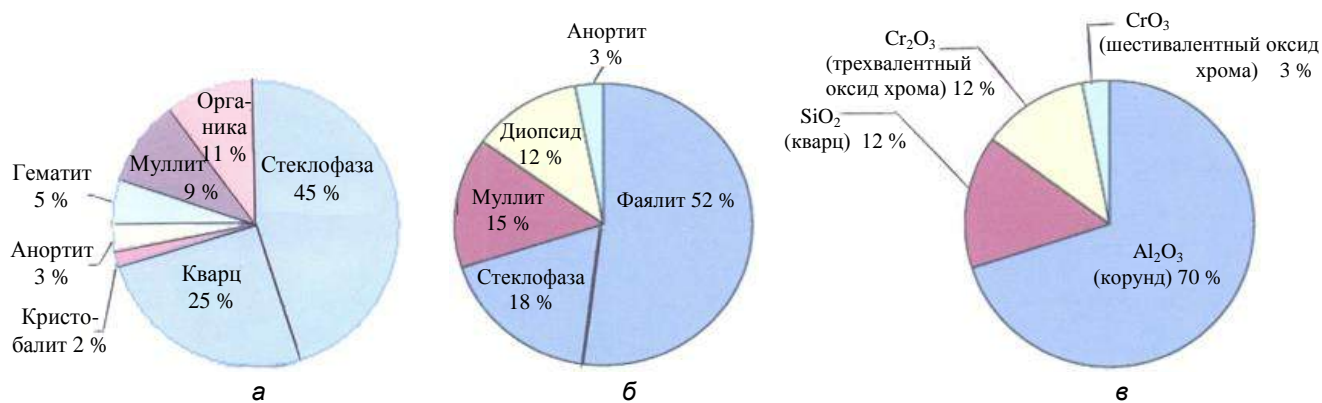
Поэлементный химический состав золошлакового материала и отработанного катализатора

Отход	Содержание элементов, масс. %										
	Cr	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
Золошлаковый материал	—	7,8	48,3	1,05	0,91	12,3	18,2	1,98	0,92	3,05	6,12
Отработанный катализатор	8,1	—	60,74	1,0	—	26,58	2,82	—	1,80	—	0,01





**Рис. 1. Микроструктуры сырьевых материалов:**  
 I — золошлакового материала (а) и ватержакетного шлака (б) (увеличение: а и б  $\times 250$ );  
 II — отработанного катализатора ИМ-2201 (увеличение: а —  $\times 50$ , б —  $\times 750$ , в —  $\times 1500$ , з —  $\times 5000$ )



**Рис. 2. Минералогический состав сырьевых материалов:**  
 а — золошлаковый материал; б — ватержакетный шлак; в — отработанный катализатор

В табл. 3 представлены фракционные (гранулометрические) составы золошлакового материала и ватержакетного шлака.

Таблица 3

Фракционный состав золошлакового материала и ватержакетного шлака

Компонент	Содержание фракций в %, размер частиц в мм				
	>0,063	0,063—0,01	0,01—0,005	0,005—0,001	<0,001
Золошлаковый материал	15,2	34,1	34,7	11,48	4,51
Ватержакетный шлак	9,8	28,1	21,4	25,9	14,8

**Золошлаковый материал.** Золошлаковый материал "АО Актобе ТЭЦ" является отходом топливно-энергетического комплекса и достаточно хорошо изучен в работах [4, 7, 19, 20]. В основном на 70 % по минералогического состава он состоит из стеклофазы и кварца (см. рис. 2). Наличие стеклофазы подтверждает микроструктура, представленная на рис. 1, I, а. В табл. 4 представлены технологические показатели золошлакового материала.

Таблица 4

Технологические показатели золошлакового материала

Теплотворная способность, ккал/кг	Огнеупорность, °С		
	начало деформации	размягчение	жидкоплавкое состояние
1600	1270	1300	1330

Золошлаковый материал целесообразно использовать не только как наполнитель, но и, учитывая повышенные значения теплотворной способности (табл. 4), содержание углерода (см. табл. 2) и органики (п.п.п., см. табл. 1), частично в качестве выгорающей добавки для повышения температуры внутри образца. Выгорающие добавки не только повышают температуру внутри образца, но также способствуют равномерному спеканию керамического черепка. Однако применять выгорающие добавки в жаростойких бетонах более 15 % нецелесообразно, так как при обжиге в изделиях создается пористость, в результате чего может снизиться прочность [4, 7, 19, 20].

**Ватержакетный шлак.** Ватержакетный шлак — это отход цветной металлургии, который получается после отстойки шлаковой печи и является отвальным продуктом медеплавильного цеха. Ватержакет — название, присвоенное медно- и свинцовоплавильным шахтным печам, стенки которых представляют собой охлаждаемые водой пустотелые коробки из котельного железа [39—43].

Медноплавильные ватержакетные шлаки (прочные и тяжелые), в керамической промышленности пока не нашли применения. На Урале в небольших количествах их употребляют в качестве железнодорожного балласта и крупного заполнителя для тяжелых бетонов [16, 17, 22, 29].

Исследован ватержакетный шлак, химические составы которого представлены: оксидный и поэлементный в табл. 1 и 5, а фракционный — в табл. 3.

Таблица 5

Поэлементный химический состав ватержакетного шлака

Элементы, %										
O	Zn	Na	Mg	Al	Cu	Si	Pb	K	Ca	Fe
48,58	0,53	0,93	0,52	3,2	1,23	18,04	0,69	0,1	3,78	22,4

Насыпная плотность ватержакетного шлака 1230—1280 кг/м<sup>3</sup>, истинная плотность 3,2—3,8 г/см<sup>3</sup>, температура плавления 1250—1300 °С.

Как видно из рис. 2, б, основным минералом ватержакетного шлака является фаялит.

**Отработанный катализатор ИМ-2201.** В Самарской области, где развито химическое производство (г. Новокуйбышевск — химкомбинат, г. Тольятти — завод синтетического каучука), имеется большое количество высокоглиноземистых отходов. В процессе синтеза бутадиен-стирольных каучуков образуется отработанный катализатор ИМ-2201. Отработанный катализатор ИМ-2201 представляет собой тонкодисперсный порошок с удельной поверхностью до 8000 см<sup>2</sup>/г и огнеупорностью до 2000 °С.

Микроструктура отработанного катализатора ИМ-2201 получена с помощью растрового электронного микроскопа JEOL-6390A и представлена на рис. 1, II, а минералогический состав — на рис. 2, в.

Как видно из рис. 2, в, в минералогическом составе отработанного катализатора содержится 70 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В составе неметаллических материалов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обычно присутствует в качестве высокотемпературной α-модификации, которая является аналогом природного минерала — корунда [44—48]. Температура плавления корунда 2050 °С, превращение низкотемпературной γ- в α-модификацию происходит при температурах свыше 1000 °С.

Отработанный катализатор отличается от высокодисперсных порошкообразных материалов природного и техногенного происхождения наноразмерностью, которая находится в пределах от 80 до 3000 нм и зависит от условий образования.

Исследования образцов отработанного катализатора в целях определения размерности его частиц были проведены в институте ядерных исследований (г. Гатчина, Ленинградская область) методом малоуглового рассеяния нейтронов на дифрактометре "Мембрана-2" [49—51]. Химические составы отработанного катализатора представлены: оксидный в табл. 1, поэлементный — в табл. 2.

**Фосфатные вяжущие.** Все большее применение находят фосфатные вяжущие на основе фосфорных кислот, преимущественно ортофосфорной (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>). Их получают при затворении фосфорной кислотой порошков оксидов металлов: алюминия, хрома, титана, меди, магния, железа. Применяют для изготовления жаростойких бетонов в качестве связующей ортофосфорную кислоту и в чистом виде по ГОСТ 6552-80, норма — чистый (ч.) ОКП 26 1213 0021 10. Массовая доля H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> не менее 85 %, плотность не менее 1,69 г/см<sup>3</sup>. Установлено, что основным фактором, определяющим возможность применения оксидов и гидроксидов для производства фосфатных связующих, является тепловой эффект реакций [49—53]



Фосфатные вяжущие, имеющие высокую прочность после твердения, способны увеличить прочность при нагревании. Они обладают высокой термостойкостью, многие из них характеризуются высокой огнеупорностью (алюмофосфатные — 1750 °С, хромофосфатные — 2100 °С).

В качестве фосфатных связующих можно использовать однозамещенный фосфорнокислый алюминий Al(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, двухзамещенный фосфорнокислый алю-

миний  $\text{Al}_2(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ , хромалюминий фосфорнокислый или алюмохромофосфатное связующее (АХФС) с общей формулой  $\text{Cr}_n\text{Al}_{4-n}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , где  $n = 1, 2, 3$  [53—56].

Исследования [50, 51, 54] показали, что железосодержащий компонент реагирует с  $\text{H}_3\text{PO}_4$  и разогревает смесь до необходимой температуры для проявления вяжущих свойств  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  с  $\text{H}_3\text{PO}_4$ .

Фосфатные вяжущие, имеющие высокую прочность после твердения, способны увеличить прочность при нагревании. Они обладают высокой термостойкостью. Многие из них характеризуются высокой огнеупорностью. Например, при использовании отработанного катализатора, имеющего повышенное содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , получают алюмофосфатные изделия с огнеупорностью 1750 °C [51—53, 55, 56].

Оксид алюминия замедляет схватывание ортофосфорной кислоты (ОФК) и переводит ее в алюмофосфатное связующее [51—53].

### Технологический процесс

Технологический процесс производства бесцементных жаростойких бетонов — это приготовление формовочной массы, формование изделий и термообработка. Следует отметить, что для затвердевания и набора марочной прочности жаростойкие бетоны требуют особой термообработки.

Технологический процесс для бетонов на ортофосфорной кислоте с компонентами, представленными в табл. 5, — это нагревание до 1200 °C с подъемом температуры до 200 °C со скоростью 60 °C/ч и до 1200 °C/ч со скоростью 150 °C/ч, выдерживание в течение 2 ч, охлаждение вместе с печью. Физико-механические свойства жаростойких бетонов приведены в табл. 6.

Таблица 6

Составы для получения и физико-механические показатели жаростойких бетонов

Компоненты	Содержание компонентов, масс. %			
	1	2	3	4
Золошлаковый материал	10	12	13	14
Ватержакетный шлак	35	36	37	38
Отработанный катализатор ИМ-220	35	37	38	38
Ортофосфорная кислота	20	15	12	10
Физико-механические показатели жаростойкого бетона после твердения и нагревания до температуры 1200 °C				
Механическая прочность на сжатие, МПа	67	68	69	70,8
Механическая прочность при изгибе, МПа	34	36	38	39
Морозостойкость, циклы	55	58	62	65
Термостойкость, циклы (350 °C — вода 20 °C)	5	7	8	6
Кислотостойкость, %	95,1	95,8	96,2	96,8

Твердение происходит в результате химического взаимодействия ортофосфорной кислоты с наполни-

телями, особенно тонкомолотой ее части, и последующих реакций полимеризации и поликонденсации, которые усиливаются по мере сушки и нагревания бетона [50—55]. Как видно из табл. 6, благодаря использованию ортофосфорной кислоты в качестве связующего удается утилизировать до 80—90 % отходов химической промышленности и энергетики и получить жаростойкие бетоны с высокими физико-механическими показателями.

Как видно из табл. 6, с повышением составов отходов производств физико-химические показатели повышаются.

### Обсуждение результатов

Оксид двухвалентного железа  $\text{FeO}$  реагирует с фосфорной кислотой энергично по отношению к  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , выделяя при этом значительное количество тепла [49—51]. В фаялите, который является основным минералом ватержакетного шлака, оксид железа является двухвалентным.

Поскольку активность двухвалентного железа по отношению к кислотам значительно выше по сравнению с трехвалентным, выделение тепла в композиции  $\text{FeO} + \text{H}_3\text{PO}_4$  будет происходить интенсивнее. В связи с этим использование различных оксидов железа в отдельности связано с преодолением обычных для фосфатных связующих трудностей: либо требуется частичная нейтрализация ортофосфорной кислоты (в случае применения  $\text{FeO}$ ), либо бетонную смесь нужно подогревать для обеспечения твердения (в случае применения  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Исследования показали, что фосфатное связующее, полученное путем затворения ватержакетного шлака 70%-й ортофосфорной кислотой, начинает схватываться через 45—50 мин и через 2—2,5 ч затвердевает. В дальнейшем по мере увеличения содержания в цементном камне ортофосфатов железа прочность его растет примерно прямо пропорционально времени твердения в воздушных условиях и в 7-суточном возрасте стабилизируется на уровне 55,0—60,0 МПа [49—51].

Таким образом, железофосфатное связующее по основным свойствам аналогично портландцементу марки 500, но контрольный срок его твердения равен 7 сут. Жаростойкие бетоны на основе железофосфатного связующего в нормальных условиях твердения в суточном возрасте приобретают прочность, достаточную для распалубки, транспортировки и монтажа изделий. В 7-суточном возрасте они приобретают конечную прочность, величина которой определяется свойствами заполнителей. Огнеупорность железофосфатного связующего равна 1300 °C, а рабочая температура футеровки из бетона, где применяют керамзит в качестве крупного заполнителя, составляет 1000 °C. При использовании алюмосодержащего отработанного катализатора образуется фосфорнокислый алюминий  $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ , который повышает огнеупорность и прочность жаростойкого бетона.

При добавлении в композицию алюмосодержащего нанотехногенного отработанного катализатора физико-механические свойства повышаются, например прочность при сжатии — до 70,0 МПа (табл. 6).

В работах [26, 57, 58] показано, что если в используемых отходах содержится даже небольшое количество наночастиц, то энергию Гиббса можно записать в следующем виде:  $G_i^{\text{нк}} = G_i^{\text{мас}} + \sigma_i f_i$ , где  $G_i^{\text{нк}}$  и  $G_i^{\text{мас}}$  — энергия Гиббса нанокристаллических и массивных фаз соответственно;  $\sigma_i$  и  $f_i$  — поверхностное натяжение и поверхность частиц  $i$ -й фазы соответственно. Это означает, что в системе возникает еще один независимый параметр — поверхность, а следовательно, и дополнительная степень свободы.

Эффект от внедрения наноразмерных частиц принципиально выражается в том, что в системе появляется не только дополнительная граница раздела, но и носитель квантовомеханических проявлений [37, 57—59]. Присутствие в системе наноразмерных частиц способствует увеличению объема адсорбционно- и хемосорбционно-связанной ими жидкости. Это приводит к уменьшению объема не только капиллярно-связанной, но и свободной жидкости, что повышает пластичность формовочной массы и прочностные показатели изделий.

При уменьшении размера зерен возрастает общая величина поверхности раздела фаз, уменьшается средний радиус кривизны выпуклых участков, растет их избыточная поверхностная энергия, уменьшаются расстояния между источниками и поглотителями вакансий в системе. Экспериментальные исследования и богатый практический опыт керамических производств подтверждают важнейшую роль степени измельчения (или использования наноразмерных сырьевых материалов) [48, 58]. За счет действия одного этого фактора удается в ряде случаев снизить требуемую температуру спекания на 50—100 °С и более.

Высокая химическая стойкость модифицированных фосфатами алюмосиликатных минералов, например муллита, который содержится в золошлаковом материале и ватержакетном шлаке (рис. 2, а и б), а также корунда, который содержится в отработанном катализаторе (рис. 2, в), способствует уменьшению общей пористости и повышению прочности [60, 61].

### Выводы

Исследовано влияние золошлакового материала, ватержакетного шлака и алюмосодержащего нанотехногенного высокоглиноземистого сырья (отработанного катализатора ИМ-2201) на физико-механические свойства жаростойких композитов на основе фосфатных связующих. Полученные жаростойкие бетоны имели высокие показатели по механической прочности, термостойкости, кислотостойкости и морозостойкости.

Фосфатное связующее, полученное путем затворения ватержакетного шлака 70%-й ортофосфорной кислотой, начинает схватываться через 45—50 мин и через 2—2,5 ч затвердевает. В дальнейшем по мере увеличения содержания в цементном камне ортофосфатов железа прочность его растет примерно пропорционально времени твердения в воздушных условиях и в 7-суточном возрасте стабилизируется на уровне 55,0—60,0 МПа.

При добавлении в композицию алюмосодержащего нанотехногенного отработанного катализатора физи-

ко-механические свойства повышаются, например прочность при сжатии — до 70,0 МПа (см. табл. 6).

Эффект от внедрения наноразмерных частиц выражается в том, что в системе появляется не только дополнительная граница раздела, но и носитель квантовомеханических проявлений. Присутствие в системе наноразмерных частиц способствует увеличению объема адсорбционно- и хемосорбционно-связываемой ими воды, которое уменьшает объем капиллярно-связанной и свободной воды, что приводит к повышению пластичности формовочной массы и прочностных показателей изделий.

Использование отходов производств в производстве строительных материалов способствует:

- утилизации промышленных отходов;
- охране окружающей среды;
- расширению сырьевой базы для получения жаростойких бетонов на основе фосфатных связующих.

Благодаря использованию ортофосфорной кислоты в качестве связующего удалось утилизировать 80—90 % отходов химической промышленности и получить жаростойкие бетоны с высокими физико-механическими показателями.

### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З. Взаимосвязь фазового и химического составов с долговечностью керамического материала возрастом более 800 лет из Жироновской крепостной стены (Испания) // Химическая технология. 2020. № 3. С. 98—104.
4. Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З. Влияние золошлакового материала "АО АКТОБЕ ТЭЦ" на предельное напряжение при сушке кирпича // Уголь. 2020. № 3. С. 76—81.
5. Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З. Взаимосвязь фазового и химического составов с долговечностью керамического материала Барселонского католического кафедрального собора возрастом более 600 лет // Стекло и керамика. 2020. № 1. С. 37—41.
6. Abdrakhimov V. Z., Abdrakhimova E. S. Study of the Distribution of Iron Oxides in Interscale Clay and Oil Sludge Porous Filler with Mossbauer Spectroscopy // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2019. V. 53. Iss. 4. P. 703—707.
7. Абдрахимов В. З. Использование золошлакового материала и нанотехногенного карбонатного шлама в производстве кирпича на основе бейделитовой глины // Строительство и реконструкция. 2019. № 2. С. 81—89.
8. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Использование в производстве жаростойких бетонов отходов химической промышленности как способ снижения загрязнения водоемов // Экологическая химия. 2019. Т. 28. № 4. С. 224—232.
9. Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Получение плиток для полов на основе золы легкой фракции и глинистой части "хвостов" гравитации циркон-ильменитовых руд // Уголь. 2019. № 6. С. 78—81.
10. Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Использование магний-хромитовых шламов Западного Казахстана в производстве огнеупоров на основе фосфатных связующих // Новые огнеупоры. 2019. № 6. С. 17—19.
11. Абдрахимов В. З. Повышение экологической безопасности за счет использования отхода обогащения угля в производстве пористого заполнителя на основе жидкого стекла и монтмориллитовой глины // Энергосбережение и водоподготовка. 2019. № 3. С. 33—38.
12. Абдрахимов В. З. Получение легковесного огнеупора на основе отходов цветной металлургии и нефтедобычи // Новые огнеупоры. 2019. № 4. С. 46—50.



13. **Абдрахимов В. З.** Рециклинг отходов топливно-энергетического комплекса в производстве легковесного кирпича на основе глинистых материалов различного минерального состава // Экология промышленного производства. 2020. № 1. С. 10—16.
14. **Абдрахимов В. З.** Использование флотационного углеобогащения в производстве пористого заполнителя на основе жидкого стекла // Экология промышленного производства. 2019. № 4. С. 25—29.
15. **Федоренко Р. В., Абдрахимов В. З., Колпаков А. В.** Экологические и экономические аспекты, способствующие развитию "зеленой" экономики и транспортно-логической инфраструктуры // Экология промышленного производства. 2019. № 3. С. 22—26.
16. **Абдрахимов В. З.** Снижение экологического ущерба за счет использования отходов цветной металлургии и энергетики в производстве легковесных огнеупоров // Экологические системы и приборы. 2020. № 2. С. 23—34.
17. **Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С.** Структура пористости и технические свойства клинкерных материалов на основе отходов цветной металлургии Восточного Казахстана // Стекло и керамика. 2020. № 2. С. 44—45.
18. **Абдрахимов В. З.** Использование отходов от производства минеральной ваты для получения стеновых материалов // Экология промышленного производства. 2019. № 2. С. 9—12.
19. **Ильина Ж. П., Абдрахимов В. З.** Использование отхода топливно-энергетической промышленности — золошлакового материала — в производстве пористого заполнителя на основе жидкостекольной композиции // Экология промышленного производства. 2018. Вып. 4. С. 16—22.
20. **Ильина Ж. П., Абдрахимов В. З., Колпаков А. В., Кайракбаев А. К., Рощупкина И. Ю.** Экологические и экономические аспекты использования многотоннажных отходов топливно-энергетического комплекса в производстве керамического кирпича // Экология промышленного производства. 2018. № 3. С. 7—14.
21. **Абдрахимов В. З.** Экономические и практические аспекты использования отходов горючих сланцев в производстве легковесного кирпича // Экономика строительства. 2020. № 1. С. 64—73.
22. **Абдрахимов В. З., Пичкуров С. Н., Абдрахимова Е. С., Абдрахимова И. Д.** Снижение нанесения экологического ущерба биосфере в целом за счет использования отходов энергетики и цветной металлургии в производстве керамического кирпича // Экология промышленного производства. 2017. № 1. С. 3—6.
23. **Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С.** Снижение экологического ущерба экосистемам за счет использования отходов горючих сланцев в производстве теплоизоляционных материалов // Экология промышленного производства. 2016. № 3. С. 18—24.
24. **Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С.** Использование электросталеплавильного шлака в производстве керамического кирпича и жаростойких бетонов // Экология промышленного производства. 2016. № 2. С. 2—7.
25. **Абдрахимов В. З., Кайракбаев А. К., Абдрахимова Е. С.** Использование в производстве клинкерного кирпича отходов цветной металлургии и энергетики Восточного Казахстана // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 3. С. 14—18.
26. **Абдрахимов В. З.** Влияние нанотехногенного сырья на сушительные свойства и физико-механические показатели керамического кирпича // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2020. № 1. С. 29—34.
27. **Абдрахимов В. З., Кайракбаев А. К.** Экологический менеджмент. — Актобе: Актобинский университет им. акад. С. Баишева, 2019. — 240 с.
28. **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.
29. **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.
30. **Абдрахимов В. З.** Влияние полевошпатового концентрата на фазовый состав плитки для полов на основе отходов цветной металлургии // Изв. вузов. Строительство. 2019. № 11. С. 33—42.
31. **Коммонер Б.** Замыкающий круг. — М.: Гидрометеиздат, 1974. — 280 с.
32. **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.
33. **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.
34. **Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С.** Керамические стеновые материалы на основе обожженного шлама щелочного травления алюминия и межсланцевой глины // Экология промышленного производства. 2015. № 3. С. 8—11.
35. **Никулина Е. Ю., Плаксина И. А., Абдрахимов В. З., Кайракбаев А. К., Лобачев Д. А., Абдрахимова Е. С.** Современные приоритеты развития "зеленой" экономики с учетом использований отходов нефтедобычи и нефтехимии в производстве керамических стеновых материалов // Экология промышленного производства. 2015. № 4. С. 24—28.
36. **Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С.** Исследование регрессивным методом влияния отходов топливно-энергетической промышленности на сушительные свойства стеновой керамики // Экология промышленного производства. 2015. № 1. С. 6—10.
37. **Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З., Рощупкина И. Ю.** Инновационные направления по использованию нанотехногенных отходов в производстве керамических композиционных материалов // Экология промышленного производства. 2014. № 3. С. 20—24.
38. **Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З.** Использование отходов цветной металлургии в производстве кислотоупоров без применения природного традиционного сырья // Экология промышленного производства. 2014. № 2. С. 13—15.
39. **Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З.** Структурные превращения соединений железа в глинистых материалах по данным мессбауэровской спектроскопии // Журнал физической химии. 2006. Т. 80. № 7. С. 1—8.
40. **Абдрахимова Е. С., Вдовина Е. В., Абдрахимов В. З.** Исследование структурных превращений железа при различных температурах обжига кирпича из бейделлитовой глины и продукта сгорания базальтовой шихты методом ядерной гамма-резонансной спектроскопии // Башкирский химический журнал. 2007. Т. 14. № 2. С. 96—99.
41. **Абдрахимова Е. С., Долгий В. П., Абдрахимов В. З.** Влияние железосодержащего металлургического шлака на фазовые превращения при обжиге керамических материалов // Материаловедение. 2006. № 1. С. 29—34.
42. **Абдрахимова Е. С., Абдрахимов А. В., Абдрахимов В. З.** Полиморфные превращения  $\text{SiO}_2$  в глинистых материалах различного химико-минералогического состава // Материаловедение. 2002. № 7. С. 35—41.
43. **Абдрахимов В. З., Шевандо В. В., Вдовина Е. В., Абдрахимов А. В., Абдрахимова Е. В., Ковков И. В., Денисов Д. Ю.** Полиморфные превращения кварца в глинах различного химико-минералогического состава // Изв. вузов. Строительство. 2007. № 6. С. 40—47.
44. **Абдрахимов В. З.** Применение алюмосодержащих отходов в производстве керамических материалов различного назначения // Новые огнеупоры. 2013. № 1. С. 13—23.
45. **Абдрахимов В. З., Хасеев Г. Р., Абдрахимова Е. С., Рощупкина И. Ю.** Экологические, теоретические и практические аспекты использования алюмосодержащих отходов в производстве керамических материалов различного назначения без применения природного традиционного сырья // Экология и промышленность России. 2013. № 5. С. 28—32.
46. **Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С.** Исследование фазового состава керамических материалов на основе алюмосодержащих отходов цветной металлургии, химической и нефтехимической промышленности // Новые огнеупоры. 2015. № 1. С. 3—9.
47. **Кайракбаев А. К., Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З.** Влияние высокоглиноземистых нанотехногенных отходов нефтехимии на термостойкость клинкерного кирпича // Стекло и керамика. 2015. № 9. С. 32—38.
48. **Абдрахимов В. З., Рощупкина И. Ю., Абдрахимова Е. С., Кайракбаев А. К., Колпаков А. В.** Жаростойкий композит на основе фосфатных связующих и высокоглиноземистых отходов // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 8. С. 33—40.
49. **Абдрахимов В. З., Хлыстов А. И., Ковков И. В.** Экологические и практические аспекты использования пиритных огарков и высокоглиноземистых отходов нефтехимии в производстве безобжиговых огнеупорных композитов // Огнеупоры и техническая керамика. 2009. № 4, 5. С. 35—42.
50. **Хлыстов А. И., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С., Ковков И. В., Денисов Д. Ю.** Экологические аспекты использования пиритных огарков в производстве безобжиговых огнеупорных композитов // Башкирский химический журнал. 2009. Т. 16. № 2. С. 81—83.

51. Абдрахимов В. З., Хлыстов А. И., Семенычев В. К. Использование техногенных образований в производстве безобжиговых огнеупорных композитов // Новые огнеупоры. 2010. № 5. С. 122—128.
52. Рошупкина И. Ю., Абдрахимова Е. С., Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З., Колпаков А. В. Инновационные разработки технологии направленной структурно-химической модификации футеровочных материалов на основе отходов цветной металлургии и фосфатных связующих // Новые огнеупоры. 2015. № 7. С. 52—56.
53. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Использование отходов нефтедобычи в производстве жаростойких поризованных бетонов на основе фосфатного связующего // Перспективные материалы. 2017. № 4. С. 55—64.
54. Абдрахимов В. З., Хлыстов А. И. Использование железосодержащих и высокоглинистых техногенных образований в производстве безобжиговых огнеупорных композитов // Строительный вестник Российской инженерной академии. 2010. Вып. 11. С. 108—115.
55. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Использование шлама карналлитовых хлоратов и отработанного катализатора в производстве жаростойких бетонов // Экологические системы и приборы. 2016. № 12. С. 36—41.
56. Абдрахимов В. З., Кайракбаев А. К., Абдрахимова Е. С. Использование отходов нефтехимии, цветной и черной металлургии в производстве жаростойких бетонов // Экологические системы и приборы. 2017. № 6. С. 41—51.
57. Абдрахимов В. З., Лобачев Д. А., Кайракбаев А. К., Абдрахимова Е. С. Жаростойкий композит на основе фосфатных связующих, нанотехногенных высокоглиноземистых и щелочноземельных отходов // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 3. С. 14—23.
58. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Применение высокоглиноземистого и щелочноземельного нанотехногенного сырья в производстве жаростойких бетонов на основе фосфатных связующих // Экологическая химия. 2017. Т. 26. № 5. С. 285—290.
59. Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З. К вопросу использования алюмосодержащего нанотехногенного сырья в производстве керамических композиционных материалов // Материаловедение. 2014. № 12. С. 44—52.
60. Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З. Синтез муллита из техногенного сырья // Журнал неорганической химии. РАН. 2007. Т. 52. № 3. С. 395—400.
61. Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З. Исследование кристаллизации муллита при обжиге кислотоупоров // Новые огнеупоры. 2012. № 4. С. 39—45.

## Recycling of waste from the fuel and energy complex, non-ferrous metallurgy and petrochemical industry in the production of non-burning heat-resistant concretes

A. K. KAIRAKBAYEV

Technopark Zerek LLP, Aktobe University named after S. Baishev, Aktobe, Kazakhstan

E. S. ABDRAKHIMOVA

Samara National Research University, Samara, Russia

*Currently, the level of negative impact on the environment in the first place are waste from the fuel and energy complex, the second-metallurgical production and the third-petrochemical industry. In this work, using waste from the fuel and energy complex-ash and slag material, non — ferrous metallurgy — water package slag and chemical industry-aluminum-containing nano-technogenic raw materials based on phosphate binders, heat-resistant concrete with high physical and mechanical properties was obtained. Thanks to the use of orthophosphoric acid as a binder, 80—90 % of waste from the fuel and energy complex, non-ferrous metallurgy and petrochemical industry can be disposed of, which helps to reduce the anthropogenic load on the environment and humans. Studies have shown that heat-resistant concrete based on an iron-phosphate binder under normal conditions of hardening at a daily age acquires strength sufficient for deconstruction, transportation and installation of products. The phosphate binder obtained by sealing water-pack slag with 70 % orthophosphoric acid increases the strength approximately in direct proportion to the time of hardening in air conditions and stabilizes at the level of 65—70 MPa at 7 days of age.*

**Keywords:** ash-slag material, water-pack slag, spent catalyst, phosphate binders, heat-resistant concretes.

**Bibliography** — 61 references.

*Received April 24, 2020*

УДК 658.567.1:661.333.012-027.33

## Эколого-экономическая оценка выбора товарного продукта с использованием вторичных материальных ресурсов на примере отходов содового производства

Е. В. КАЛИНИНА, канд. техн. наук

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
г. Пермь, Россия

*Использование отходов в качестве вторичных материальных ресурсов (ВМР) в производстве новых товаров способствует решению экологических проблем. Одной из нерешенных задач остается выбор приоритетного товарного продукта в случае, когда отход может быть использован в качестве ВМР в производстве нескольких видов товаров. Представлены показатели эколого-экономической оценки использования ВМР и результаты оценки использования отходов содового производства в производстве силикатного кирпича и мелиоранта.*

**Ключевые слова:** вторичный материальный ресурс, отход содового производства, силикатный кирпич, мелиорант.

Управление отходами является интенсивно развиваемой сферой российской и мировой экономики. Распоряжением Правительства РФ № 84-р от 25.01.2018 г. утверждена "Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года". Стратегией определены приоритетные задачи в сфере ресурсосбережения и ресурсной эффективности, в том числе повышение степени утилизации отходов и их вовлечение в основные производства в качестве вторичных материальных ресурсов, вовлечение крупных отраслей в процессы ресурсосбережения. Формируются правовые основы для регулирования обращения с ВМР, ориентированные на их вовлечение в экономическую деятельность в качестве материальных ресурсов производства, что соответствует мировой тенденции перехода модели экономического развития от "линейной" к "циркулярной" [1].

Линейная модель экономического развития реализуется через следующие этапы: добыча природного сырья, его транспортировка, производство продукции, сбыт продукции, потребление, формирование отхода. Закономерным последствием реализации линейной модели экономики является необходимость решения проблемы обращения с образующимися отходами. Линейная модель экономики трансформируется в циркулярную (экономику замкнутого цикла) путем вовлечения образующихся отходов в производство новых товарных продуктов.

В модели циркулярной экономики реализуются следующие принципы: добыча природного сырья, его

транспортировка и сбыт, производство продукции, потребление продукции, сбор отходов, использование отходов для производства новых видов продукции (при необходимости после предварительной обработки), т. е. использование отходов в качестве ВМР.

Текущий уровень научно-технического развития позволяет рассматривать ряд производственных и коммунальных отходов в качестве ВМР. Для эффективного вовлечения ВМР в хозяйственную деятельность целесообразно формировать комплексные системы управления ВМР на региональных уровнях [2].

В РФ использование отходов в качестве ВМР сопровождается рядом проблем:

- несовершенство нормативно-правовой базы;
- недостаток экономических стимулов и инструментов государственного регулирования;
- слабое информационное обеспечение деятельности предприятий, использующих ВМР, и рынка вторичных материальных ресурсов;
- отсутствие научно-методической базы, позволяющей дать обоснование приоритетности выбора товарного продукта в случае, если данный отход является ВМР в производстве нескольких товарных продуктов.

Цель данной работы — проведение эколого-экономической оценки выбора товарного продукта с использованием вторичных материальных ресурсов на примере отходов содового производства.

Многие отходы производства и потребления могут быть использованы в качестве ВМР для производства различных товарных продуктов. В связи с этим оценка эколого-экономической эффективности использования ВМР является актуальной задачей.

Если рассматривать только экономическую эффективность вовлечения отходов в производство в качестве ВМР [3], можно использовать показатель коммерческой эффективности их применения.

Оценку экономической эффективности использования вторичного сырья можно проводить по разным

---

**Калинина Елена Васильевна**, доцент кафедры "Охрана окружающей среды".  
E-mail: Kalininaelena1@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 8 мая 2020 г.

© Калинина Е. В., 2020

показателям [4] для предприятий, на которых образуются отходы, являющиеся ВМР (цена единицы продукции из вторичного сырья; себестоимость единицы продукции из вторичного сырья; удельные капитальные вложения при получении продукции из вторичного сырья; затраты на транспортировку и содержание единицы вторичного сырья в отвалах или на его уничтожение), и для предприятий-производителей продукции на основе ВМР (цена основной продукции, изготовленной с использованием продукции из ВМР; объем потребления продукции из ВМР на производстве основной продукции; себестоимость единицы основной продукции, изготовленной с использованием продукции из ВМР; объем производства основной продукции с использованием продукции из ВМР; удельные капитальные вложения основной продукции, произведенной с использованием продукции из ВМР).

В экономической оценке отходов в качестве ВМР можно использовать интегральные экономические характеристики [4]: коэффициент изменения физического и химического состава отходов; производительность; экономичность; отчуждение территории; возвратность ресурсов; эффективность [3, 4]. При эколого-экономической оценке [5] определяют величину ущербов и платежей за негативное воздействие отходов на объекты окружающей среды. При оценке экологических показателей использования ВМР целесообразно оценивать скорость утилизации отходов [6].

Производство кальцинированной соды сопровождается образованием крупнотоннажных отходов — шламов очистки дистиллерной жидкости, которые размещают в отстойниках-шламонакопителях (рисунк).



Отстойник-шламонакопитель отходов содового производства [7]

За период 2013—2018 гг. объемы образования отходов на одном из предприятий по производству кальцинированной соды составили 1,173—1,563 млн т/г. [8]. Шламы очистки дистиллерной жидкости размещаются в отстойнике-шламонакопителе, расположенном в водоохранной зоне двух рек. Общий объем накопленных шламов составляет более 50 млн т. Сложившаяся ситуация обуславливает необходимость безотлагательного решения вопроса утилизации отходов содового производства.

Рассматриваемые отходы содового производства (шлам) в сухом виде — это светло-серая масса плот-

ностью около 970 кг/м<sup>3</sup>, влажностью до 80 % с основным размером частиц (около 70 %) 0,1—0,2 мм [9, 10]. Усредненный состав шлама (в пересчете на сухой): CaCO<sub>3</sub> — 58,0 %; MgCO<sub>3</sub> — 14 %; Ca(OH)<sub>2</sub> — 12,0 %; CaC<sub>12</sub> — 4,0 %; SiO<sub>2</sub> — 4,5 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 3,2 %; CaSO<sub>4</sub> — 4,3 %. Значение pH водной вытяжки шлама составляет 8,4—12,8. На свойства и состав отходов влияют качество сырья для содового производства, способ обезвреживания, место и срок размещения отходов. Основным компонентом отходов является карбонат кальция.

На основании анализа научно-технической информации и результатов собственных исследований автором определены направления использования отходов содового производства в качестве ВМР (табл. 1). При наличии большого количества технологий и научных разработок по их использованию в строительной отрасли и в природоохранных целях они не реализованы.

Таблица 1

Товарные продукты с использованием отходов содового производства

Товарный продукт	ВМР в товарном продукте, %	Предварительная подготовка отхода
Сорбент для извлечения ионов тяжелых металлов и нефтепродуктов [9, 10]	100	Модификация органосилоксанами
Вяжущее для производства силикатного кирпича, бетона, древесно-цементных материалов [11—15]	15—70	Сушка, измельчение, обжиг
Минеральные заполнители стеновых материалов [16]	80—90	Не требуется
Заполнитель для асфальтобетонных смесей [17]	3—5	Не требуется
Тампонажный раствор [18]	0,7—6,2	Не требуется
Мелиорант [19], рекультивант [20]	50	Фильтрация, промывка, сушка
Нейтрализующий реагент [21]	100	Не требуется

Для обоснования приоритетных направлений использования отходов содового производства в качестве ВМР провели эколого-экономическую оценку известных технологий. При выборе приоритетных направлений использования ВМР значимым фактором является доля ВМР в составе конечного продукта и востребованность товара на рынке. С учетом этого выбраны использование отходов содового производства в качестве вяжущего для производства силикатного кирпича и мелиоранта.

С учетом анализа показателей эколого-экономической оценки использования ВМР предложены экологические показатели для предприятия, являющегося источником образования отходов, и предприятия-производителя продукции с использованием ВМР (табл. 2).



Таблица 2

**Эколого-экономические показатели оценки производства товарных продуктов  
с вовлечением отходов содового производства [3—6]**

Предприятие-источник образования отходов (ВМП)	
Предотвращенный ущерб от деградации почв и земель ( $Y_1$ )	$Y_D^n = H_c S K_{эк} K_n, \text{ руб.}, \quad (1)$ <p>где <math>H_c</math> — норматив стоимости земель, руб./га;  <math>S</math> — площадь почв и земель, сохранный от деградации за отчетный период времени в результате проведенных природоохранных мероприятий, га;  <math>K_{эк}</math> — коэффициент экологической ситуации и экологической значимости территории;  <math>K_n</math> — коэффициент для особо охраняемых территорий</p>
Предотвращенный ущерб от загрязнения земель химическими веществами ( $Y_2$ )	$Y_x^n = \sum_{i=1}^N (H_c S_i K_{эк} K_n) K_{пх}, \text{ руб.}, \quad (2)$ <p>где <math>S_i</math> — площадь земель, на которой предотвращено загрязнение химическим веществом <math>i</math>-го вида за период, га;  <math>K_{пх}</math> — повышающий коэффициент за предотвращение /ликвидацию загрязнения земель несколькими (<math>n</math>) хим. веществами <math>K_{пх} = 1 + 0,2(n-1)</math> при <math>n &lt; 10</math>; <math>K_{пх} = 3</math> при <math>n &gt; 10</math></p>
Величина ущерба, наносимого изъятием хозяйственных территорий под складирование/создание отвалов/захоронение отходов ( $Y$ )	$Y = (Ц - 3_1) S_j, \text{ руб.}, \quad (3)$ <p>где <math>Ц</math> — экономическая оценка 1 га земли по нормативам затрат на возмещение потерь сельскохозяйственного производства в условиях конкретного района, руб.;  <math>3_1</math> — издержки на рекультивацию 1 га земли, руб.;  <math>S_j</math> — площадь территории, используемой для захоронения ед. <math>j</math>-го вида ВМП, га</p>
Снижение платы за негативное воздействие на окружающую среду ( $\Pi$ )	$\Pi_{прj=1}^m = \sum (M_{пj} H_{платj} K_{от} K_n K_{стим}), \text{ руб.}, \quad (4)$ <p>где, <math>M_{пj}</math> — платежная база за размещение отходов <math>j</math>-го класса опасности;  <math>H_{плат}</math> — ставка платы за размещение отходов <math>j</math>-го класса опасности;  <math>K_{от}</math> — дополнительный коэффициент к ставкам платы в отношении территорий и объектов, находящихся под особой охраной в соответствии с федеральными законами;  <math>K_n</math> — коэффициент к ставке платы за размещение отходов <math>j</math>-го класса опасности за объем или массу отходов, размещенных в пределах лимитов на их размещение;  <math>K_{стим}</math> — стимулирующий коэффициент к ставке платы за размещение отходов <math>j</math>-го класса опасности;  <math>m</math> — количество классов опасности отходов</p>
Производитель товарного продукта с использованием ВМП	
Затраты на извлечение ВМП ( $H$ )	$H = I_j + 3_j, \text{ руб./т}, \quad (5)$ <p>где <math>I_j</math> — затраты на содержание ед. <math>j</math>-го ВМП в отвале, руб.;  <math>3_j</math> — затраты на разработку отвалов и транспортировку ед. <math>j</math>-го вида ВМП из отвалов, руб.</p>
Экономический эффект от замены первичного сырья на вторичное (производство основного продукта из вторичного сырья в сопоставлении с производством того же продукта из исходного сырья) ( $\Xi$ )	$\Xi = (H_c K - H_0) B, \text{ руб./т}, \quad (6)$ <p>где <math>H_c</math> и <math>H_0</math> — затраты на производство продукта из первичного сырья и ВМП соответственно, руб./т;  <math>B</math> — объем основного продукта из первичного сырья, равносильный по свойствам объему продукции из ВМП;  <math>K</math> — коэффициент, учитывающий потребительские свойства продукции из первичного сырья и ВМП</p>

Для эколого-экономической оценки приоритетности производства товарных продуктов с использованием шламов содового производства предложено выражение

$$\begin{aligned} \Xi_{ЭО} &= \Xi_{экол} + \Xi_{экон} = \\ &= (Y_1 + Y_2 + Y + \Pi) + (\Xi_1 - H), \text{ руб.} \end{aligned} \quad (7)$$

Источником образования ВМП является производство кальцинированной соды, потребителем ВМП рассмотрен производитель силикатного кирпича, находящийся в непосредственной близости от источника образования отходов (3 км). Анализ текущей производительности производителя силикатного кир-

пича показал, что весь объем ВМП не будет на нем востребован. Другим потребителем ВМП может стать завод силикатного кирпича, расположенный на расстоянии около 200 км, однако повышение затрат на транспортировку ВМП приведет к экономической нецелесообразности производства. Для полного потребления ВМП в производстве силикатного кирпича на заводе, находящемся в непосредственной близости от источника образования ВМП, необходимо наращивание мощностей их производства на 60 %.

При оценке эколого-экономической эффективности использования отходов содового производства в качестве мелиоранта рассмотрено его использование на территориях региона, нуждающихся в проведении мелиоративных мероприятий.

В табл. 3 приведены результаты эколого-экономической оценки производств силикатного кирпича и мелиоранта с использованием отходов содового производства в качестве ВМР.

Таблица 3

**Результаты эколого-экономической оценки производства товарных продуктов с использованием отходов содового производства, руб./г.**

Показатели оценки	Производство силикатного кирпича	Производство мелиоранта
Снижение платежей за размещение отходов	895 032	413 832
Снижение себестоимости	41 943 000	140 000 000
Транспортные затраты	12 276 000	102 000 000
Итого	30 562 032	38 413 832

Результаты эколого-экономической оценки показали, что приоритетным является использование мелиоративных свойств отходов содового производства.

### Выводы

Предложено проводить эколого-экономическую оценку приоритетности производства товарного продукта с использованием вторичных материальных ресурсов с учетом *экологических* показателей (предотвращенный ущерб от деградации почв и земель, предотвращенный ущерб от загрязнения земель химическими веществами, снижение ущерба, наносимого хозяйствованию изъятием территории под складирование, создание отвалов, захоронение отходов и снижение платы за негативное воздействие на окружающую среду) и *экономических показателей* (экономический эффект от замены первичного сырья на ВМР, затраты на извлечение ВМР).

Эколого-экономическая оценка приоритетности производства продукта с использованием отходов содового производства в качестве ВМР показала, что с учетом текущих технико-экономических и экологических параметров приоритетным является производство мелиоранта с эколого-экономическим эффектом 38 413 832 руб./г. Эколого-экономический эффект от использования отходов содового производства в производстве силикатного кирпича составляет 30 562 032 руб./г.

Устойчивое функционирование системы взаимосвязи промышленных предприятий, являющихся источником образования отходов, которые могут быть использованы в качестве вторичных материальных ресурсов и производителей товаров на основе этих вторичных материальных ресурсов, будет обеспечено при стабильности качества исходного сырья и спроса на производимую продукцию.

*Исследование выполнено в рамках проекта FSNM-2020-0024 по заказу Министерства науки и высшего образования Российской Федерации".*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Blomsma Fenna Making sense of circular economy: diss. Doctor of Philosophy (PhD). - Publisher: Imperial College London. December 2016 [Электронный ресурс]. URL: <https://spiral.imperial.ac.uk/handle/10044/1/47907> DOI: <https://doi.org/10.25560/47907>
2. Венгерцев В. Г. Управление вторичными материальными ресурсами как фактор регионального развития: дисс. ... канд. экон. наук. — Санкт-Петербург, 2017. — 153 с.
3. Неверов А. В. Экономика природопользования: учеб.-метод. пособие для студентов. — Минск: БГТУ, 2009. — 554 с.
4. Арбузов В. В., Грузин Д. П., Симакин В. И. Экономика природопользования и природоохраны: учеб. пособ. — Пенза: Пензенский гос. ун-тет, 2004. — 251 с.
5. Постановление РФ от 3.03.2017 № 255 "Об исчислении и взимании платы за негативное воздействие на окружающую среду".
6. ГОСТ Р 52107-2003 Ресурсосбережение. Классификация и определение показателей.
7. Электронные карты [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://yandex.ru/maps/20237/Berezniki/search/Березники/?l=sat&ll=56.735925%2C59.433101&sl=56.147643%2C57.997708&sspn=0.037851%2C0.012191&z=12> (дата обращения: 15.01.2020).
8. Доклад "О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края в 2018 г." [Электронный ресурс]. Режим доступа: [file:///C:/Users/admin/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge\\_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/Часть-4-Воздействие-хозяйственной-деятельности-на-окружающую-среду.pdf](file:///C:/Users/admin/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/Часть-4-Воздействие-хозяйственной-деятельности-на-окружающую-среду.pdf) (дата обращения: 15.11.2019).
9. Калинина Е. В., Глушанкова И. С., Рудакова И. С. Получение модифицированного сорбента на основе шламов содового производства для ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов с поверхности воды // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 5. С. 30—35.
10. Глушанкова И. С., Калинина Е. В., Демина Е. Н. Модифицированные сорбенты на основе шлама содового производства для извлечения ионов тяжелых металлов из водных растворов и сточных вод // Теоретическая и прикладная экология. № 3. С. 100—108.
11. Ломова Л. М. Силикатный кирпич на основе вяжущего известково-белитового типа // Строительные материалы. 1989. № 1. С. 12—14.
12. Леонтьев С. В., Титова Л. Н. Использование отходов производства кальцинированной соды для получения строительных материалов // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2018. Т. 2. С. 315—324.
13. Мырзин В. А., Волков Ф. Е., Осипов В. И. Композиция для устройства оснований автомобильных дорог и наземных сооружений. Патент 2114239 Рос. Федерации № 96120892/03. Заявл. 22.10.1996. Оpubл. 27.06.1998. — 8 с.
14. Шатов А. А., Титов В. М., Воронин А. В., Сергеев В. Н., Фисенко Л. К., Гареев А. Т., Бадертдинов Р. Н. Сырьевая смесь для изготовления легкого ячеистого бетона. Патент 2114088 Рос. Федерации № 95121564/03. Заявл. 19.12.1995. Оpubл. 27.06.1998. — 3 с.
15. Щербakov А. С., Подчуфаров В. С., Кучерявый В. И., Гольцева Л. В., Подчуфаров С. В. Вяжущее для древесно-цементных материалов. Патент 2035422 Рос. Федерации № 93005457/33. Заявл. 01.02.1993. Оpubл. 20.05.1995. — 3 с.
16. Федоркин С. И., Фальковский Н. Н. Способ получения строительных изделий. Патент 2012548 Рос. Федерации № 5009022/33. Заявл. 17.09.1991. Оpubл. 15.05.1994. — 6 с.
17. Пугин К. Г., Вайсман Я. И., Калинина Е. В. Управление эмиссиями токсичных компонентов промышленных отходов металлургических, нефтеперерабатывающих и химических предприятий путем их использования в строительной отрасли // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2011. № 7. С. 31—34.
18. Каримов Н. Х., Агзамов Ф. А., Акчуринов Х. И., Долгих Ф. А., Шкаретный В. И., Газизов Х. В., Каримов И. Н. Тампонажный раствор. Патент 2136845 Рос. Федерации № 97122217/03. Заявл. 23.12.1997. Оpubл. 10.09.1999. — 6 с.
19. Манойло Е. В., Манойло Ю. А., Моисеев В. Ф., Васильев М. И. Возможные пути рационального применения отходов химических производств [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rusnauka.com> (дата обращения: 22.07.2019).
20. Калинина Е. В., Вайсман Я. Б., Рудакова Л. В. Материал для биологической рекультивации нарушенных земель. Патент № 2546155 Рос. Федерация: МПК<sup>61</sup> C09K17/40. Заявитель и патентообладатель Пермский науч.-исслед. ун-т. Заявл. 06.11.2013. Оpubл. 10.04.2015.
21. Максимович Н. Г., Крюкова О. С. Разработка процессов взаимной нейтрализации производственных отходов содового производства, кислых шахтных вод и шахтных отвалов для защиты окружающей среды // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 1. С. 265—270.

## Ecological and economic estimation of the choice of a commodity product using secondary material resources on the example of soda production waste

E. V. KALININA

Perm National Research Polytechnical University, Perm, Russia

*The use of waste as secondary material resources (VMR) in the production of new goods helps to resolve environmental problems. One of the unsolved problems remains the choice of a priority commodity product in the case when waste can be used as a VMR in the production of several types of goods. The article presents the indicators of environmental and economic assessment of the use of VMR and the results of the assessment of the use of soda production waste in the production of silicate bricks and meliorant*

**Keywords:** secondary material resources, waste of soda production, sand-lime brick, meliorant.

Bibliography — 21 references.

*Received May 8, 2020*

УДК 666.7

## Применение отходов гальванического производства для получения термически и химически стойкой керамики

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

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

*Приведены результаты разработки состава шихты на основе малопластичной глины с добавлением 5 масс. % гальванического шлама, 5 масс. % борной кислоты и 5 масс. % оксида циркония для получения термостойкой, химически стойкой керамики. Разработанный состав шихты обеспечивает жидкофазное спекание с получением стекловидной фазы на основе боросиликатов и бороалюмосиликатов, в которой оксиды цинка, хрома и кальция, образующиеся из гальванического шлама, и оксид циркония являются функциональными добавками. Представлены результаты исследования зависимости кислотостойкости, щелочестойкости, термостойкости и экологической безопасности разрабатываемой керамики от содержания гальванического шлама и оксида циркония в составе шихты. Применение разработанного состава расширит ассортимент специальных облицовочных и футеровочных керамических изделий, позволит использовать маловостребованную в керамической промышленности малопластичную глину и утилизировать опасный для окружающей среды гальванический шлам в производстве экологически безопасных изделий.*

**Ключевые слова:** гальванический шлам, кислотоупорная керамика, термостойкая керамика, самоглазурование, малопластичная глина, оксид циркония, борная кислота, экологическая безопасность.

Одним из важных направлений развития производства является утилизация отходов производства и потребления, что, с одной стороны, связано с необходимостью защиты окружающей среды от накопления и воздействия на нее отходов, а с другой — позволяет экономить первичные сырье и ресурсы, что также снижает антропогенное воздействие на окружающую среду и позволяет снизить себестоимость выпускаемой продукции. При этом важно, чтобы отходы применяли не как инертные наполнители сырьевых смесей, а как функциональные добавки, позволяющие повысить качество и значения эксплуатационных свойств выпускаемой продукции.

В решении задачи утилизации особого внимания заслуживают отходы с большими объемами и высо-

кими темпами накопления, маловостребованные отходы, для которых существующие технологии переработки отличаются трудоемкостью или экономически невыгодны, а также отходы, которые содержат вещества и соединения с высокими классами опасности. К этой категории относят отходы гальванического производства, представляющие собой отработанные электролиты и шламы, проблема утилизации которых (в первую очередь гальванических шламов) является одной из наиболее актуальных задач технологий утилизации промышленных отходов.

Актуальность указанной задачи связана с крупнотоннажностью машиностроительных, приборостроительных и химических производств, на которых в результате очистки сточных вод, промывных растворов и отработанных электролитов образуются большие объемы гальванических шламов. Так как гальванические шламы содержат большие количества тяжелых металлов и их соединений, которые относятся ко второму—четвертому классам опасности, они способны нанести серьезный ущерб окружающей среде. В связи с этим необходима утилизация гальванических шламов, которую проводят по одному из нескольких направлений. В первую очередь возможно выщелачивание тяжелых металлов и их соединений из гальванических шламов для их повторного использования в химическом производстве. Однако данное направление отличается трудоемкостью и длительностью [1]. Существуют технологии по ис-

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

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

Пикалов Евгений Сергеевич, доцент кафедры "Химические технологии".

E-mail: evgeniy-pikalov@mail.ru

Селиванов Олег Григорьевич, инженер-исследователь  
кафедры "Биология и экология".

E-mail: selivanov6003@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18 июня 2020 г.

© Уварова А. С., Виткалова И. А., Пикалов Е. С.,  
Селиванов О. Г., 2020



пользованию гальванических шламов в металлургических производствах в качестве легирующих добавок или в составе противопожарных красок и покрытий [2], но в данном случае затруднена утилизация шламов сложного состава. Возможны обезвреживание и стабилизация гальванических шламов методами ферритизации или остекловывания, однако данное направление не подразумевает использование продуктов переработки в производственных процессах (за исключением применения ферритизированных шламов в качестве сорбентов [3]), что не позволяет в должной мере экономить первичные ресурсы и приводит к необходимости утилизации уже продуктов переработки шламов. Наиболее перспективным способом, отличающимся простотой и низкой стоимостью, является использование гальванических шламов в производстве строительных материалов: стекла, керамики, гипсовых и асфальтовых смесей, бетонов и т. д. [4–6]. Однако в этом случае необходимо проводить санитарно-гигиенические исследования и обеспечивать экологическую безопасность получаемых материалов и изделий, что ограничивает объемы переработки гальванических шламов.

Разработка технологий получения экологически безопасных строительных материалов и изделий с использованием гальванических шламов является актуальной. Авторами данной работы ранее была получена кислотоупорная керамика на основе малопластичной глины, в которой гальванический шлам совместно с борной кислотой и оксидом лантана позволил получить эффект самоглазурования [6].

Цель данной работы — получение экологически безопасной керамики с высокими значениями химической стойкости и термостойкости с использованием гальванического шлама в качестве добавки и малопластичной глины в качестве основного компонента шихты.

#### Сырьевые материалы и методы исследования

Основу разрабатываемой шихты составляла глина Суворотского месторождения Владимирской области следующего состава (масс. %):  $\text{SiO}_2 = 67,5$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 10,75$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 5,85$ ;  $\text{CaO} = 2,8$ ;  $\text{MgO} = 1,7$ ;  $\text{K}_2\text{O} = 2,4$ ;  $\text{Na}_2\text{O} = 0,7$  [7, 8]. Число пластичности данной глины равно 5,2, поэтому в соответствии с ГОСТ 9169-75 она относится к малопластичным, а получаемые на ее основе без введения функциональных добавок изделия характеризуются низкой прочностью, высоким водопоглощением и трещинообразованием на поверхности и в объеме [9–11].

В качестве функциональных добавок для жидкофазного спекания и получения эффекта самоглазурования в состав разрабатываемой шихты совместно вводили гальванический шлам, представляющий собой продукт реагентной очистки сточных вод гальванических производств предприятия ОАО "Завод "Автоприбор" (г. Владимир), борную кислоту марки В 2-го сорта с содержанием основного вещества в количестве не менее 98,6 масс. % (ГОСТ 18704-78)

и оксид циркония марки ЦрО 2-го сорта с содержанием основного вещества в количестве не менее 99 масс. % (ГОСТ 21907-76).

В состав применяемого шлама входили следующие соединения (масс. %):  $\text{Zn(OH)}_2 = 11,3$ ;  $\text{SiO}_2 = 7,08$ ;  $\text{Ca(OH)}_2 = 16,52$ ;  $\text{Cr(OH)}_3 = 9,31$ ;  $(\text{Fe}^{2+})\text{Cr}_2\text{S}_4 = 4,17$ ;  $\text{CaCO}_3 = 40,25$ ;  $\text{CaO} = 3,45$ ;  $\text{ZnO} = 2,41$ ;  $\text{Cu(OH)}_2 = 2,38$ ;  $\text{Ni(OH)}_2 = 2,62$ ;  $\text{Mn(OH)}_2 = 0,64$ ;  $\text{Pb(OH)}_2 = 0,14$  [5, 6].

Для получения образцов разрабатываемой керамики глину и гальванический шлам предварительно высушивали до постоянной массы и измельчали с отбором фракции с размером частиц не более 0,63 мм. После этого все компоненты шихты перемешивали вначале в сухом состоянии, а затем с добавлением 8 масс. % воды до получения однородной массы, из которой при давлении прессования 15 МПа и максимальной температуре обжига 1050 °С получали образцы керамики. Для определения каждого свойства для всех исследуемых составов шихты готовили серии по три образца.

У образцов по стандартным для керамических материалов методикам определяли кислотостойкость (КС, %), щелочестойкость (ЩС, %), термостойкость (ТС (1000 °С — вода), теплосмены), прочность на сжатие ( $\sigma_{\text{сжат}}$ , МПа) и изгиб ( $\sigma_{\text{изг}}$ , МПа), водопоглощение (В, %) и морозостойкость (М, циклы).

Экологическую безопасность разрабатываемой керамики оценивали по методике определения токсичности суточных водных вытяжек из образцов со сколами по смертности дафний *Daphnia magna* Straus [12].

#### Результаты экспериментов и их обсуждение

На первом этапе экспериментальных исследований была определена зависимость химической стойкости и термостойкости от содержания гальванического шлама и оксида циркония в составе шихты. Содержание борной кислоты в составе шихты выбрано равным 5 масс. %, т. к. при ранее проведенных авторами данной работы экспериментах установлено, что при больших количествах борной кислоты наблюдается избыток стекловидной фазы, приводящий к потере формы образцами, и экологическая безопасность для составов с гальваническим шламом не обеспечивается, а при меньших количествах борной кислоты — стекловидной фазы недостаточно для формирования интенсивного самоглазурования при жидкофазном спекании, что не обеспечивает эксплуатационных свойств керамики и иммобилизации большого количества тяжелых металлов [5, 6].

Как следует из представленных рис. 1 и рис. 2, гальванический шлам в количествах до 5 масс. % способствует повышению кислотостойкости и щелочестойкости разрабатываемой керамики, а при более высоких содержаниях данной добавки рассматриваемые свойства начинают снижаться. При этом повышение количества циркония в составе шихты до 7,5 масс. % также способствует повышению рассматриваемых свойств керамики.

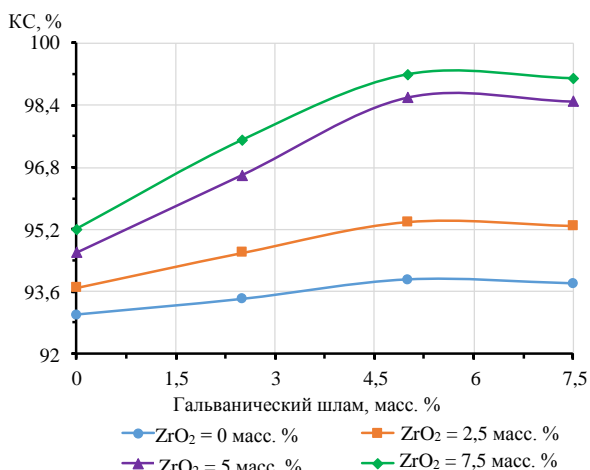


Рис. 1. Зависимость кислотостойкости разрабатываемой керамики от содержания гальванического шлама и оксида циркония

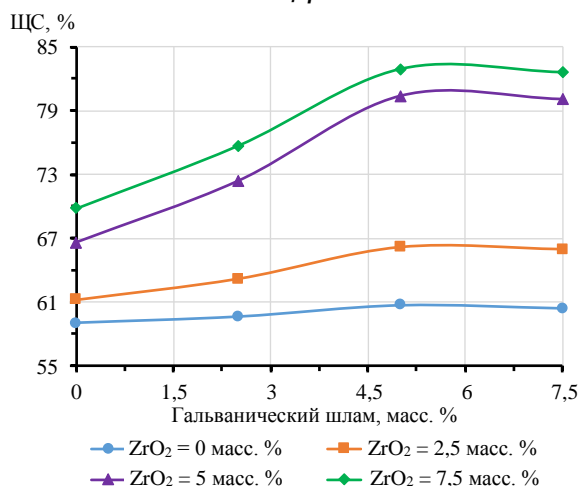


Рис. 2. Зависимость щелочестойкости разрабатываемой керамики от содержания гальванического шлама и оксида циркония

Это объясняется тем, что введение борной кислоты в количестве 5 масс. % способствует эффективному жидкофазному спеканию, в результате которого в материале образуется стекловидная фаза на основе боросиликатов и бороалюмосиликатов, покрывающая частицы керамики. В результате возникают эффекты остекловывания частиц и самоглазурования поверхности образцов. Известно, что оксиды кремния и алюминия формируют химически стойкую стекловидную фазу, которая защищает частицы керамики от контакта с агрессивными средами и переводит большинство открытых пор в закрытые, препятствуя проникновению жидких сред в объем образцов. Оксид бора может снизить химическую стойкость, если его содержание превысит 11–13 % [13, 14], однако в разрабатываемом составе его количество значительно ниже.

Входящие в состав гальванического шлама в наибольшем количестве соединения цинка, хрома и кальция являются источниками оксидов этих элементов, которые входят в состав стекловидной фазы и дополнительно повышают значения ее кислотостойкости и щелочестойкости [15, 16], а оксид кальция, который не только образуется из гальванического шлама, но и входит в состав глины, является плав-

нем и совместно с борной кислотой способствует жидкофазному спеканию с образованием стекловидной фазы. Снижение химической стойкости при введении свыше 5 масс. % гальванического шлама связано с тем, что входящие в состав шлама гидроксиды и карбонаты разлагаются во время обжига с образованием водяных паров и диоксида углерода, повышающих пористость материала и нарушающих сплошность слоя глазури на поверхности образцов и целостность каркаса из частиц керамики, соединенных между собой через слои стекловидной фазы. Повышение открытой пористости способствует проникновению в объем материала агрессивных сред и увеличению площади контакта с ними.

Оксид циркония, который также входит в состав стекловидной фазы, способствует значительному повышению химической стойкости, особенно против воздействия щелочей [14, 17], стекловидной фазы и керамического материала в целом. Из экспериментальных данных видно, что при введении оксида циркония свыше 5 масс. % свойства материала меняются незначительно и наблюдается избыток стекловидной фазы, приводящий к потере формы образцами.

Как следует из данных, представленных на рис. 3, зависимость термостойкости разрабатываемой керамики от количеств гальванического шлама и оксида циркония, вводимых в шихту, носит схожий характер с зависимостью для химической стойкости. Это объясняется тем, что стекловидная фаза на основе боросиликатов и алюмосиликатов, модифицированная оксидами цинка, хрома и кальция, отличается и высокой термостойкостью [15, 16]. Присутствие оксида циркония в составе стекловидной фазы также повышает ее термостойкость за счет крайне малого коэффициента термического расширения [17]. Снижение термостойкости керамики при содержании гальванического шлама в количестве свыше 5 масс. % объясняется тем, что порообразующее действие данной добавки способствует проникновению воды в образцы при проведении испытаний.

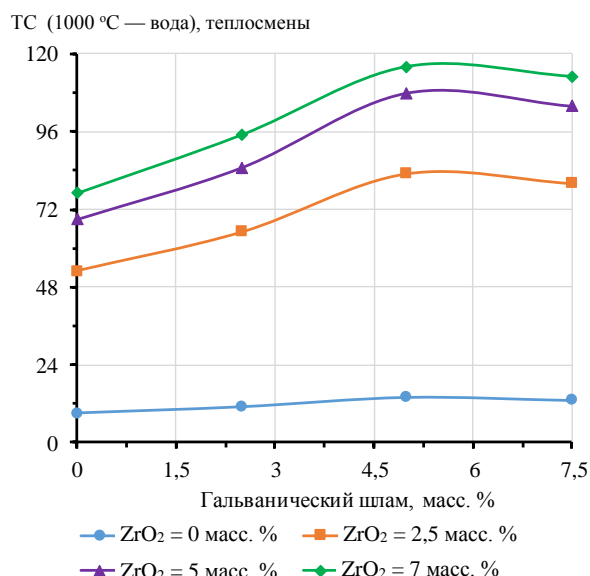


Рис. 3. Зависимость термостойкости разрабатываемой керамики от содержания гальванического шлама и оксида циркония

На втором этапе экспериментальных исследований была оценена токсичность водных вытяжек из образцов со шихты для всех рассмотренных на первом этапе составов шихты (см. рис. 4). В результате установлено, что для всех исследуемых составов шихты наблюдается превышение безвредных концентраций веществ в водных вытяжках, что проявляется в гибели более 10 % тест-организмов и объясняется токсичностью как тяжелых металлов и их соединений, так и токсичностью борной кислоты и оксида циркония, относящихся к 3-му классу опасности. Из полученных данных также видно, что для состава без оксида циркония наблюдается наибольшая токсичность, что объясняется недостатком стекловидной фазы, которая иммобилизует токсичные вещества. Токсичность также повышается с увеличением количества гальванического шлама и оксида циркония. Экологически безопасными можно считать составы, в которых количество гальванического шлама и оксида циркония не превышает 5 масс. %.

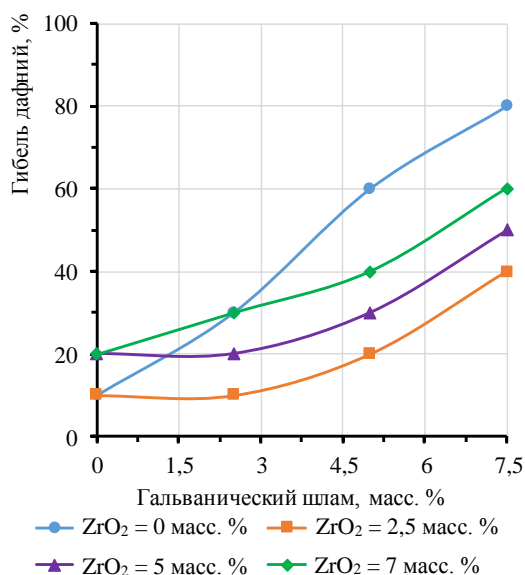


Рис. 4. Смертность дафний за 96 ч в суточных водных вытяжках из образцов

В связи с этим на третьем этапе экспериментальных исследований были определены основные физико-химические показатели разрабатываемой керамики на основе состава, включающего 5 масс. % гальванического шлама и 5 масс. % оксида циркония (см. таблицу).

Свойства химически и термически стойкой керамики

КС, %	ЩС, %	ТС (1000 °С — вода), тепло-смены	σ <sub>сжат</sub> , МПа	σ <sub>из</sub> , МПа	В, %	М, циклы
98,6	80,4	108	33,1	15,2	2,5	51

Как следует из полученных данных, разработанный состав шихты позволяет получить керамику с высокими значениями химической стойкости, соответствующей требованиям для термостойкой плитки по ГОСТ 961-89 (КС не менее 97—99 %), клинкерного кирпича по ГОСТ 530-2012 (КС не менее 95 %) и кислотоупорного кирпича по ГОСТ 474-90 (КС

не менее 95—97,9 %), и термостойкостями, превосходящими требования ГОСТ 961-89 (ТС (350 °С — вода) не менее 2—10 теплосмен) и ГОСТ 474-90 (ТС (350 °С — вода) не менее 2-3 теплосмен). По прочности, водопоглощению и морозостойкости разработанный материал соответствует средним значениям для лицевых и облицовочных керамических изделий.

### Заключение

В результате исследований разработан состав шихты на основе малопластичной глины, в который в качестве добавок вводят 5 масс. % гальванического шлама, 5 масс. % оксида циркония и 5 масс. % борной кислоты. Совместное введение данных добавок в указанных количествах обеспечивает жидкофазное спекание керамики при обжиге с получением боросиликатной и бороалюмосиликатной стекловидной фазы, покрывающей частицы керамики и формирующей слой глазури на поверхности образцов материала. Оксиды цинка, хрома и кальция, образуемые при обжиге из гальванического шлама, и оксид циркония выступают в роли модификаторов стекловидной фазы, повышают ее химическую стойкость и термостойкость. Кроме того, полученный материал отличается высокими значениями прочности и морозостойкости при низком значении водопоглощения.

Разработанный состав шихты позволяет использовать маловостребованную в керамическом производстве глину с низкой пластичностью и утилизировать гальванический шлак — опасный для окружающей среды отход, переработка которого является трудоемкой и энергоемкой задачей.

Данный состав шихты можно применять для получения термически и химически стойких керамических материалов, преимущественно для производства футеровочных и облицовочных изделий промышленного и бытового назначения, которые можно эксплуатировать при высоких температурах, в условиях перепадов температур и в контакте с агрессивными, коррозионными средами.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ярынкина Е. А., Бузаева М. В., Гусарова В. С., Климов Е. С. Избирательное извлечение тяжелых металлов из гальванических шламов комплексами // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Химия. 2019. № 4. С. 57—65.
2. Коровин В. А., Романов А. С., Леушин И. О., Курилина Т. Д. Утилизация шламов гальванического производства // Литейные процессы. 2013. № 12. С. 226—233.
3. Семенов В. В., Подольская З. В., Бузаева М. В., Климов Е. С. Сорбционная очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов с использованием гальваношламов // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2009. № 6. С. 99—101.
4. Мальцева И. В. Об использовании шламо-отходов при производстве строительных материалов // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2. С. 157 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ivdon.ru/rui/magazine/archive/N2y2018/4880>
5. Воробьева А. А., Шахова В. Н., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г., Сысоев Э. П., Чухланов В. Ю. Получение облицовочной керамики с эффектом остекловывания на основе малопластичной глины и техногенного отхода Владимирской области // Стекло и керамика. 2018. № 2. С. 13—17.
6. Виткалова И. А., Торлова А. С., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Использование отходов, содержащих тяжелые металлы, для получения кислотоупорной керамики с эффектом самоглазурования // Экология промышленного производства. 2018. № 2. С. 2—6.

7. Перовская К. А., Петрина Д. Е., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Применение полимерных отходов для повышения энергоэффективности стеновой керамики // Экология промышленного производства. 2019. № 1. С. 7—11.
8. Шахова В. Н., Березовская А. В., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г., Сысоев Э. П. Разработка облицовочного керамического материала с эффектом самоглазурования на основе малопластичной глины // Стекло и керамика. 2019. № 1. С. 13—18.
9. Шахова В. Н., Виткалова И. А., Торлова А. С., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Получение облицовочной керамики с использованием несортированного боя тарных стекол // Экология и промышленность России. 2019. № 2. С. 36—41.
10. Торлова А. С., Виткалова И. А., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Разработка энергоэффективной облицовочной керамики на основе местного сырья и стекольного боя // Экология промышленного производства. 2019. № 3. С. 22—26.
11. Виткалова И. А., Торлова А. С., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Применение полимерных и стекольных отходов для полу-

чения самоглазующейся облицовочной керамики // Экология и промышленность России. 2019. № 11. С. 38—42.

12. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодородности дафний. Федеральный реестр ФР.1.39.2007.03222 [Электронный ресурс]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293842/4293842234.pdf>

13. Поляков К. А., Сломянская Ф. Б., Полякова К. К. Коррозия и химически стойкие материалы. — М.-Л.: Госхимиздат, 1953. — 362 с.

14. Блюмен Л. М. Глазури. — М.: Гос. изд-во литературы по строительным материалам, 1954. — 172 с.

15. Храмов В. П., Чугунов Е. А. Материалы для производства и обработки стекла и стеклоизделий. — М.: Высшая школа, 1987. — 104 с.

16. Беленький Е. Ф., Рискин И. В. Химия и технология пигментов. Изд. 3, перераб. и доп. — Л.: Госхимиздат, 1960. — 757 с.

17. Глинка Н. Л. Общая химия. Изд. 30, испр. — М.: Интеграл-Пресс, 2003. — 728 с.

## Application of waste from electroplating production for the producing of thermally and chemically resistant ceramics

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

*This article presents the research results on the development of the composition of the charge based on low-plastic clay with the addition of 5 wt. % of galvanic sludge, 5 wt. % boric acid and 5 wt. % zirconium oxide for heat-resistant, chemically resistant ceramics. The developed composition of the charge provides liquid-phase sintering to produce a glassy phase based on borosilicates and boroalumosilicates, in which zinc, chromium and calcium oxides formed from galvanic sludge and zirconium oxide are functional additives. The paper presents the research results of the dependence of acid resistance, alkali resistance, heat resistance and environmental safety of the developed ceramics on the content of galvanic sludge and zirconium oxide in the charge. The use of the developed composition expands the range of special facing and lining ceramic products, allows you to use low-demand in the ceramic industry low-plastic clay and dispose of environmentally hazardous galvanic sludge in the production of environmentally friendly products.*

**Keywords:** galvanic sludge, acid-resistant ceramics, heat-resistant ceramics, self-glazing, low-plastic clay, zirconium oxide, boric acid, environmental safety.

Bibliography — 17 references.

Received June 18, 2020

УДК 691.574:66.013

## Использование отходов топливно-энергетического комплекса и фосфорного производства в производстве керамического кирпича

С. А. СТЕЦЕНКО

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

В. З. АБДРАХИМОВ, д-р техн. наук

Самарский государственный экономический университет, г. Самара, Россия

*Проведенные исследования показали, что наиболее вредные отходы — это отходы топливно-электроэнергетического комплекса, которые являются одними из основных «загрязнителей» окружающей природной среды: выбросы в атмосферу (48 % всех выбросов в атмосферу); сбросы сточных вод (36 % всех сбросов), а также образование твердых отходов (30 % всех твердых загрязнителей). Доказано, что использование отходов топливно-энергетического комплекса (межсланцевой глины в качестве связующего и золошлакового материала в качестве выгорающей добавки и отощителя), а также отходов фосфорного производства (фосфорного шлака в качестве кальцийсодержащего отощителя) позволяет получить керамический кирпич с высокими физико-механическими показателями без применения природных традиционных материалов. Использование отходов топливно-энергетического комплекса и фосфорного производства — один из эффективных способов экономии природных материалов, при этом одновременно происходит утилизация побочных продуктов и вносится вклад в охрану окружающей среды.*

**Ключевые слова:** отходы производства, межсланцевая глина, золошлаковый материал, фосфорный шлак, керамический кирпич.

### Экологическая ситуация

Принимая во внимание рост накопления загрязнений, следует ожидать, что в дальнейшем загрязнение будет делаться все более опасным и это неблагоприятно скажется на здоровье людей и состоянии окружающей природной среды [1—4]. Под действием антропогенных факторов природная ситуация катастрофически быстро меняется [5—7].

Развитие производств и их технологий, науки и военной техники, воздействуя на Землю в целом и на ее отдельные ресурсы, нарушая законы природы, ведет к негативным последствиям [8—10]. Такое взаимодействие человека и планеты, скорее всего, приведет к катастрофе, поэтому проблемы экологии должны занимать ведущее место в мире [11—13].

В законодательстве стран Евросоюза, США, Канады, Австралии, новой Зеландии понятие "окружающая среда" включает в себя человека, природную

среду, промышленные объекты, транспортные средства, здания и сооружения. Поэтому законодательство об окружающей среде в этих странах рассматривает риски для здоровья человека, природной среды и все риски, связанные с промышленной деятельностью и промышленной продукцией [14—17].

Наиболее вредные отходы — это отходы топливно-электроэнергетического комплекса, которые являются одними из основных "загрязнителей" окружающей природной среды: выбросы в атмосферу (48 % всех выбросов в атмосферу); сбросы сточных вод (36 % всех сбросов); образование твердых отходов (30 % всех твердых загрязнителей) [18—20].

Уровень утилизации золошлаковых материалов (ЗШМ) в России составляет около 3—4 %, в ряде развитых стран — более 50 %, во Франции и Германии — 65...70 %, а в Финляндии — около 85...90 % их текущего выхода [21—25]. В этих странах проводят государственную политику, стимулирующую их использование.

Абзац Федерального закона от 29 декабря 2014 г. № 458-ФЗ в редакции: "утилизация отходов — использование отходов для производства товаров (продукции), выполнения работ, оказания услуг, включая повторное применение отходов, в том числе повторное применение отходов по прямому назначению (рециклинг), их возврат в производственный цикл после соответствующей подготовки (регенерация), а также извлечение полезных компонентов для

---

**Стеценко Сергей Александрович**, заведующий лабораторией "Рентгеновская дифрактометрия, электронная и зондовая микроскопия" центра коллективного пользования.  
E-mail: 3375892@mail.ru

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

Статья поступила в редакцию 9 января 2020 г.

© Стеценко С. А., Абдрахимов В. З., 2020

их повторного применения (рекуперация)", введенный в действие с 1 января 2015 г., кардинально не улучшил экологическую ситуацию в России.

Экологическая ситуация в России характеризуется высоким уровнем антропогенного воздействия на окружающую среду и значительными отрицательными экологическими последствиями экономической деятельности.

Более 50 % городского населения в 40 субъектах Российской Федерации находится под воздействием очень высокого загрязнения атмосферного воздуха, который негативно действует на здоровье человека. В преамбуле устава Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) отмечено, что здоровье человека — это состояние полного физического, духовного и социального благополучия, а не только отсутствие болезней или физических дефектов. Практически во всех регионах России сохраняется тенденция к ухудшению состояния не только атмосферного воздуха, но и почв и земель. Кроме того, интенсивно развиваются процессы, ведущие к потере плодородия сельскохозяйственных угодий и к выводу их из хозяйственного оборота. Социальная востребованность заботы о состоянии окружающей среды переносит центр социального недовольства в устрашающую тематику климатического "конца света".

*Цель работы* — показать возможность обеспечения экологической безопасности при расширении сырьевой базы производства керамических материа-

лов массового производства — кирпича — за счет применения многотоннажных продуктов техногенного происхождения (межсланцевой глины, золошлакового материала и фосфорного шлака); дать обоснование сырьевой ценности используемых крупнотоннажных отходов техногенного происхождения, сохраняя окружающую среду, утилизируя промышленные отходы и расширяя сырьевую базу для строительных материалов.

### Техногенные отходы, используемые в качестве сырьевых материалов

*Сырьевые материалы.* В качестве связующего (глинистого материала) для получения керамического кирпича использовали *межсланцевую глину*, которая образуется при добыче горючих сланцев на сланцеперерабатывающих заводах (на шахтах) и является отходом горючих сланцев. По числу пластичности межсланцевую глину относят к среднепластичному глинистому сырью (число пластичности 20—25) с истинной плотностью 2,55—2,62 г/см<sup>3</sup> [9, 10, 12, 16, 26—28]. Химические составы межсланцевой глины представлены: оксидный — в табл. 1, поэлементный — в табл. 2, гранулометрический (фракционный) — в табл. 3, технологические — в табл. 4, а микроструктура — на рис. 1, а.

Таблица 1

Химический состав исследуемых компонентов

Компонент	Содержание оксидов, масс. %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	R <sub>2</sub> O	п.п.п.
<b>В качестве глинистого компонента</b>							
Межсланцевая глина	45,4	13,87	5,6	11,3	2,3	3,5	18,03
<b>В качестве выгорающей добавки</b>							
Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС	49,5	16,2	7,8	3,4	2,3	1,5	19,3
<b>В качестве кальцийсодержащего отощителя</b>							
Фосфорный шлак	43,8	1,8	0,73	48,4	1,45	0,42	2,48

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

Таблица 2

Поэлементный химический состав компонентов

Компонент	Элементы									
	C	O	Na	Mg	Al + Ti	Si	S	K	Ca	Fe
<b>В качестве глинистого компонента</b>										
Межсланцевая глина	5,73	51,06	0,46	1,04	7,20	18,66	1,83	1,75	10,53	3,35
<b>В качестве выгорающей добавки</b>										
Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС	6,4	51,08	1,09	0,40	10,5 + 1,44	18,44	1,1	1,5	3,03	4,02

Таблица 3

Фракционный состав компонентов

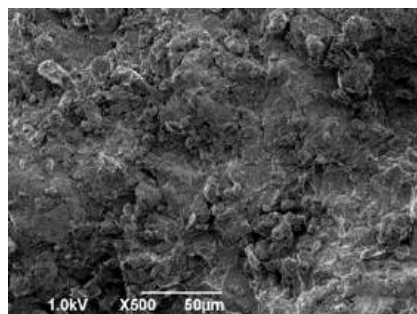
Компонент	Содержание фракций, % (размер частиц в мм)				
	>0,063	0,063—0,01	0,01—0,005	0,005—0,001	<0,0001
<b>В качестве глинистого компонента</b>					
Межсланцевая глина	5	7	12	14	62
<b>В качестве выгорающей добавки</b>					
Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС	18,39	33,70	33,8	10,7	3,41



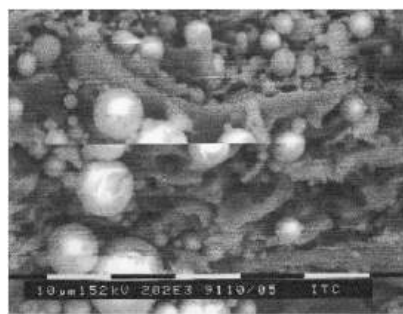
Таблица 4

Технологические показатели компонентов

Компонент	Теплотворная способность, ккал/кг	Огнеупорность, °С		
		начало деформации	размягчение	жидкоплавкое состояние
Межсланцевая глина	1100	1260	1290	1320
Золошлаковый материал Тольяттинской ТЭС	2100	1300	1300	1390



а



б



в

Рис. 1. Микроструктура исследуемых отходов:

а — межсланцевая глина; б — золошлаковый материал; в — фосфорный шлак

В качестве отощителя и выгорающей добавки использовали золошлаковый материал [5, 19—21, 23]. Химический оксидный состав золошлакового материала представлен в табл. 1, поэлементный — в табл. 2, гранулометрический (фракционный) — в табл. 3, технологические свойства — в табл. 4, а микроструктура и минералогический состав — на рис. 1, б.

Отощители используют в технологии керамики в качестве сырьевых, практически не имеющих усадки материалов и поэтому снижающих усадку кирпича при сушке. Отощители — непластичные материалы (кварц, кварцевый песок), которые регулируют пластичность шихты, сокращают усадку изделий при сушке и обжиге, формируют структуру черепка при обжиге.

Для уменьшения усадки керамических изделий при сушке и обжиге в массу вводят искусственные или естественные отошающие материалы. К искусственным отошающим материалам относятся дегидратированная глина и шамот, получающиеся путем обжига глины. Естественными отошителями являются кварцевые материалы (кварц, кварцевые пески, кремнь, пылевидный кварц и т. п.).

В работе использовали золошлаковый материал (смесь золы и шлака) в качестве отощителя и в качестве выгорающей добавки.

К группе выгорающих добавок относятся различные виды твердого топлива, в частности антрацит, коксовая мелочь и т. д. Их вводят в состав шихты до 3 % по объему, т. е. до 60—80 % от общей потребности топлива на обжиг изделий. Назначение их — интенсифицировать процесс обжига, улучшить спекаемость массы и тем самым повысить прочность изделий.

Выгорающие добавки не только повышают пористость керамических изделий, но также способствуют равномерному спеканию внутри керамического черепка. При выгорании органической добавки выделяется небольшое количество сопутствующих газов, что приводит к уплотнению стенок вокруг каждой частички, а в итоге повышается прочность всего изделия.

Минералогический состав золошлакового материала представлен следующими минералами, масс. %:

аморфизованное глинистое вещество — 10...20; органика — 20...25; стекловатые шарики — 45...65; кварц, полевошпат — 5...15; кальцит — 3...5; гидрогранаты, муллит, оксиды железа — 5...10; примеси — 3...7. Благодаря повышенному содержанию органики золошлаковый материал можно использовать в производстве керамических материалов и в качестве выгорающей добавки.

С помощью высокотемпературного микроскопа МБС-2 определены температуры начала плавления (1300 °С) и полного плавления золы (1390 °С).

Содержание углерода и теплотворная способность Тольяттинского золошлака определены согласно ГОСТ 147-84. В исследуемой золе  $C_a$  (углерода) 6—8 %; теплотворная способность  $\theta_p^H = 21001800$  ккал/кг (табл. 4).

Около 65—70 % золошлаковых материалов характеризуются высоким содержанием несгоревших остатков угля [5, 19—21, 23], суммарное количество которого может удовлетворить потребность производства керамического кирпича в топливе более чем на 50 %. Использование золошлакового кирпича в производстве керамического кирпича способствует утилизации побочных продуктов и вносит вклад в охрану окружающей среды.

Особый интерес представляют практически не встречаемые в литературе сведения, касающиеся использования в керамическом кирпиче кальцийсодержащего фосфорного шлака (табл. 1) [29—32].

Как видно из табл. 1, фосфорный шлак имеет повышенное содержание оксида кальция ( $CaO = 48,4$  %).

Как известно,  $CaO$ , несмотря на высокую температуру плавления, в глиносодержащих массах является сильным плавнем вследствие образования с  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$  сравнительно легкоплавких соединений [33, 34]. По данным авторов работы [33], при температурах около 1000 °С взаимодействие между  $CaO$  и глинистыми веществами еще незначительно. При более высоких температурах реакция интенсифици-

руется и образуются уплотняющие легкоплавкие соединения, эвтектики и стекла.

Использование отходов фосфорного производства — один из эффективных способов экономии природных материалов. При этом одновременно происходит утилизация побочных продуктов и вносится вклад в охрану окружающей среды. В табл. 5 представлен фракционный состав фосфорного шлака, в табл. 6 — поэлементный, а на рис. 1, в — микроструктура.

Таким образом, использование отходов топливно-энергетического комплекса — межсланцевой глины — в качестве связующего, золошлакового материала — в качестве выгорающей добавки и отощителя, а фосфорного шлака в качестве кальцийсодержащего отощителя позволяет получить керамический кирпич с высокими физико-механическими показателями (М150) без применения природных традиционных материалов.

Таблица 5

Фракционный состав фосфорного шлака

Компонент	Содержание фракций, % (размер частиц в мм)						
	>5	2,5—5	1,25—2,5	0,63—1,25	0,315—0,63	0,14—0,315	<0,14
Фосфорный шлак	0,7	18,2	30,8	18,2	13,2	9,5	9,4

Таблица 6

Поэлементный анализ фосфорного шлака

Компонент	Концентрация, масс. %				
	O	Si	P	K	Ca
Фосфорный шлак	44,46	6,74	0,56	0,35	47,89

**Технология производства.** Для получения керамического кирпича использовали оптимальный состав, масс. %:

межсланцевая глина	60
фосфорный шлак	25
золошлаковый материал	15

Керамическую массу готовили пластическим способом при влажности шихты 18—22 %. Сформированный кирпич, высушенный до остаточной влажности не более 8 %, обжигали при температуре 1050 °С. Полученный кирпич имел марку М150. На рис. 2 представлена предлагаемая технология для производства керамического кирпича.



Рис. 2. Технология производства керамического кирпича

## Выводы

Получен керамический кирпич с высокими физико-механическими показателями (М150) без применения природных традиционных материалов с использованием отходов топливно-энергетического комплекса — межсланцевой глины в качестве связующего, золошлакового материала — в качестве выгорающей добавки и отощителя, а фосфорного шлака — в качестве кальцийсодержащего отощителя.

Безусловным достоинством использования много-тоннажных отходов топливно-энергетического комплекса и фосфорного шлака является то, что оно способствует решению следующих задач:

- утилизация промышленных отходов способствует охране окружающей среды;
- учитывая, что природные сырьевые ресурсы истощены, способствует вовлечению техногенных образований в производственный оборот для производства строительных материалов;
- освобождению значительных земельных участков от воздействия негативных антропогенных факторов и рациональному использованию ингредиентов промышленных отходов на объектах стройиндустрии;
- снижению стоимости строительных материалов;
- рациональному природопользованию за счет вовлечения отходов в производство керамических материалов;
- использованию накопленных и вырабатываемых отходов производства;
- снижению экологической напряженности в России;
- охране окружающей среды, расширению сырьевой базы для получения строительных материалов;
- исключению затрат на геологоразведочные работы, на строительство и эксплуатацию карьеров;
- снижению поступления в водную экосистему за счет атмосферных осадков тяжелых металлов, содержащихся в отходах теплоэнергетики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Использование электроплавильного шлака в производстве керамического кирпича и жаростойких бетонов // Экология промышленного производства. 2016. № 2. С. 3—7.
2. Ильина Ж. П., Абдрахимов В. З., Кайракбаев А. К., Рошупкина И. Ю. Экологические и экономические аспекты использования многотоннажных отходов топливно-энергетического комплекса в производстве керамического кирпича бетонов // Экология промышленного производства. 2018. № 3. С. 7—14.
3. Абдрахимов В. З., Пичкуров С. Н., Абдрахимова Е. С., Абдрахимова И. Д. Снижение нанесения экологического ущерба биосфере в целом за счет использования отходов энергетики и цветной металлургии в производстве керамического кирпича // Экология промышленного производства. 2017. № 1. С. 2—7.
4. Абдрахимов В. З. Вопросы экологии и утилизации отходов в производстве керамических композиционных материалов. — Самара: Самарская академия государственного и муниципального управления. 2010. — 160 с.
5. Ильина Ж. П., Абдрахимов В. З. Использование отхода топливно-энергетической промышленности — золошлакового материала — в производстве пористого заполнителя на основе жидко-стекольной композиции // Экология промышленного производства. 2018. № 4. С. 16—22.
6. Абдрахимов В. З. Использование отходов от производства минеральной ваты для получения стеновых материалов // Экология промышленного производства. 2019. № 2. С. 9—12.
7. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Снижение экологического ущерба экосистемам за счет использования отходов горючих сланцев в производстве теплоизоляционных материалов // Экология промышленного производства. 2016. № 3. С. 18—24.
8. Абдрахимов В. З. Использование шламов флотационного углеобогащения в производстве пористости заполнителя на основе жидкого стекла // Экология промышленного производства. 2019. № 4. С. 25—29.
9. Абдрахимов Д. В., Абдрахимов В. З. Качественное школьное образование по экологии способствует экологической безопасности // Территория инноваций. 2019. № 3. С. 47—51.
10. Абдрахимов В. З., Абдрахимов Д. В. Школьное образование и экология // Вестник Прикамского социального института. 2019. № 2. С. 60—69.
11. Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З. Использование отходов цветной металлургии в производстве кислотоупоров без применения природного традиционного сырья безопасности // Экология промышленного производства. 2014. № 2. С. 13—16.
12. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Керамические стеновые материалы на основе обожженного шлама щелочного травления алюминия и межсланцевой глины // Экология промышленного производства. 2015. № 3. С. 8—11.
13. Кайракбаев А. К., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Исследование регрессивным методом зависимости отходов топливно-энергетической промышленности на сушильные свойства стеновой керамики // Экология промышленного производства. 2015. № 1. С. 6—10.
14. Ильина Ж. П., Абдрахимов В. З., Кайракбаев А. К., Абдрахимова Е. С. Снижение экологического кризиса экосистем за счет использования нефтяного отвального шлама и шлака от выплавки ферротитана в производстве жаростойких бетонов // Экологические системы и приборы. 2017. № 10. С. 21—32.
15. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Снижение экологического ущерба экосистемам за счет использования отходов горючих сланцев в производстве легковесного кирпича и пористого заполнителя // Экологическая химия. 2017. Т. 26. № 4. С. 190—197.
16. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Исследование методом ЯГР-спектроскопии оксидов железа в керамическом кирпиче на основе межсланцевой глины и отходов обогащения бурового угля // Вестник СПбГУ. Физика и химия. 2017. Т. 4. (62). Вып. 2. С. 117—125.
17. Лобачев Д. А., Абдрахимов В. З., Шоршнева М. Г. Совершенствование экологического образования как условие развития "зеленой" экономики // Инновационные проекты и программы в образовании. 2017. № 2. С. 27—33.
18. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С., Кайракбаев А. К. Использование отходов топливно-энергетического комплекса в производстве теплоизоляционных материалов на основе жидко-стекольных композиций. — Актобе: Казахско-Русский международный университет. 2016. — 140 с.
19. Лобачев Д. А., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С., Пичкуров С. Н. Использование золошлакового материала и отходов золоторудного месторождения в производстве керамического кирпича // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2016. № 4. С. 31—38.
20. Шевандо В. В., Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С., Абдрахимов А. В., Вдовина Е. В. Влияние золошлакового материала на свойства кирпича // Экология и промышленность России. 2009. № 3. С. 30—32.
21. Абдрахимов В. З., Ильина Т. А. Использование золошлакового материала в производстве пористого заполнителя способствует развитию "зеленой" экономики и транспортно-логической инфраструктуры // Уголь. 2019. № 11. С. 59—63.
22. 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.
23. 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.
24. Абдрахимов В. З. Влияние фазового состава на морозостойкость керамического кирпича на основе бейделлитовой глины и золошлакового материала // Изв. вузов. Строительство. 2019. № 3. С. 41—49.
25. 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.
26. Колпаков А. В., Абдрахимов В. З. Использование аморфного шлака от сжигания угля и межсланцевой глины в производстве кирпича без применения природных традиционных материалов // Башкирский химический журнал. 2014. Т. 21. № 1. С. 48—50.
27. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Использование шлака от сжигания угля Канско-Ачинского бассейна в производстве керамических материалов на основе межсланцевой глины // Экология и промышленность России. 2014. № 3. С. 36—39.
28. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Экологические и практические аспекты использования шлака от сжигания угля в производстве керамических материалов на основе межсланцевой глины // Уголь. 2014. № 4. С. 41—43.
29. Ковков И. В., Абдрахимов В. З. Исследование электронно-микроскопическим методом анализа фазового состава керамического кирпича, полученного из бейделлитовой глины, золошлака и фосфорного шлака при различных температурах обжига // Башкирский химический журнал. 2008. Т. 15. № 2. С. 78—79.
30. Ковков И. В., Абдрахимов В. З. Использование фосфорного шлака в производстве кирпича // Экология и промышленность России. 2008. № 11. С. 10—11.
31. Ковков И. В., Абдрахимов В. З. Влияние фазового состава на морозостойкость керамического кирпича на основе бейделлитовой глины, фосфорного шлака и золошлакового материала // Башкирский химический журнал. 2008. Т. 15. № 3. С. 79—81.
32. Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З., Ковков И. В. Физико-химические процессы при различных температурах обжига керамического кирпича на основе бейделлитовой глины, фосфорного шлака и золошлака // Изв. Самарского научного центра РАН. 2009. № 5. С. 24—31.
33. Рохваргер Е. Л., Белопольский М. С., Добужинский В. И., Красноусова А. С., Хиж А. Б. Новая технология керамических плиток. — М.: Стройиздат, 1977. — 228 с.
34. Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Технология стеновых материалов и изделий. — Самара. Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2005. — 194 с.

## The use of waste fuel and energy complex and phosphorus production in the production of ceramic bricks

S. A. STETSENKO

Samara State Technical University, Samara, Russia

V. Z. ABDRAKHIMOV

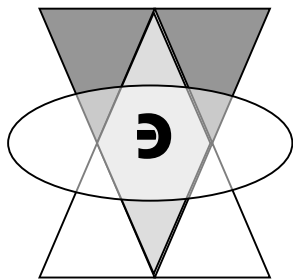
Samara State University of Economics, Samara, Russia

*Studies show that most hazardous waste — is the waste of the fuel and power complex, which is one of the main "pollutants" of the environment: emissions (48 % of all emissions); wastewater discharges (36 % of all discharges) and solid waste generation (30 % of all solid contaminants). The article shows that the use of waste: fuel and energy complex - interslane clay as a binder and ash-slag material as a burnout additive and a desiccant; waste of phosphoric production - phosphoric slag as a calcium-containing desiccant allows you to get a ceramic brick with high physical and mechanical properties without the use of natural traditional materials. The use of waste from the fuel and energy complex and phosphorus production is one of the most effective ways to save natural materials, while simultaneously recycling by-products.*

**Keywords:** waste production, inter-shale clay, ash-slag material, phosphoric slag, ceramic brick.

Bibliography — 34 references.

Received January 9, 2020



УДК 623.45

## Чрезвычайные ситуации, экологическая оценка их последствий

### Функциональное моделирование экологических рисков и управляющих воздействий при групповом хранении боеприпасов

**И. Т. СЕВРЮКОВ**, д-р техн. наук

ФАУ «25-й Государственный научно-исследовательский институт химмотологии»  
Министерства обороны РФ, Москва, Россия

**Н. П. КУЗНЕЦОВ**, д-р техн. наук

Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова,  
г. Ижевск, Россия

**В. В. ИЛЬИН**, канд. техн. наук

Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
г. Пермь, Россия

**Е. В. СВИРИДОК**, канд. техн. наук

Российская академия ракетных и артиллерийских наук, Москва, Россия

*Формулируется задача управления экологической безопасностью при хранении боеприпасов в условиях риска возникновения аварийной ситуации. Рассмотрена обобщенная стратегия управления безопасностью хранения боеприпасов. Предложены функциональная зависимость оценки риска, экологического ущерба и модели управления экологической безопасностью при хранении боеприпасов и взрывчатых веществ.*

**Ключевые слова:** хранение боеприпасов, управление экологической безопасностью, аварийная ситуация.

Задача управления экологической безопасностью при хранении боеприпасов и взрывчатых веществ заключается в своевременном выявлении опасностей и причин инициирования, осуществлении управленческих решений, направленных на их устранение и предотвращение дальнейшего развития аварийной ситуации для сведения к минимуму воздействия экологически неблагоприятных факторов на окружающую среду в чрезвычайных ситуациях.

Это является задачей управления в условиях неопределенности. Неопределенность связана, во-первых, с причинами инициирования боеприпасов  $P_j^i$ , во-вторых — с неопределенностью перехода инициирования  $j$ -го боеприпаса в аварийную ситуацию  $S_j$ , в-третьих — с неопределенностью того, к какой аварийной ситуации приведет инициирование  $j$ -го боеприпаса. Задача управления экологической безопасностью при хранении боеприпасов, т. е. предотвращения возникновения и развития аварийных ситуаций, приводящих к  $k$ -му виду риска, может быть сформулирована как задача минимизации экологического ущерба  $k$ -го вида в результате чрезвычайной ситуации:

$$\left(\bar{u}^z\right)^* = \text{Arg min} \left[ Y^{kz} \left( \bar{x}^z, \bar{d}^z, n, M, F_{ij}, Z^z \right) \in T \right]. \quad (1)$$

Минимизация данного вида ущерба вследствие аварийной ситуации в общем случае достигается за

**Севрюков Игорь Тихонович**, профессор, ведущий научный сотрудник.

E-mail: tmitmm@istu.ru

**Кузнецов Николай Павлович**, профессор.

E-mail: tmitmm@istu.ru

**Ильин Вадим Владимирович**, доцент.

E-mail: ilin.vad12@inbox.ru

**Свиридок Екатерина Викторовна**, главный специалист.

E-mail: svkate1@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 9 февраля 2020 г.

© Севрюков И. Т., Кузнецов Н. П., Ильин В. В., Свиридок Е. В., 2020

счет принятия управляющих решений  $(\bar{u}^z)^*$ , обеспечивающих:

- поддержание в заданном диапазоне параметров хранения боеприпасов  $\bar{x}^z$  в  $z$ -м хранилище в соответствии с конструктивными особенностями боеприпасов  $\bar{d}^z$ ;
- уменьшение массы  $M$  опасных, диспергированных, горючих и легко воспламеняющихся веществ, поступивших в окружающее пространство, путем принятия управленческих решений;
- уменьшение количества поражающих факторов  $n$  и масштабов их воздействия на окружающую среду  $F_{ij}$ ;
- минимизацию затрат  $Z^z$  на ликвидацию последствий экологического ущерба в результате чрезвычайной ситуации с боеприпасами.

Факторы риска возникновения аварийной ситуации в рассредоточенной группе боеприпасов (РГБ) имеют ряд особенностей.

Первая из них заключается в том, что отдельные аварийные ситуации, соответствующие наихудшим возможным сценариям развития аварии, могут быть вызваны внешними причинами или являться следствиями внутренних причин.

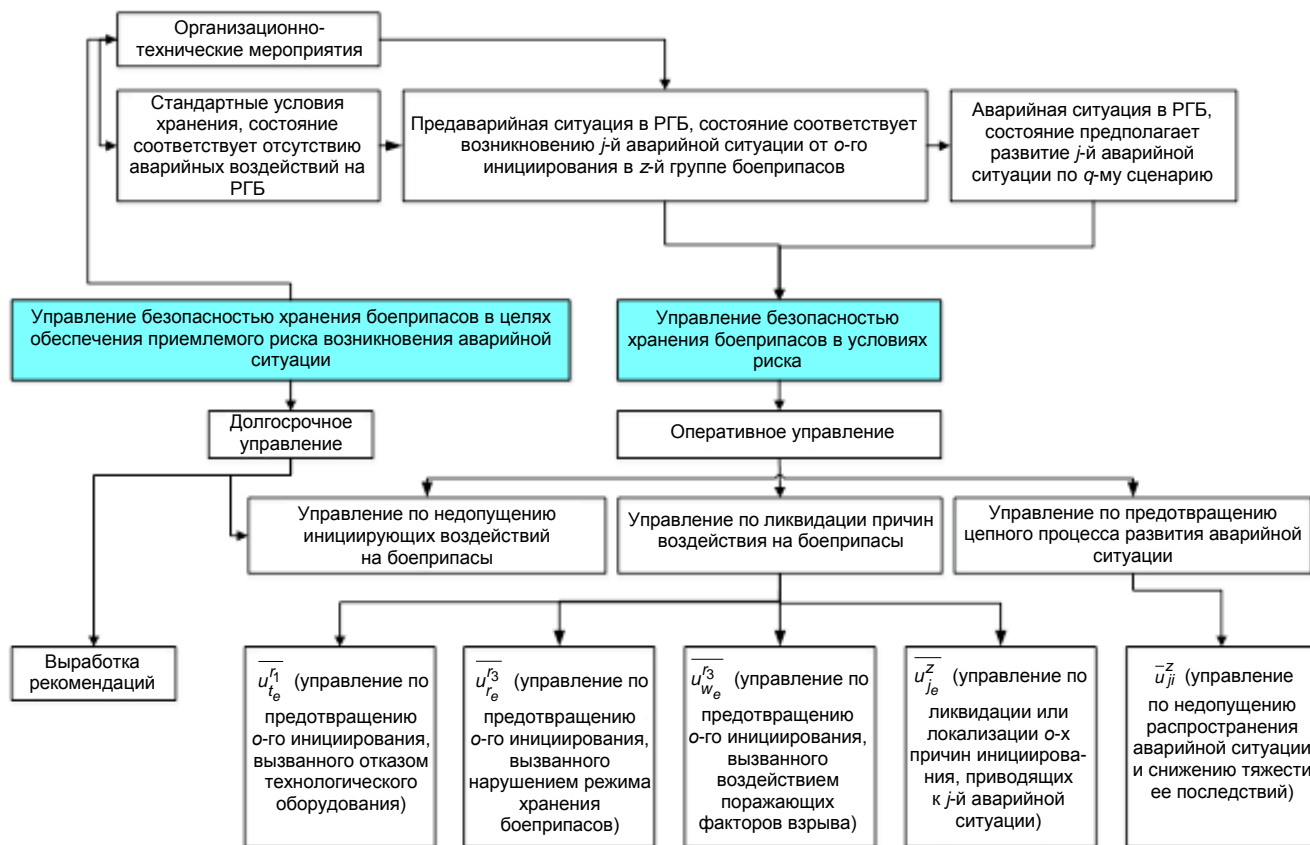
Второй отличительной особенностью является многовариантность развития аварийной ситуации.

Отдельные факторы риска могут иметь дальнейшее развитие с более тяжелыми последствиями или непосредственно приводить к тому или иному виду риска с меньшими экологическими и социальными последствиями.

Третьей особенностью является то, что часть причинно-следственных связей не является жесткой и может иметь или не иметь место в зависимости от аварийных ситуаций. Обобщенная стратегия управления безопасностью хранения группы боеприпасов представлена на рисунке.

Очевидно, что в системе управления безопасностью хранения боеприпасов риск  $k$ -го вида возникновения аварийной ситуации в  $z$ -й группе боеприпасов и ее развитие по  $q$ -му сценарию зависят от [1]:

- значений вероятностей возникновения неопределенных иницирующих параметров  $P_{E_{jo}}^I$  и соответствующих управляющих решений по их предотвращению;
- вероятности возникновения  $i$ -го иницирующего фактора в  $j$ -й ситуации  $F_{ij}$ ;
- вероятности того, что  $i$ -й фактор, возникший от  $j$ -й ситуации и развивающийся по  $q$ -му сценарию, приведет к  $k$ -му виду риска  $E_{qij}^k$ ;
- управляющих воздействий по недопущению развития  $j$ -й аварийной ситуации в  $z$ -й группе боеприпасов  $\bar{u}_{ji}^z$ , приводящей к  $i$ -му фактору риска;



Обобщенная стратегия управления безопасностью хранения боеприпасов



• управляющих воздействий, направленных на снижение риска и тяжести последствий аварии, развивающейся по  $q$ -му сценарию от  $j$ -го фактора риска  $\bar{u}_{jq}^z$ , т. е.

$$R_{jq}^{kz} = f\left(\bar{P}_{E_{jo}}^z, \bar{F}_{ij}, \bar{E}_{qij}^k, \bar{u}_{ji}^z, \bar{u}_{jq}^z\right), j = \overline{1, M^z},$$

$$s = \overline{1, \bar{S}}, i = \overline{1, \bar{N}}, k = \overline{1, \bar{K}}, q = \overline{1, \bar{Q}}. \quad (2)$$

Очевидно, что минимизация  $k$ -го вида риска  $R_{jq}^{kz}$  в  $z$ -й группе боеприпасов достигается за счет правильного выбора вектора управляющих решений, направленных на снижение неопределенностей причин иницирования и вероятности возникновения  $i$ -го иницирующего воздействия.

Вектор управляющих воздействий по предотвращению возникновения аварии в  $z$ -й группе боеприпасов и ее дальнейшего развития можно представить в виде

$$\bar{u}^z = f\left(\bar{u}_o^z, \bar{u}_{jo}^z, \bar{u}_{jq}^z, \bar{u}_{ji}^z\right), j, i = \overline{1, N^u},$$

$$i, q = \overline{1, Q^u}, o = \overline{1, O^z}, j_o = \overline{1, J}. \quad (3)$$

где  $N^u$  — общее количество управляющих решений, направленных на локализацию факторов риска в результате возникновения и развития  $j$ -й аварийной ситуации;

$Q^u$  — количество управляющих решений, направленных на предотвращение развития аварии по  $q$ -му сценарию от  $i$ -го фактора.

Управляющие решения  $\bar{u}_o^z, \bar{u}_{jo}^z$  направлены на предотвращение аварийной ситуации. Управляющие решения  $\bar{u}_{ji}^z$  связаны с недопущением распространения аварийной ситуации и снижением тяжести ее последствий.

Модель процесса управления безопасностью по предотвращению развития аварийной ситуации в группе боеприпасов можно представить как [2]

$$V\left(\bar{u}_{ji}^z, \bar{d}', \bar{v}_s', \bar{E}_{qij}^k, \bar{F}_{nq}^k, \bar{M}\right) = 0,$$

$$j = \overline{1, \bar{J}}, s = \overline{1, \bar{N}}, \quad (4)$$

где  $\bar{F}_{nq}^k$  — последствия воздействия поражающих факторов аварийного взрыва боеприпасов и взрывчатых веществ, приводящих к  $k$ -му виду экологического ущерба (где  $n = \overline{1, \bar{N}}$  — количество поражающих факторов для  $q$ -го сценария развития аварии);

$\bar{M}$  — масса хранимых взрывчатых веществ и боеприпасов.

Модель процесса управления безопасностью по локализации распространения аварии имеет вид

$$V\left(\bar{u}_{jq}^z, \bar{F}_{nq}^k, \bar{M}, n, q, k\right) = 0, j = \overline{1, \bar{J}}, s = \overline{1, \bar{N}}, n = \overline{1, \bar{N}}. \quad (5)$$

Обобщенную модель процесса управления экологической безопасностью можно представить в виде

$$V\left(\bar{u}_i^z, \bar{d}', \bar{v}_s', \bar{E}_{qi}, \bar{F}_{ni}\right) = 0, j = \overline{1, \bar{J}}, s = \overline{1, \bar{N}}, \quad (6)$$

где  $\bar{F}_{ni}$  — вектор  $n$  поражающих факторов и негативных воздействий на систему боеприпасов и окружающую среду;

$\bar{E}_{qi}$  — вектор неопределенных параметров поражающих факторов.

Общий вектор управляющих решений по управлению безопасностью хранения боеприпасов

$$u^z = \bigcup_{i=1}^z (u_i)^z, \bar{u}^z \in U^z. \quad (7)$$

Экологический ущерб  $k$ -го вида, возникающий в результате аварии от  $j$ -й ситуации по  $q$ -му сценарию, зависящий от состояния системы на момент возникновения аварии  $\left(\bar{d}', \bar{v}_s', \bar{E}_{qi}\right)$ , от массы и свойств взрывчатых веществ, типа хранимых боеприпасов, вида поражающих факторов, представим в виде

$$Y_{jq}^{kz} = f\left(\bar{d}', \bar{v}_s', \bar{F}_{nq}^k, \bar{M}, \bar{E}_q\right), s = \overline{1, \bar{N}},$$

$$k = \overline{1, \bar{K}}, q = \overline{1, \bar{Q}}, j = \overline{1, \bar{J}}. \quad (8)$$

Задача управления экологической безопасностью может быть сформулирована как задача минимизации экологического ущерба  $k$ -го вида в результате взрыва боеприпасов при обеспечении допустимого или приемлемого видов риска [2]:

$$u^z = \min \left[ Y_{jq}^{kz} \left( \bar{d}', \bar{v}_s', \bar{F}_{nq}^k, \bar{M}, \bar{E}_q \right) \right] \in T, \quad (9)$$

где  $T$  — состояние системы боеприпасов при возникновении аварийной ситуации.

В общем случае система боеприпасов может иметь несколько последовательно развивающихся состояний:

$$T = T_0^z \wedge T_1^z \wedge T_2^z, \quad (10)$$

где состояние  $T_0^z$  соответствует отсутствию аварийных воздействий (управляющие решения направлены на мониторинг состояния боеприпасов и прилегающей территории); состояние  $T_1^z$  соответствует возникновению  $j$ -й аварийной ситуации от  $o$ -го иницирования в  $z$ -й группе боеприпасов; состояние  $T_2^z$  предполагает развитие  $j$ -й аварийной ситуации по  $q$ -му сценарию.

Управляющие решения направлены на недопущение распространения аварийной ситуации и снижение тяжести ее последствий.

Минимизации экологического ущерба от чрезвычайной ситуации при хранении боеприпасов в общем случае достигают за счет принятия управленческих решений, обеспечивающих мониторинг состояния системы боеприпасов, уменьшение количества неопределенных параметров внешних воздействий на систему боеприпасов, уменьшение масштабов воздействия поражающих факторов, воздействующих на систему боеприпасов и окружающую среду [3, 4].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров А. Ф., Савицкая Т. В., Михайлова П. Г. Модели и методы решения задач оперативного управления безопасностью непрерывных химико-технологических систем // Моделирование систем. 2005. № 6. С. 50—54.
2. Пампура В. И. Оптимальное управление безопасностью АЭС и вероятностный анализ риска // Доп. НАН Украины. 2001. № 5. С. 185—191.
3. Акимов В. А., Лесных В. В., Радаев Н. Н. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах. — М.: Деловой экспресс, 2004. — 302 с.
4. Хабаров В. Б. Методы оценки ущерба, наносимого объектам при боевом применении инженерных боеприпасов // Изв. РАРАН. 2004. № 3 (40). С. 86—93.

## Functional modeling of environmental risks and control actions during group storage of ammunition

I. T. SEVRYUKOV

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

N. P. KUZNETSOV

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

V. V. ILYIN

Perm State National Research University, Perm, Russia

E. V. SVIRIDOK

Russian Academy of Missile and Artillery Sciences, Moscow, Russia

*The task of managing environmental safety when storing ammunition in an emergency situation is formulated. A generalized strategy for managing the safety of ammunition storage is considered. The functional dependencies of risk assessment, environmental damage and environmental safety management models for storing ammunition and explosives are proposed.*

**Keywords:** ammunition storage, environmental safety management, emergency.

**Bibliography** — 4 references.

*Received February 9, 2020*

УДК 622.276:621.455:534:62-272

## Динамическая неустойчивость пружинных клапанов гидропневмомагистралей как фактор экологического риска

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

И. Т. СЕВРЮКОВ, д-р техн. наук

ФАУ "25-й Государственный научно-исследовательский институт химмотологии" Министерства обороны РФ, Москва, Россия

*Описан возможный механизм возникновения параметрического резонанса в регулировочных и предохранительных клапанах с витыми цилиндрическими пружинами, используемых в нефтяной отрасли, в пневмо- и гидромагистральных жидкостных ракетных двигателях, в магистральных централизованного городского тепла и водоснабжения. Получены условия обеспечения динамической устойчивости колебательных процессов в клапанах с пружинными элементами, что снижает риск разрушения клапанов и, соответственно, сопутствующих экологических рисков.*

**Ключевые слова:** запорно-регулирующая арматура, витые цилиндрические пружины, динамическая неустойчивость, параметрический резонанс, экологические риски.

В пневмогидравлических системах широко используют запорно-регулирующую арматуру, особенности работы которой во многом определяют характер протекания динамических процессов в этих системах. Так, эксплуатация нефтегазового оборудования, используемого при добыче и транспортировке нефти и газа, происходит в сложных условиях, связанных с высокими давлениями в скважине, в трубопроводных коммуникациях выкидных и манифольдных систем и т. д. Кроме того, процессы добычи и транспортировки газа и нефти сопровождаются нестабильными гидравлическими процессами движения флюида, что приводит к возникновению в трубопроводной арматуре гидравлических ударов. Зачастую нарастающая при перемещении флюида в скважинах нестабильность гидродинамических процессов приводит к неуправляемым нефтегазовым выбросам, разрушению корпусных герметизирующих элементов запорного оборудования и трубопроводных систем,

наноса значительный материальный и экологический ущерб вплоть до экологических бедствий и катастроф. Экологический ущерб относят к наиболее длительным по времени и трудоемким работам по восстановлению благоприятной экологической системы в местах разрыва трубопроводных гидросистем. Если утечки произошли вблизи водных ресурсов, то это может обернуться экологической катастрофой, как, например, авария на побережье штата Луизиана в Мексиканском заливе на нефтяной платформе Deepwater Horizon на месторождении Макондо.

Подобные проблемы могут возникнуть и в процессе проведения буровых эксплуатационных работ, работ по обслуживанию запорных элементов на выкидных линиях нефтяных и газовых скважин, в трубопроводном транспорте.

С каждым годом аварийность на трубопроводах России возрастает из-за изношенности оборудования трубопроводных гидросистем и такого негативного явления, как гидравлический удар, который ведет к порыву трубопроводных систем и тем самым к разливу углеводородного сырья [1]. Похожие проблемы существуют и в трубопроводных системах централизованного городского тепло- и водоснабжения [2].

Для защиты оборудования гидравлических и трубопроводных систем от высоких давлений и гидравлических ударов применяют различные образцы предохранительных запорно-предохранительных клапанов, запорно-предохранительного оборудования, обеспечивающего сбрасывание избыточного давления, а также используют различные регулирующие клапаны для управления расходными характеристиками магистралей. Технические решения по

**Волохин Виктор Аркадьевич**, заместитель директора по учебной работе, соискатель ученой степени канд. техн. наук.  
E-mail: tmitmm@istu.ru

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

E-mail: tmitmm@istu.ru

**Кузнецов Николай Павлович**, профессор.

E-mail: tmitmm@istu.ru

**Севрюков Игорь Тихонович**, профессор, ведущий научный сотрудник.

E-mail: tmitmm@istu.ru

Статья поступила в редакцию 1 июня 2020 г.

© Волохин В. А., Гракович И. В., Кузнецов Н. П., Севрюков И. Т., 2020

конструкциям запорно-регулирующего оборудования наиболее проработаны для пневмогидравлических систем жидкостных ракетных двигателей [3].

Отмеченные пневмогидравлические системы можно отнести к большим (сложным) техническим системам, надежность работы которых в соответствии с ГОСТ 27.004-85 [4] определяют надежностью работы всех входящих в них узлов, в том числе надежностью запорно-регулирующего оборудования, зависящей от особенностей конструктивно-компоновочной схемы узлов и условий их эксплуатации, что наиболее просто рассмотреть на примере предохранительных клапанов многократного использования.

### Особенности конструктивно-компоновочной схемы предохранительного клапана многократного использования и его эксплуатации

В работе [5] приведены применяемые в отечественной нефтегазовой промышленности и за рубежом различные комплексы запорно-предохранительных устройств, предохранительных устройств, предохранительных клапанов. Срабатывание этих устройств не всегда надежно и эффективно, особенно в условиях работы гидродинамических систем, заполненных агрессивными флюидами, и при аномально высоких и стохастически возникающих импульсах давления. Однако эффективность некоторых предохранительных клапанов и средств компенсации (гашения) колебания давления в трубопроводных системах ограничена вследствие ряда принципиальных недостатков. В качестве недостатков можно отметить неспособность обеспечить существенное снижение амплитуды колебаний давлений, разрыв мембраны или одноразового запорного стержня на предохранительном клапане требует их замены после каждого срабатывания и т. д. Тем самым существенным недостатком отмеченных предохранительных систем является отсутствие автоматизации и многозаходности процесса срабатывания предохранительного клапана, что повышает время на его обслуживание, снижая надежность и долговечность всего комплекса оборудования.

От этих недостатков свободна конструкция предохранительного клапана, защищенная патентом на изобретение РФ № 2657370, схема которого приведена на рис. 1 [6].

При повышении давления в гидросистеме сверх допустимого (гидроудар) запорный орган 6 отходит от седла 4, срезая часть тарированного стержня 10, и перемещается в крайнее положение до совмещения выходного отверстия запорного органа 6 с отверстием выходного патрубка 3. В результате происходит аварийный сброс избытка жидкости. При снижении давления в гидросистеме до условно-низкого или среднего запорный орган 6 приходит в первоначальное положение под воздействием на него пружины возврата 7. Тем самым механический аналог предохранительного клапана, схема которого показана на рис. 1, будет представлять собой колебательный контур, в котором пружина возврата 7 является упругим элементом контура, а колеблющаяся масса определена массой подвижного узла клапана, глав-

ным образом запорного органа 6. Нагружение клапана 6 периодической силовой нагрузкой, обусловленной пульсациями давления в магистралях, будет оказывать дополнительное влияние на характер динамических режимов в трубопроводах.

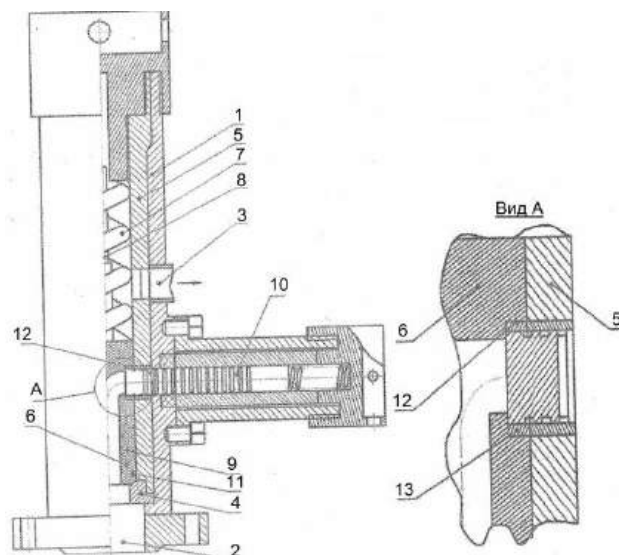


Рис. 1. Схема многозаходного предохранительного клапана по патенту РФ на изобретение № 2657370 [6]:

- 1 — корпус; 2 — входной патрубок; 3 — выходной патрубок;
- 4 — седло; 5 — пружинная втулка; 6 — запорный орган;
- 7 — пружина возврата; 8 — шток; 9 — внутренний канал;
- 10 — тарированный стержень; 11 — уплотнения;
- 12 — расточка; 13 — срезающий элемент

Обычно в гидросистемах оптимизацию динамических режимов осуществляют подбором конструктивных параметров и динамических характеристик отдельных гидроэлементов, в том числе предохранительных клапанов. В монографии [7] отмечено, что на характеристики гидравлического удара влияет не только время открытия или закрытия проходного сечения гидромагистрали, но и закон изменения площади проходного сечения магистрали. Поэтому крайне важно исследование динамических процессов в гидромагистралях, исследование динамических качеств клапанов [8]. В результате таких исследований осуществляют подбор конструктивных параметров и динамических характеристик элементов магистрали. Варьируя гидродинамическими свойствами клапана, формой его проточной части, углом отклонения потока в щели, жесткостью пружины, коэффициентом демпфирования, присоединенным объемом рабочей жидкости и упругими параметрами, можно в ряде случаев устранить резонансные колебания в гидросистемах. Однако наличие в гидроарматуре пружинных элементов делает эту арматуру подверженной параметрическим колебаниям, поскольку в пружинах возможно возникновение параметрического резонанса [9, 10]. Более того, для клапанов с пружинными элементами при определенных режимах работы гидросистемы некоторые параметры, входящие в уравнение движения запорно-регулирующих элементов (ЗРЭ), например жесткость или приведенная масса, приведенный момент инерции, могут зависеть от времени.

### Модель параметрического резонанса в клапанах с пружинными элементами

В работе [2] уравнение движения ЗРЭ клапана предложено записывать в следующем виде:

$$m_{\text{пруж}} \ddot{Z} + \Phi \dot{Z} + kZ = F_{\text{пот}} - F_{\text{внеш}}, \quad (1)$$

где  $F_{\text{пот}}$  — сила, действующая на ЗРЭ со стороны потока, имеющая и гидродинамическую составляющую;

$F_{\text{внеш}}$  — внешняя постоянная сила, учитывающая массу подвижных частей клапана (при его вертикальном расположении) и силу предварительного натяжения пружины;

$\Phi$  — коэффициент вязкого трения;

$k, m_{\text{пруж}}$  — жесткость пружины и приведенная масса ЗРЭ;

$\ddot{Z}, \dot{Z}, Z$  — ускорение, скорость и перемещение ЗРЭ.

Уравнение (1) не учитывает поворота ЗРЭ, возникающего за счет относительного углового перемещения торца пружины в опорной плоскости при ее сжатии. Этому перемещению препятствует сила трения, которая во многих случаях мала. Поскольку при повороте ЗРЭ изменяется инерционность подвижных частей клапана, уравнение (1) можно записать в виде

$$(m_{\text{пруж}} + m_{\text{доп}}) \ddot{Z} + \Phi \dot{Z} + kZ = F_{\text{пот}} - F_{\text{внеш}}, \quad (2)$$

где  $m_{\text{доп}}$  — дополнительная масса.

Деформация винтовой пружины в направлении оси под действием только осевой силы [2] создает относительное угловое смещение ее витков. При этом если хотя бы один из опорных витков может беспрепятственно повернуться в плоскости опорной поверхности, проскальзывая или вместе с опорой, то это происходит в соответствии с зависимостью

$$\varphi = \pm \frac{32\mu PD^2 i \sin \alpha}{Ed^4}, \quad (3)$$

где  $\varphi$  — относительное угловое смещение опорных витков пружины;

$\mu$  — коэффициент Пуассона;

$P$  — осевая сила;

$D$  — средний диаметр пружины;

$i$  — число витков пружины;

$E$  — модуль упругости пружинной проволоки;

$d$  — диаметр сечения пружинной проволоки.

Осевую деформацию выражают следующей зависимостью [2]:

$$Z = \frac{16PD^3 i (1 + \mu)}{Ed^4}. \quad (4)$$

Из (3) и (4) легко определить передаточное число, которое связывает линейное и угловое перемещение крайних витков пружины:

$$\frac{\varphi}{Z} = K = \pm \frac{2\mu \sin \alpha}{(1 + \mu)D}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что для отдельной пружины имеют место не только линейные, но и угловые коле-

бательные процессы. Дифференциальное уравнение колебательных вращательных процессов может быть записано в следующем виде:

$$[J_0 + J(t)] \ddot{\phi} + \eta \dot{\phi} + G\phi = M(t), \quad (6)$$

где  $J_0$  — некоторый первоначальный момент инерции пружины как твердого тела относительно продольной оси пружины;

$J(t)$  — изменение момента инерции пружины за счет перемещения торцов друг относительно друга.

Поскольку существует передаточное число, выражение (5), то из (6) следует, что выражение (2) может быть записано в виде

$$[m_0 + m_{\text{доп}}(t)] \ddot{Z} + \Phi \dot{Z} + kZ = F_{\text{пот}} + F_{\text{внеш}}. \quad (7)$$

Необходимо только определить закон изменения так называемой дополнительной массы в выражении (7). Эту массу можно определить из следующих соображений.

Поскольку функция передаточного числа клапана представляет собой непрерывный ряд знакопеременных импульсов прямоугольной формы, то в точках изменения знака эта функция обращается в ноль, что обусловлено неизбежным проскальзыванием опорного витка пружины относительно ЗРЭ при изменении направления его движения. Разложив эту ступенчатую функцию в ряд Фурье и ограничившись первым членом, получим

$$K(t) \approx \frac{4K}{\pi} \sin \omega t, \quad (8)$$

$$\text{где } K = \frac{\varphi}{Z} = \pm \frac{2\mu \sin \alpha}{(1 + \mu)D};$$

$Z, \varphi$  — линейное и угловое перемещения крайних витков пружины;

$\mu$  — коэффициент Пуассона;

$D$  — средний диаметр пружины;

$\alpha$  — угол наклона витка пружины.

Характер колебательных процессов в клапане, если пренебречь вязким демпфированием, будет определяться поведением решения уравнения следующего вида:

$$(m_{\text{пруж}} + m_{\text{доп}}) \ddot{Z} + kZ = 0, \quad (9)$$

где  $k = \frac{Ed^4}{16i(1 + \mu)}$  — приведенная жесткость пружины.

Дополнительная масса зависит от момента инерции ЗРЭ и передаточного числа:

$$m_{\text{доп}} = (J_{\text{кл}} + J_{\text{пруж}}) K^2 \sin^2 \omega t = M_{\text{доп}} \sin^2 \omega t, \quad (10)$$

где  $J_{\text{кл}}, J_{\text{пруж}}$  — моменты инерции ЗРЭ и пружины;

$\omega$  — круговая частота изменения массы;

$M_{\text{доп}}$  — амплитудное значение дополнительной массы.

Тогда уравнение (9), если пренебречь диссипативными силами, можно привести к уравнению с пе-

ременными коэффициентами, которое характеризует параметрические колебания системы с одной степенью свободы:

$$\ddot{Z} + \psi(t)Z = 0, \quad (11)$$

$$\text{где } \psi(t) = \frac{k}{m_{\text{пруж}} + M_{\text{доп}} \sin^2 \omega t}.$$

Решая уравнение (11), можно определить наличие или отсутствие параметрического резонанса. Области резонанса или его отсутствия могут быть определены по диаграмме Айнса—Стретта [11, 12].

Можно показать, что при определенных допущениях уравнение (11) может быть сведено к уравнению Маттье. Действительно, из (11) легко получить

$$\ddot{Z} + \frac{2k}{2m_{\text{пруж}} + M_{\text{доп}}} \frac{Z}{1 - \frac{M_{\text{доп}} \cos 2\omega t}{2m_{\text{пруж}} + M_{\text{доп}}}} = 0, \quad (12)$$

или, произведя замену переменных в виде

$$\tau = \omega t, \quad (13)$$

получить

$$\frac{d^2 Z}{d\tau^2} + \frac{2k}{(2m_{\text{пруж}} + M_{\text{доп}})\omega^2} \frac{Z}{1 - \frac{M_{\text{доп}} \cos 2\tau}{2m_{\text{пруж}} + M_{\text{доп}}}} = 0. \quad (14)$$

Учитывая, что  $M_{\text{доп}} \ll 2m_{\text{пруж}} + M_{\text{доп}}$ , и раскладывая переменный коэффициент перед  $Z$  в ряд Тейлора и ограничившись первым членом, получим

$$\frac{d^2 Z}{d\tau^2} + (a - 2q \cos 2\tau)Z = 0, \quad (15)$$

$$\text{где } a = \frac{2k}{(2m_{\text{пруж}} + M_{\text{доп}})\omega^2}; \quad q = -\frac{kM_{\text{доп}}}{(2m_{\text{пруж}} + M_{\text{доп}})^2\omega^2}.$$

Выражение (15) и является уравнением Маттье. В нем независимо от частоты  $\omega$  значение отношения  $q/a$  сохраняется постоянным:

$$\frac{q}{a} = \frac{M_{\text{доп}}}{2(m_{\text{пруж}} + M_{\text{доп}})} = \frac{\varepsilon}{2(1 + \varepsilon)} = \text{const}. \quad (16)$$

Как следует из уравнения Маттье [11, 13], рассматриваемая динамическая система ЗРЭ—пружина возбуждается при различных частотах возмущения, которые можно определить, воспользовавшись диаграммой Айнса—Стретта [11, 14], построенной в плоскости параметров  $a$  и  $q$ .

Таким образом, выражение (16) показывает принципиальную возможность возникновения в клапане параметрического резонанса. Однако параметры рабочей точки  $a_{\text{ж}}$  и  $q_{\text{ж}}$  для конкретного клапана-регулятора определить весьма проблематично. Это в первую очередь обусловлено тем, что при выводе закона (16) дважды допускались необоснованные разложения в ряды функций в целях подгонки первоначальной модели к уравнению Маттье. Особо грубо и недопустимо эту операцию проводить для ступенчатой функции Хэвисайда. В данном случае это пере-

даточная функция, передаточное число. Тем самым многократные аппроксимации, используемые при построении выражения (16), делают сомнительной достоверность определения коэффициентов  $a$ ,  $q$ , входящих в (16).

Тем не менее использование этих результатов для оценки динамики клапанов-регуляторов вряд ли является правомочным, поскольку сомнителен вывод основных уравнений динамики клапана типа (15). Однако частый выход из строя пружинных элементов клапанов требует выявления технических причин этого явления. Целесообразней анализ динамической устойчивости клапана произвести исходя из наличия в магистрали пульсаций давления, что в конечном счете должно дать дифференциальное уравнение динамики пружины, в состав которого входят коэффициенты с периодическими составляющими [13].

С этой целью рассмотрим еще раз взаимосвязь продольных колебаний и крутильных колебаний для одной пружины. Дело в том, что основная проблема при построении модели вида (15) состоит в необоснованности введения в рассмотрение дополнительной массы: пружина не является телом переменной массы. Но можно предположить, что при сжатии пружины все новые и новые ее участки принимают участие в динамическом процессе, т. е. изменение массы, определяемое уравнением (7), функционально должно зависеть от координаты  $Z$ . Действительно, если предположить, что крутильные колебания пружины эквивалентны круговым колебаниям полого цилиндра, то момент инерции относительно вращения может быть определен по зависимости [15]

$$J_z = \frac{MD^2}{4}, \quad (17)$$

где  $M$  — масса пружины;

$D$  — срединный диаметр пружины.

При развороте торцов пружины происходит изменение диаметра пружины, а следовательно, и изменение момента инерции пружины как твердого тела, вращающегося относительно оси  $Z$ . Предположим, что пружина состоит из  $n$  витков. Тогда общая длина проволоки пружины будет равна

$$L = n\pi D. \quad (18)$$

При повороте торцов пружины на угол  $\varphi$  длина ее станет равной

$$L_1 = (n\pi + \varphi)D', \quad (19)$$

где  $D'$  — новый диаметр пружины.

Поскольку  $L = L_1$ , т. е. считается, что пружина (ее проволока) не удлиняется, из (19) получим

$$D' = D \frac{n\pi}{n\pi + \varphi}. \quad (20)$$

Для закона изменения момента инерции получим выражение

$$J_z = \frac{M}{4} D^2 \frac{1}{\left(1 + \frac{\varphi}{n\pi}\right)^2}. \quad (21)$$



Уравнение (6) можно записать в виде

$$\frac{MD^2}{4} \ddot{\varphi} + \eta \left(1 + \frac{\varphi}{n\pi}\right)^2 \dot{\varphi} + G \left(1 + \frac{\varphi}{n\pi}\right)^2 \varphi = H(t) \left[1 + \frac{\varphi}{n\pi}\right]^2. \quad (22)$$

Если считать, что  $H(t)$  есть периодическая по времени силовая функция (момент), имеет постоянную и периодическую составляющие, обусловленные пульсациями давления в гидравлическом тракте, пренебрегая величинами второго порядка малости, получим из (22)

$$\frac{MD^2}{4} \ddot{\varphi} + \eta \dot{\varphi} + G\varphi = (H_0 + \Delta H \cos \omega t) \left(1 + \frac{\varphi}{n\pi}\right)^2. \quad (23)$$

Пренебрегая в последнем уравнении демпфированием колебаний, имеем известное уравнение Матве в виде

$$\ddot{\varphi} + \left( \frac{4G}{MD^2} - H_0 \frac{8}{n\pi D^2 M} - \frac{8\Delta H}{MD^2 n\pi} \cos \omega t \right) \varphi = (H_0 + \Delta H \cos \omega t) \frac{4}{MD^2}. \quad (24)$$

Используя коэффициент связи между линейными и угловыми деформациями, можно получить аналитическое уравнение Матве и для продольных колебаний пружины.

Исходя из этих уравнений, легко определить зоны динамической устойчивости работы как отдельной пружины, так и всего регулирующие-запорного устройства [2]. Более того, эти оценки значительно точнее, чем в монографии [2], поскольку, например, в модели (24) более полно учтены характеристики пружины, в частности  $n$  и  $\alpha$ .

Из сказанного следует, что запорная и регулирующие-запорная арматура с пружинными элементами, широко используемая в пневмогидравлических системах ракет с ЖРД, предрасположена к параметрическому резонансу. Для повышения надежности работы такого оборудования надо либо подбирать характеристики пружин, либо исключать применение в конструкторско-компоновочной схеме таких устройств пружин, как это предложено в работе [2].

### Беспружинная запорно-регулирующая арматура

Примером беспружинного запорно-регулирующего клапана может быть клапан-регулятор системы подачи воды на дегазацию в гидросистеме подготовки горячей воды в городской системе централизованного горячего водоснабжения в целях снижения скорости внутритрубной коррозии [2, 16]. В конструкциях дегазационных колонн для удаления из горячей воды растворенного в ней кислорода важно обеспечить подачу воды на дегазацию, исключая возможность в магистральных гидравлического удара. Постепенное открытие и закрытие трубопровода подачи воды на дегазацию может обеспечить беспружинный клапан-регулятор, схема которого изображена на рис. 2 [17].



Рис. 2. Схема беспружинного клапана-регулятора системы подачи воды на дегазацию [17]:

12 — корпус; 13 — юбка; 14, 15 — входной и выходной фланцы; 16 — поршень; 17 — буртик; 18 — днище; 19, 20 — штуцера; 21 — электрогидравлический клапан двойного действия; 22, 23 — электрогидравлические клапаны

При подаче воды на дегазацию поршень 16 занимает положение, при котором газовая полость Г имеет минимальный объем, а полость В — максимальный объем. Такое положение поршня 16 обеспечивают за счет подачи воды от штуцера 19 через гидравлический клапан 21 или клапан 22 при закрытом клапане 23 на штуцер 20 и далее в полость В. При этом положении поршня 16 окна Ж в корпусе 12 открыты. Вода из приемной полости А поступает в выходную полость Б и далее в узел распыла воды на дегазацию. При этом уровень воды в дегазационной колонне постоянно растет. Когда он достигает максимально допустимого уровня, датчик уровня воды вырабатывает электрический сигнал, который за счет электрогидравлического клапана 21 закрывает магистраль, соединяющую штуцера 19 и 20. Если в системе используют два однокходовых электрогидравлических клапана, 22 и 23, сигнал, соответствующий максимальному уровню воды в клапане, закрывает клапан 22 и открывает клапан 23. В обоих вариантах неуравновешенное давление жидкости в полости А, действующее на торцевой буртик поршня 16, выдавливает воду из полости В, которая сливается в канализацию через электрогидравлический клапан 21 или 23. При своем движении поршень 16 перекрывает окна Ж. Под действием силы, действующей на торцевой буртик поршня 16, поршень своим другим торцом прижимается герметично к прокладке 18, закрепленной на доннышке корпуса 12. При перемещении клапана 16 в положение, соответствующее запертию проходного сечения магистрали подачи воды на дегазацию, через отверстие Е, выполненное в корпусе 12, происходит подсос воздуха в полость Г.

При подаче дегазированной воды потребителям уровень воды в колонне падает. Когда оказывается достигнут минимально возможный уровень воды в дегазационной колонне, датчик уровня воды в колонне подает сигнал на открытие двухпозиционного электрогидравлического клапана 21 или на открытие клапана 22 и закрытие клапана 23. В результате вода через штуцер 20 поступает в полость В. Под давлением жидкости, поступившей в полость В, поршень клапана перемещается, вытесняя воздух из полости и открывая отверстие Ж.

Фотография клапана-регулятора с конструктивно-компоновочной схемой по патенту РФ на изобретение [17] представлена на рис. 3.



Рис. 3. Клапан-регулятор в сборе

В монографии [2] приведены положительные результаты промышленных испытаний беспружинного клапана-регулятора для гидромагистралей систем дегазации центральных тепловых пунктов (ЦТП) в г. Ижевске. За пять лет эксплуатации шести клапанов-регуляторов с  $d_v = 100$  мм на ЦТП не выявлено ни одного случая их отказа в отличие от серийно применяемых на ЦТП пружинных клапанов-регуляторов, которые регулярно выходят из строя из-за гидравлических ударов.

### Выводы

Для повышения надежности работы клапана необходимо в его конструктивно-компоновочной схеме исключить применение пружин, что, к сожалению, значительно усложняет их конструкцию. Повысить надежность запорно-регулирующей арматуры с пружинными элементами можно путем подбора (выбора) характеристик пружин. При этом основной сложностью выбора параметров пружины является определение приведенных статических и динамических характеристик клапана с пружинным механизмом, что требует отдельного рассмотрения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Тетельмин В. В., Язев В. А. Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. Изд. 2. — Долгопрудный: Изд. дом "Интеллект", 2011. — 352 с.
2. Кузнецов Н. П., Пономаренко В. А., Салтыков А. И., Бухтулова Е. В. Техно-экономические аспекты городского централизованного водоснабжения. — М.-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2006. — 480 с.
3. Васильев А. П., Кудрявцев В. М., Кузнецов В. А. и др. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей: учебник. Изд. 3, испр. и доп. — М.: Высшая школа, 1983. — 703 с.
4. Хазов Б. Ф. Управление надежностью машин на этапах их жизненного цикла: справ. // Инженерный журнал. 1999. № 9, 12. 2000. № 1, 2.
5. Абубакиров В. Ф., Буримов Ю. Г. Оборудование буровое противовыбросовое и устьевое. В 2 томах. — М.: Газовая промышленность, 2007.
6. Волохин А. В., Алиев А. В., Волохин В. А. Предохранительный клапан. МПК F 16 K 17/04. Патент РФ на изобретение № 2657370. Оpubл. 14.03.2018. Бюл. № 8.
7. Емцев Б. Т. Техническая гидромеханика. — М.: Машиностроение, 1987. — 438 с.
8. Кшуманев С. В. Исследование и обеспечение динамического качества пружинных предохранительных клапанов пневмогидросистем железнодорожного транспорта. Дисс. ... канд. техн. наук. — Самара, 2005. — 198 с.
9. Полищук Д. Ф., Матвеев А. С. К вопросу динамической устойчивости цилиндрических пружин // Сопротивление материалов и теория сооружений. Республиканский межведомств. науч.-технич. сб. 1972. Вып. 16. С. 185—186.
10. Хвингия М. В. Вибрация пружин. — М.: Машиностроение, 1969. — 287 с.
11. Шмидт Г. Параметрические колебания. — М.: Мир, 1978. — 335 с.
12. Стрелков С. П. Введение в теорию колебаний. — М.-Л.: Гос. изд-во технико-теор. лит., 1951.
13. Якубович В. А., Старжинский В. М. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами и их приложения. — М.: Наука, 1972. — 720 с.
14. Кузнецов Н. П. Алгоритм расчета границ областей устойчивости двухстепенных механических систем методом ускоренной сходимости: сб. "Проблемы современной теории периодических движений". — Ижевск, 1981. № 5. — С. 25—28.
15. Добронравов В. В., Никитин Н. Н. Курс теоретической механики. — М.: Высшая школа, 1983. — 574 с.
16. Бухтулова Е. В., Кузнецов Н. П., Салтыков А. И., Севрюков И. Т., Фомин П. М. Оценка экономической эффективности системы противокоррозионной защиты городских централизованных сетей горячего водоснабжения // Экология промышленного производства. 2016. № 4. С. 45—61.
17. Зинина В. В., Кузнецов Н. П., Пономаренко В. А., Пушин М. А., Салтыков А. И. Дегазатор горячей воды с форсуночной подачей / МПК С 02 F 1/20, С 02 F 103-02. Патент РФ на изобретение № 2196113. Оpubл. 10.01.2003. Бюл. № 1.

## Dynamic instability of spring valves of hydro-pneumatic highways, as a factor of ecological risk

<sup>1, 2</sup> V. A. VOLOKHIN, <sup>1</sup> I. V. GRAKOVICH, <sup>2</sup> N. P. KUZNETSOV

<sup>1</sup> POO "Petroleum Technical College", Izhevsk, Russia

<sup>2</sup> Izhevsk State Technical University named after Mikhail Kalashnikov, Izhevsk, Russia

I. T. SEVRYUKOV

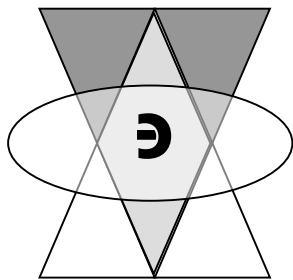
FAU "25 State Research and Development Institute of a himmotologiya" of the Ministry of Defence of the Russian Federation, Moscow, Russia

*The article describes a possible mechanism for the occurrence of parametric resonance in adjusting and safety valves with coil twisted cylindrical springs used in the petroleum industry, in pneumatic and hydraulic highways of liquid rocket engines, in centralized city heat and water supply highways. Conditions for providing dynamic stability of oscillatory processes in valves with spring elements are obtained, which reduces risk of valve destruction and, accordingly, associated environmental risks.*

**Keywords:** shut-off and control equipment, spiral coil springs, dynamic instability, parametric resonance, environmental risks.

**Bibliography** — 17 references.

*Received June 1, 2020*



УДК 504.3.054

## Экологический контроль, прогнозирование

### Использование инновационных методов исследования загрязнения воздуха для совершенствования системы контроля атмосферы города Новомосковска

**А. В. АРХИПОВ**

Тулский государственный университет, г. Тула, Россия

**О. Н. ГРИНЮК**, канд. техн. наук

Новомосковский институт (филиал) Российского химико-технологического университета  
им. Д. И. Менделеева, г. Новомосковск, Тульская обл., Россия

**А. Д. МИХЕД**, канд. техн. наук

АНО ВО «Международная полицейская академия ВПА», г. Тула, Россия

**О. В. АЛЕКСАШИНА**, канд. техн. наук

Московский политехнический университет, Москва, Россия

*Проведена оценка репрезентативности и достаточности полученных данных от постов экологической системы мониторинга. В качестве метода исследования использован интерполяционный метод контроля движения воздушной среды районов с неоднородностью ландшафта местности при техногенных авариях. Метод состоит из трех основных этапов: экспериментальные обследования метеоусловий района, обработка экспериментальных данных с помощью помехоустойчивой интерполяции и оперативный контроль динамики воздушной среды при техногенных авариях.*

**Ключевые слова:** экологический мониторинг, загрязнение атмосферы, интерполяционный метод контроля атмосферы, стационарная лаборатория, автоматизированная система контроля, промышленный кластер, воздушный бассейн, техногенная авария.

Одним из крупнейших центров химической промышленности в центральной России является Новомосковский промышленный кластер, включающий такие крупные предприятия, как АО НАК "Азот", ООО "Проктер энд Гэмбл—Новомосковск", ООО "Оргсинтез Новомосковск", ООО "Полипласт Новомосковск",

которые ежегодно увеличивают объемы производства. Данный промышленный кластер является потенциальным очагом техногенной аварии, характеризующейся выбросом в атмосферу сильнодействующих ядовитых веществ. Для контроля и наблюдения за качеством и передвижением воздушной среды района в 2000 г. в г. Новомосковске создана система экологического мониторинга атмосферы. Развитие промышленности влечет за собой необходимость мониторинга и состояния атмосферного воздуха населенных мест. Модернизация автоматизированных систем контроля загрязнения воздуха во всем мире идет по пути применения все более совершенной техники, наращивания числа постов наблюдения и автоматических датчиков для определения вредных примесей, объединения отдельных постов в системы. Полнота и достоверность данных о состоянии окружающей воздушной среды зависит от количества

---

**Архипов Александр Викторович**, аспирант.

E-mail: aav86@mail.ru

**Гринюк Ольга Николаевна**, доцент.

E-mail: olgrinyuk@mail.ru

**Михед Антон Дмитриевич**, доцент.

E-mail: anton11588@yandex.ru

**Алексашина Ольга Вячеславовна**, доцент.

E-mail: Svirukova@yandex.ru

---

Статья поступила в редакцию 2 июля 2020 г.

© Архипов А. В., Гринюк О. Н., Михед А. Д., Алексашина О. В., 2020

и правильности расположения постов наблюдения. Поэтому особую актуальность приобретает обоснование оптимального количества постов и их расположения.

Основными целями и задачами системы экологического мониторинга города являются:

- непрерывный мониторинг качества и передвижения воздушной среды города;
- автоматическое измерение и учет концентраций шести загрязняющих веществ;
- формирование фонда данных экологического мониторинга;
- предоставление в случае экологической аварии с выбросом анализируемых веществ репрезентативных данных службам ГО и ЧС для расчета сценария аварии с учетом размера и перемещения газового облака;
- доведение до населения достоверной информации о состоянии окружающей среды.

Система экологического мониторинга г. Новомосковска включает в себя автоматизированную систему контроля "Атмосфера" и Посты Росгидромета. Посты Росгидромета расположены в Северном микрорайоне (ПНЗ № 1), центральной части города (ПНЗ № 2) и Вахрушевском микрорайоне (ПНЗ № 3). Замеры проводят вручную три раза в сутки.

Автоматизированная система контроля (АСК) "Атмосфера" г. Новомосковска функционирует с 2000 г. Сбор, обработку и представление информации об уровне загрязнения атмосферного воздуха города проводят автоматически с периодичностью в 20 мин. Полученные данные передают в МКУ "ЕДДС" и в администрацию муниципального образования г. Новомосковска для анализа и оперативного принятия мер, а также выводят на сайт администрации в режиме реального времени. АСК "Атмосфера" обрабатывает и анализирует собранную в автоматическом режиме информацию по шести приоритетным веществам (диоксид азота, оксид азота, аммиак, оксид углерода, сернистый ангидрид, сероводород) с четырех стационарных постов, расположенных в различных районах города. Перечень измеряемых веществ определен с учетом требований, установленных РД 52.04.186-89 "Руководство по контролю загрязнения атмосферы" и ГОСТ 17.2.3.01-86. Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов [1, 2].

Согласно пп. 2.5 и 2.7 указанного ГОСТа число постов и места их размещения определяют с учетом численности населения, площади населенного пункта и рельефа местности, а также развития промышленности. В населенных пунктах устанавливают один стационарный или маршрутный пост через каждые 0,5—5 км с учетом сложности рельефа и наличия значительного количества источников загрязнения [2].

В Новомосковске функционируют четыре поста АСК "Атмосфера", но их расположение не в полной мере отвечает требованиям ГОСТ 17.2.3.01-86, согласно которым каждый пост независимо от категории размещают на открытой, проветриваемой со всех сторон площадке с непылящим покрытием (асфальт, твердый грунт, газон) таким образом, чтобы исключить искажения результатов измерений наличием зеленых насаждений, зданий и т. д.

Местоположение трех постов АСК "Атмосфера" выбрано около 20 лет назад не на основе требований ГОСТа, а исходя из имевшихся на тот момент возможностей. Поэтому три из четырех стационарных постов АСК "Атмосфера" расположены так же, как и стационарные лаборатории Росгидромета, т. е. все точки измерения экологической системы мониторинга города находятся на территории жилой застройки города (рис. 1).



Рис. 1. Карта города Новомосковска (а — промышленная зона; б — зона жилой застройки)

Однако основной промышленный район, включающий крупнейшие химические предприятия города, находится за Любовским водохранилищем, т. е. от ближайшего жилого района основной части города (пос. Гипсовый) на расстоянии около 4 км, а от Северного микрорайона, в котором расположены ближайшие посты Росгидромета и АСК "Атмосфера", отслеживающие основные метеопараметры воздушной среды, — более 6 км. При этом данный участок обладает неоднородностью ландшафта местности, в него входит достаточно крупный для данного района водный объект — Любовское водохранилище. Возникает вопрос о том, насколько точно данные с ближайших постов наблюдения будут отражать картину воздушного бассейна над промышленным районом [3].

### Объекты и методы исследований

Авторами проведены теоретические и экспериментальные исследования на основе имитационного моделирования.

Цель работы — оценка на основании инновационных методов исследования репрезентативности и достаточности полученных данных от постов экологической системы мониторинга.

Проведены экспериментальные исследования соответствия данных, полученных с постов экологической системы мониторинга атмосферы, данным Росгидромета о состоянии воздушного бассейна над промышленным районом.

Метеоданные воздушной среды района отслеживают именно посты Росгидромета, и на базе этих данных оценивают ситуацию ГО ЧС в случае техногенной аварии на всей территории Новомосковского района. Поэтому принято решение в качестве репер-



ных точек измерения взять две выборки. Первая выборка состоит из четырех точек, три из которых соответствуют стационарным лабораториям Росгидромета, и одна находится на территории промышленного района. Вторая выборка включает первую выборку и три точки, соответствующие районам месторасположения постов АСК "Атмосфера". Измерения проводили три раза в сутки в то же время, что и на постах контроля, с помощью средств ручного контроля – анемометра и компаса. Сбор данных измерений первой выборки осуществляли два человека. Один находился в промышленном районе, а другой — на территории жилой застройки города и перемещался между точками с помощью автотранспорта в течение нескольких минут для получения достоверных и стабильных данных. Измерения по второй выборке осуществляли три человека, два — как при первой выборке, а один — по районам месторасположения постов АСК "Атмосфера", также с помощью средств автотранспорта [4].

В качестве средства измерений были выбраны достаточно простые и доступные по цене устройства — три чашечных анемометра МЕГЕОН-11030 (рис. 2). Данный анемометр — высокоточный прибор с интегрированным метеорологическим флюгером; обладает характеристиками, приведенными в табл. 1 [5].



Рис. 2. Внешний вид чашечного анемометра МЕГЕОН-11030

Таблица 1

Технические характеристики анемометра МЕГЕОН-11030

Параметры	Значения
Диапазон измерений скорости ветра	0 ~ 30 м/с
Предел допускаемой основной погрешности индикации и порога срабатывания по предельной скорости ветра $V_{пред}$	не более $\pm(0,3+0,03 V)$ м/с, где $V$ — измеренная скорость
Направление ветра	
Диапазон измерений направления ветра	0 ~ 360°, 16 направлений

В качестве теоретического метода исследования на основе имитационного моделирования движения газового облака взят интерполяционный метод контроля движения воздушной среды районов с неоднородностью ландшафта местности при техногенных авариях [3]. Метод состоит из трех основных этапов: экспериментальные обследования метеоусловий района, обработка экспериментальных данных с помощью метода восстановления полей воздушных потоков и оперативный контроль динамики воздушной среды при техногенных авариях. Для разработки метода восстановления полей воздушных потоков по

данным реперных измерений и текущих показаний с постов контроля атмосферного воздуха за основу взят метод помехоустойчивой интерполяции. Помехоустойчивая интерполяция устойчива к погрешностям средств измерений, составляющих значительную величину при оценке метеоусловий воздушного бассейна.

В целях получения репрезентативной информации о пространственной и временной изменчивости движения воздушных потоков района необходимо предварительно провести экспериментальные обследования метеоусловий района с помощью передвижных средств. Методика обследования состоит в следующем: маршруты движения автотранспорта для измерения направления и скорости ветра в реперных точках на карте местности выбирают так, что каждый участок района можно обследовать за минимальное время и получить стабильные и однозначные результаты.

### Результаты исследования

В районе обследования проводят многократные реперные измерения скорости и направления ветра при различных метеоусловиях (рис. 3) для формирования экспериментального статистического материала о движении воздушной среды. Затем эти данные обрабатывают при помощи помехоустойчивой интерполяции и строят векторные поля значений направления и скорости движения воздушных потоков. В целях визуализации полей распределения направления и скорости воздушных потоков строят эпюры движения воздушных потоков (рис. 4).



Рис. 3. Векторограмма неоднородности распределения значений направления и скорости ветра на исследуемом участке местности

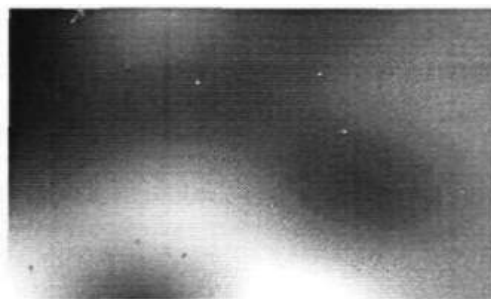


Рис. 4. Пример восстановления значений вертикальной составляющей вектора направления и скорости ветра по реперным измерениям:

светлые области — максимальное значение вертикальной составляющей; темные области — минимальное значение

При наложении полей значений направления и скорости движения воздушных потоков на карту данного района получаем эпюры, с помощью которых можно визуально наблюдать по какому направлению

движется воздушный поток в каждой точке обследуемого района при текущих метеоусловиях [6].

Для синтеза модели поля воздушного потока исходные данные, полученные в реперных узлах в виде значений скоростей  $V(x, y)$  и направлений ветра  $\alpha(x, y)$ , преобразуются в вертикальные и горизонтальные проекции векторов скоростей  $\Delta x(x, y)$  и  $\Delta y(x, y)$  (рис. 5):

$$\begin{cases} \Delta x(x, y) = V(x, y) \cos[\alpha(x, y)]; \\ \Delta y(x, y) = V(x, y) \sin[\alpha(x, y)]. \end{cases} \quad (1)$$

Интерполяционная модель поля воздушного потока имеет две модели проекций вектора скоростей в реперных узлах:

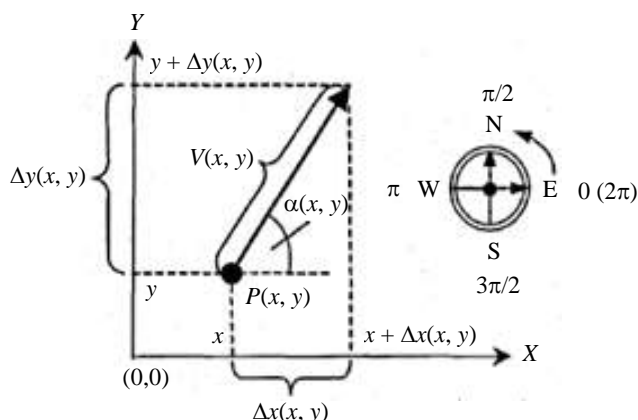


Рис. 5. Разложение вектора скорости в реперной точке  $P(x, y)$

$$\begin{cases} \Delta \hat{x}(x, y) = \sum_{k=0}^{M-1} \hat{a}_{x,k} \varphi_k(x, y); \\ \Delta \hat{y}(x, y) = \sum_{k=0}^{M-1} \hat{a}_{y,k} \varphi_k(x, y), \end{cases} \quad (2)$$

где  $\varphi_k(x, y)$  —  $M$  первых базисных функций из полной ортогональной системы;

$\hat{a}_{x,k}, \hat{a}_{y,k}$  — оценка амплитуды для  $k$ -й гармоники в соответствующей моделируемой проекции.

Выбор новых гармоник и их амплитуд  $\hat{a}_{x,k}, \hat{a}_{y,k}$  оценивают с учетом помехи реперных измерений по данным фактического реперного плана на основе метода стохастической интерполяции в эволюционном режиме.

При реальной опасности распространения газового облака вредных веществ необходима своевременная информация о направлении и скорости движения газового облака. Для этого разработана программа для расчета движения газового облака при техногенных авариях. Исходными значениями для расчета являются текущие значения направления и скорости ветра в реперных точках исследуемого района, полученные от штатных информационных служб (Росгидромет), и информация об источнике выброса (местонахождение и характеристика выбрасываемого вещества) от штатных служб (ГО и ЧС).

При изменении текущих значений скорости и направления ветра во время движения газового об-

лака прогноз уточняют с помощью аналогичных действий (ввод новых значений направления и скорости ветра, запрос к базе эпюр, выбор эпюр, расчет динамики движения газового облака). Система прогноза работает до тех пор, пока в этом есть необходимость. Для расчета движения газового облака в случае аварии, связанной с выбросом в атмосферу вредного вещества, значения направления и скорости ветра вводят в программу расчета движения газового облака: из базы эпюр выбирают эпюру движения воздушных потоков, наиболее близкую текущему направлению и скорости ветра в реперных узлах. На основе выбранной эпюры рассчитывают поле распространения газового облака и строят краткосрочный прогноз.

Методика прогнозирования движения загрязняющего облака основана на его представлении большим числом точек — элементарных объемов газа. Для каждой точки рассчитывают два вида движения: перемещение воздушными потоками и диффузию. Перемещение воздушным потоком определяют по полю его распределения, представляемого соответствующими проекционными моделями. Диффузию частиц газа моделируют на основании первого закона Фика, согласно которому количество продиффундировавшего вещества пропорционально градиенту концентрации [7]. Для расчета диффузии используют сетку из 8 элементов эпюры, соседних элементу, в котором находится данная точка объема (рис. 6).

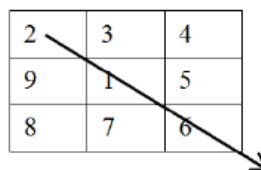


Рис. 6. Сетка для расчета диффузии частиц газового облака

При этом применяют следующий эвристический алгоритм расчета диффузии: для каждой точки (элементарного объема газа) определяют смещения за счет разности концентраций между центральным элементом сетки 1 и соседним с ним элементом, а также случайное смещение, пропорциональное концентрации в текущей камере [3]:

$$\begin{aligned} \Delta x d &= k_{xx} N_2 + k_x N_9 + k_{xx} N_3 - k_{xx} N_4 - \\ &- k_x N_5 - k_{xx} N_6 - f_x N_1; \\ \Delta y d &= k_{yy} N_2 + k_y N_3 + k_{yy} N_4 - k_{yy} N_6 - \\ &- k_y N_7 - k_{yy} N_8 - f_y N_1, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $N_1, N_2, \dots, N_9$  — количество точек в квадратах 1, 2, ..., 9;

$k_x, k_y$  — коэффициенты диффузии для осей  $x$  и  $y$ ;

$k_{xx}, k_{yy}$  — диагональные коэффициенты диффузии для осей  $x$  и  $y$ ;

$f_x, f_y$  — коэффициенты случайной диффузии из квадрата 1 по осям  $x$  и  $y$ .

В результате экспериментального исследования в течение более 1,5 лет проведено 57 обследований данного района при различных метеоусловиях, и получены исчерпывающие результаты, часть которых представлена в табл. 2.



Таблица 2

Показания направления и скорости ветра на исследуемом участке

№ эксперимента	Преобладающее направление ветра	Скорость ветра, м/с / направление ветра, град			
		ПНЗ № 1	ПНЗ № 2	ПНЗ № 3	Реперная точка в промзоне
1	С (0°)	1,3/0	1,3/0	1,2/2	2/4
2	СВ (45°)	1,6/40	1,7/35	1,7/45	2/60
3	В (90°)	0,5/105	0,6/100	0,6/100	1/110
4	ЮВ (135°)	2,7/140	2,7/135	2,8/140	3/145
5	Ю (180°)	2,5/180	2,3/180	2,0/195	4/240
6	ЮЗ (225°)	3,0/240	3,5/225	3,1/ 225	5/165
7	З (270°)	2,5/265	2,5/260	2,6/270	3/280
8	СЗ (315°)	0,3/310	0,3/310	0,4/310	1/320

Данные с четырех постов АСК "Атмосфера", анализирующих загрязнения воздушного бассейна шестью приоритетными химическими веществами, так же как и с четырех стационарных лабораторий Росгидромета типа "Пост-2", которые размещены в зоне жилой застройки города, не отражают реальную картину воздушного бассейна над промышленным кластером (рис. 7).



а



б

Рис. 7. Прогнозирование движения газового облака вещества с коэффициентом диффузии 0,03 при тихом ветре (0,7 м/с) юго-западного направления через 40 мин:

а — на основе данных с метеопоста; б — на основе реперных измерений метеоданных

Из рис. 7 видно, что распространение газового облака около Шатского водохранилища поменяло свое направление и свернуло на жилой массив г. Новомосковска. Таким образом, предоставленные данные измерений атмосферного воздуха района являются нерепрезентативными и неполными и в случае техногенной аварии с выбросом в атмосферу сильнодействующих ядовитых веществ службы ГО и ЧС не смогут рассчитать адекватный сценарий аварии с учетом размера и перемещения газового облака, что может привести к экологической катастрофе [3].

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что при выборе местоположения поста наблюдения за состоянием атмосферного воздуха недостаточно учесть только преобладающее направление ветра в данном районе. Необходимо также проанализировать влияние ландшафта местности на движение воздушных потоков.

Остро стоит проблема оборудования нового поста АСК "Атмосфера" (Пост № 5) в Заводском районе в связи с непосредственной близостью к промышленной части города, что является одним из способов модернизации АСК "Атмосферы". Размещение поста наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха вблизи санитарно-защитной зоны предприятий обеспечивает гарантированное и своевременное выявление негативных экологических факторов.

Развитием данного исследования является также выбор оптимального места для расположения на основе методики синтеза рационального плана размещения реперных узлов наблюдения Поста № 5. При этом для обеспечения необходимой эффективности предложенной методики необходима достаточная статистика о состоянии воздушных потоков (предыстория воздушного бассейна), полученная по данным специально организованных полномасштабных замеров в узлах равномерной сетки адекватного размера.

## Заключение

Рост промышленности влечет за собой необходимость совершенствования систем мониторинга состояния атмосферного воздуха населенных мест. Для г. Новомосковска как крупного промышленного центра это особо актуально. Существующая в городе система экомониторинга, представленная постами Росгидромета и автоматизированной системой кон-

троля "Атмосфера", не в полной мере справляется с поставленными перед ней задачами. Стационарные посты АСК "Атмосфера" и Росгидромета расположены на территории жилой застройки города вдали от основного промышленного района, где сосредоточено большинство химических предприятий города. Целью данной работы было выяснение того, насколько точно данные с действующих постов наблюдения отражают картину воздушного бассейна над промышленным районом. Авторами использован интерполяционный метод контроля движения воздушной среды районов с неоднородностью ландшафта местности при техногенных авариях. Полученные результаты однозначно свидетельствуют о том, что предоставленные с постов экомониторинга данные измерений атмосферного воздуха района являются нерепрезентативными и неполными, и в случае техногенной аварии с выбросом в атмосферу сильнодействующих ядовитых веществ службы ГО и ЧС не смогут рассчитать адекватный сценарий аварии с учетом размера и перемещения газового облака, что может привести к экологической катастрофе. Таким образом, необходима модернизация действующей системы экомониторинга атмосферы Новомосковска в части оборудования нового поста АСК "Атмосфера" (Пост № 5) в Заводском районе в непосредственной близости к санитарно-защитной

зоне предприятий, что обеспечит гарантированное и своевременное выявление негативных экологических факторов. Также при выборе местоположения нового поста необходимо учитывать не только преобладающее направление ветра в данном районе, но и влияние ландшафта местности на движение воздушных потоков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. РД 52.04.186-89 Руководство по контролю загрязнения атмосферы.
2. ГОСТ 17.2.3.01-86 "Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов".
3. Вепренцева О. Н. Интерполяционный метод мониторинга воздушной среды территорий с неоднородностью рельефа при техногенных авариях. Дисс. ... канд. техн. наук. — М., 2006. — 154 с.
4. Беляев Ю. И., Вент Д. П., Гербер Ю. В., Вепренцева О. Н., Латышенко К. П. Экологический мониторинг атмосферы мегаполиса // Химическое и нефтяное машиностроение. 2009. Т. 45. № 7, 8. С. 491—494.
5. Гринюк О. Н., Алексашина О. В. Особенности газоаналитических измерений // Вестник Межд. академии системных исследований. Информатика, экология, экономика. 2015. Т. 17. № 1. С. 74—80.
6. Кокоев В. Т., Бочаров В. А. Экологический мониторинг и прогнозирование // ГИАБ. 2004. № 12. [Электронный ресурс] <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskii-monitoring-i-prognoz> (дата обращения: 20.05.2020).
7. Алексашина О. В., Чиннов М. А., Гринюк О. Н. Циркониевый анализатор кислорода. Все материалы // Энциклопедический справочник. 2016. № 2. С. 75—78.

## The use of innovative methods for studying air pollution to improve the atmosphere control system Novomoskovsk city

A. V. ARKHIPOV

Tula State University, Tula, Russia

O. N. GRINYUK

Nomoskovsk Institute (branch) of the Russian Chemical-Technological University  
named after D. I. Mendeleev, Novomoskovsk, Tula region, Russia

A. D. MIKHED

ANO IN "VPA International Police Academy", Tula, Russia

O. V. ALEKSASHINA

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

*The aim of the work is to evaluate, on the basis of innovative research methods, the representativeness and sufficiency of the data obtained from the posts of the environmental monitoring system. The interpolation method is used as a research method to control the movement of the air of areas with heterogeneous terrain during technological accidents. The method consists of three main stages: experimental surveys of the weather conditions of the region, processing of experimental data using noise-tolerant interpolation, and operational monitoring of the dynamics of the air during technological accidents.*

**Keywords:** environmental monitoring, atmospheric pollution, interpolation method for atmospheric control, stationary laboratory, automated control system, industrial cluster, air basin, industrial accident.

Bibliography — 7 references.

Received July 2, 2020

УДК 551.521:574.4:621.311.22

## Радионуклиды в наземных экосистемах природно-техногенной территории Новочеркасской ГРЭС

<sup>1</sup> Е. А. БУРАЕВА, канд. хим. наук; <sup>2</sup> В. В. ЧЕЧЕВАТОВА; <sup>2</sup> А. И. СAEВСКИЙ;  
<sup>1,2</sup> Т. А. МИХАЙЛОВА; <sup>1</sup> Е. А. КАЩАЕВА

<sup>1</sup> НИИ физики Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup> Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

В. А. ЧАПЛЫГИН, канд. биол. наук; Ю. А. ЛИТВИНОВ, канд. биол. наук;  
Т. М. МИНКИНА, д-р биол. наук

Академия биологии и биотехнологии им. Д. И. Ивановского  
Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Россия

*Проведена оценка содержания радионуклидов в почвах и растениях в районе природно-техногенной территории Новочеркасской ГРЭС по результатам экспедиций 2012—2016 гг. Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения не превышает 0,3 мкЗв/ч. Средние содержания <sup>137</sup>Cs, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th и <sup>40</sup>K в почвах составляют 20, 25, 250 и 350 Бк/кг соответственно. Показано, что в растениях в значительных количествах присутствует <sup>226</sup>Ra, вероятно напрямую поступающий в окружающую среду при сжигании органического топлива.*

**Ключевые слова:** радионуклиды, почва, растения, распределение, мощность эквивалентной дозы гамма-излучения.

Тепловые электрические станции (ТЭС, ГРЭС) широко распространены по всему миру для производства электроэнергии. В качестве энергоресурса используют органическое топливо (природный газ, мазут, уголь). Уголь является основным видом твердого органического топлива природного происхождения, используемого для производства электроэнергии, и к нему применяют жесткие требования по хранению и подготовке к использованию [1]. Тепловые электростанции сохраняют в ближайшие десятилетия свою ведущую роль, обеспечивая до 60 % мирового производства электроэнергии [2]. При сжигании органического топлива в атмосферу поступает большое количество продуктов сгорания, в том числе радионуклидов, распространяющихся на значительные расстояния и выпадающих на почвенный покров

и на растительность. Таким образом, предприятия, работающие на угле, могут служить одним из источников повышенного радиационного фона от естественных радионуклидов. Воздействие угольного предприятия на окружающую территорию зависит от типа угля, а также от природных факторов: преобладающего направления ветра, климата, рельефа местности, типа почвы.

Проводятся разработки высокоэффективных систем контроля состава продуктов сгорания и совершенствование установок для уменьшения выбросов оксидов азота, серы, летучей золы, а также предпринимаются попытки максимально полезно использовать золошлаковые отходы вместо их утилизации на золоотвалах [3—7].

Летучая и осадочная золы являются основными продуктами сжигания угля, они различны по физическим и химическим свойствам [8]. Небольшая часть летучей золы выбрасывается в атмосферу, после чего она оседает на почву, воду или растения в результате сухих и мокрых выпадений.

ОАО Новочеркасская ГРЭС (одна из крупнейших государственных районных электростанций России) является основным источником выбросов загрязняющих веществ не только в городе Новочеркасске, но и во всей Ростовской области. Для природно-техногенной территории Новочеркасской ГРЭС наиболее детально изучено содержание и распределение тяжелых металлов в почвах и растительности [9]. Для таких предприятий также важны исследования активности радионуклидов в топливе, отходах и близлежащих экосистемах, однако их проводят заметно реже [10, 11]. Работа посвящена оценке особенностей распределения радионуклидов в почвах и растительности на территориях, прилегающих к Новочеркасской ГРЭС.

**Буреава Елена Анатольевна**, ведущий научный сотрудник.

E-mail: buraeva@sfedu.ru

**Чечеватова Влада Вячеславовна**, магистрант.

E-mail: vlprocenko@sfedu.ru

**Саевский Антон Игоревич**, магистрант.

E-mail: saevskiy@sfedu.ru

**Михайлова Татьяна Андреевна**, аспирант.

E-mail: tatmihaylova@sfedu.ru

**Кацаева Елизавета Александровна**, магистрант.

E-mail: lizakashaeva1997@gmail.com

**Чаплыгин Виктор Анатольевич**, старший научный сотрудник.

E-mail: chaplygin@sfedu.ru

**Литвинов Юрий Алексеевич**, старший преподаватель.

E-mail: yualitvinov@sfedu.ru

**Минкина Татьяна Михайловна**, заведующая кафедрой

"Почвоведение и оценка земельных ресурсов".

E-mail: minkina@sfedu.ru

Статья поступила в редакцию 6 мая 2020 г.

© Буреава Е. А., Чечеватова В. В., Саевский А. И.,  
Михайлова Т. А., Кацаева Е. А., Чаплыгин В. А., Литвинов Ю. А.,  
Минкина Т. М., 2020

## Объекты и методы исследования

Контрольные участки (КУ 1-12) закладывали вокруг Новочеркасской ГРЭС на различных расстояниях (1—20 км). В соответствии с розой ветров выбрано преобладающее северо-западное направление ветров, так называемое генеральное направление (КУ 4, 5, 8—10). На всех контрольных участках перед отбором почвенных и растительных образцов измеряли мощность эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД, мкЗв/ч) дозиметрами-радиометрами СРП-88н, ДРБП-03 и ДКС-96 с блоком детектирования БДКС-96с. Измерения МЭД гамма-излучения проводили на высоте 2—3 и 100 см над поверхностью почвы согласно методическим рекомендациям [12].

Для оценки особенностей распределения  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  в почвах природно-техногенной территории Новочеркасской ГРЭС почвенные образцы отбирали с глубины 0—10 см методом конверта (квадрат со стороной 10 м) [13]. Почвы обследуемой территории представлены в основном черноземом обыкновенным (КУ 1, 4, 5, 7, 9, 10), лугово-черноземной (КУ 3, 6, 8, 11) и аллювиальной (КУ 2, 12) почвами. Растения, преобладающие на исследуемых мониторинговых площадках, относятся к семействам Мятликовые (*Poaceae*) и Астровые (*Asteraceae*). Доминирующие виды представлены мятликом луговым (*Poa pratensis*), тысячелистником благородным (*Achillea nobilis* L.), полынью австрийской (*Artemisia austriaca*).

После отбора почвенные образцы высушивали и измельчали до размера частиц не более 1 мм. Растительные образцы разделяли на соцветия, листовую (стеблевую) и корневую части, также высушивали до воздушно-сухого состояния и измельчали.

Удельную активность ( $A_{уд}$ )  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  в почвах и растениях определяли гамма-спектрометрическим методом радионуклидного анализа с использованием низкофонового гамма-спектрометра [14] на основе полупроводникового коаксиального GeHP-детектора с эффективностью 25 % в диапазоне энергий 13—1500 кэВ, отношение пик/Комптон равно 7:1 (модель 7229N-7500sl-2520, Canberra Corporate Headquarters, Франция).

Для оценки степени миграции радионуклидов из почвы в растения использовали коэффициент перехода  $K_{\Pi}$ , м<sup>2</sup>/кг [15—18]. Он является одним из важных показателей, применяемых в прогностических расчетах возможных уровней загрязнения радиоактивными веществами продукции растениеводства и отражает степень концентрации нуклида в данной культуре в определенных условиях произрастания. Коэффициент перехода определяли как отношение содержания радионуклида в единице массы растений к плотности загрязнения единицы площади почвы:

$$K_{\Pi} = \frac{A_{уд}}{A_3},$$

где  $A_{уд}$  — удельная активность радионуклидов в растениях, Бк/кг;  
 $A_3$  — запас радионуклида в слое почвенного профиля, кБк/м<sup>2</sup>.

## Результаты и их обсуждение

Мощность эквивалентной дозы (МЭД) гамма-излучения является одним из параметров, характеризующих радиоактивность природных и техногенных экосистем. Согласно Нормам радиационной безопасности Российской Федерации [19] гамма-фон на территориях не должен превышать 0,3 мкЗв/ч.

Гамма-фон на территориях в основном обусловлен излучением от радионуклидов, содержащихся в почве (таких, как естественные радионуклиды рядов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ , искусственный  $^{137}\text{Cs}$ ), плотностью потока радона с поверхности почвы и космическим излучением (в том числе и от солнечной радиации). Распределение МЭД гамма-излучения в районе исследования изменяется в пределах 0,08—0,25 мкЗв/ч, что характерно для Ростовской области [20] и согласуется с данными литературных источников (0,1—0,2 мкЗв/ч) [21, 22].

На рис. 1 и 2 представлены усредненные данные измеренной удельной активности радионуклидов ( $A_{уд}$ , Бк/кг) в почвах (слой 0—10 см) всех контрольных участков за 5-летний период исследований.

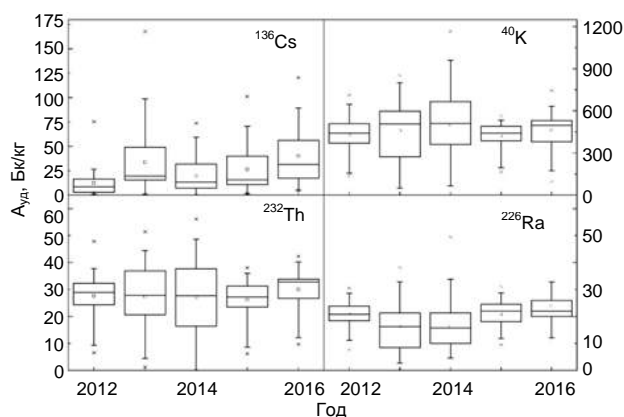


Рис. 1. Удельная активность радионуклидов во всех почвах территории Новочеркасской ГРЭС (усредненные данные по всем площадкам мониторинга)

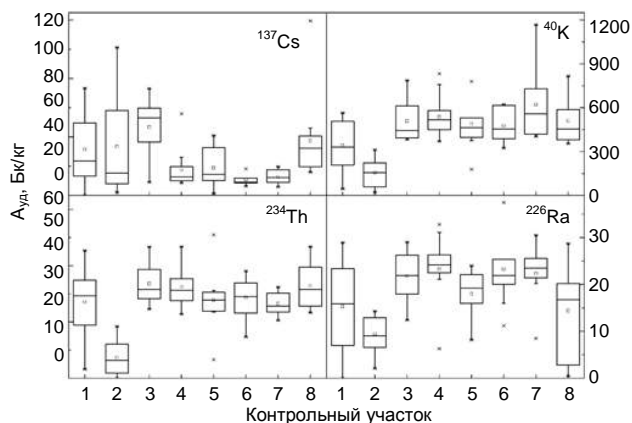


Рис. 2. Варьирование удельной активности радионуклидов в пределах одного контрольного участка (на примере КУ 1-8)

Средняя удельная активность искусственного  $^{137}\text{Cs}$  в почвах природно-техногенной территории Новочеркасской ГРЭС составляет 20 Бк/кг и сопостави-

ма с активностью данного радионуклида в наземных экосистемах других районов Ростовской области [20]. Различия удельной активности искусственного  $^{137}\text{Cs}$  в почвах в разные годы (рис. 1) и на разных КУ (рис. 2) обусловлены неравномерным выпадением данного радионуклида после аварии на Чернобыльской АЭС, свойствами почв, уклоном местности и выносом растительностью. Значительные вариации содержания радиоцезия в пределах одного КУ объясняются химическими свойствами данного элемента, а также, возможно, влиянием микрорельефа местности [23]. Наличие развитого микрорельефа может способствовать значительному перераспределению тепла и влаги и, как следствие, привести к значительному перераспределению радионуклидов в почвах даже в пределах одной небольшой территории. Также микрорельеф создает особый микроклимат и различную степень увлажнения почв при одинаковом количестве атмосферных осадков [23]. Это усложняет решение различных задач в области оценки радиоактивности почв при мониторинговых исследованиях последствий деятельности предприятий топливной энергетики.

Удельная активность естественных радионуклидов в среднем на всех КУ составляет 25 Бк/кг для  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$ , для  $^{40}\text{K}$  — 350 Бк/кг. Полученные данные характерны для почв Ростовской области [24]. Поступление и распределение указанных радионуклидов в наземных экосистемах может быть связано с деятельностью Новочеркасской ГРЭС [8, 25]. Содержание естественных дозообразующих радионуклидов в пределах одного контрольного участка в основном варьируется в пределах 20–50 %, а на ряде контрольных участков вариации данных радионуклидов находятся в пределах погрешности определения удельной активности (10–15 %) (рис. 2). При этом средняя удельная активность  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  не изменяется со временем (рис. 1).

Определение радионуклидов в растительных объектах, распространенных на природно-техногенной территории Новочеркасской ГРЭС, показало, что на одних и тех же КУ наблюдается синхронное поведение концентраций  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$  у различных растений (рис. 3). Так, при увеличении концентрации одного радионуклида (например,  $^{137}\text{Cs}$ , относительно его же концентраций на других участках) на данном контрольном участке относительная концентрация второго (например,  $^{40}\text{K}$ ) понижается, и наоборот.

Такой характер распределения радионуклидов (и их содержания) объясняется тем, что щелочные металлы калий и цезий обладают схожими химическими свойствами, легко растворяются в воде и, соответственно, активно мигрируют в почве и особенно в растениях. Это приводит к конкурентному характеру взаимодействия данных элементов, в том числе и при поступлении в растения [26]. Также принято считать, что поступление  $^{137}\text{Cs}$  из почвенного раствора в клетки корней происходит по тем же мембранным каналам, что и поступление калия [17]. Не стоит исключать влияние удельной поверхности корней на сорбцию  $^{137}\text{Cs}$  (и других радионуклидов), в том числе за счет "пленочных эффектов", детально описанных в работе [17].

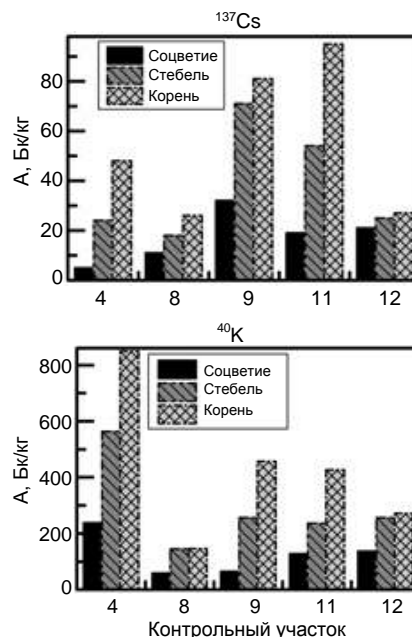


Рис. 3. Распределение  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$  в растениях полыни австрийской (*Artemisia austriaca*)

На рис. 4 представлено распределение  $^{226}\text{Ra}$  в органах некоторых видов растений, произрастающих на исследуемых контрольных точках.

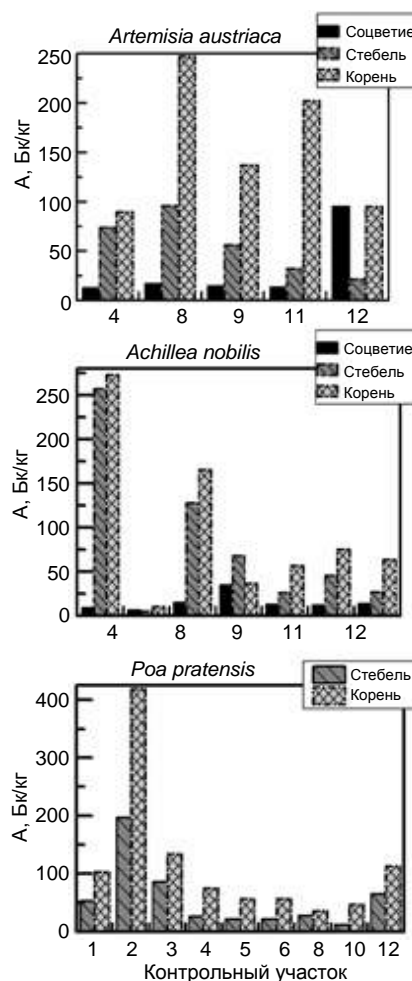


Рис. 4. Распределение  $^{226}\text{Ra}$  в травянистых растениях

На соцветиях и листьях растений радионуклиды задерживаются слабо, так как их может смыть и выветривать с поверхности данных частей растений, что свидетельствует о зависимости содержания радиоактивных элементов от метеоусловий. При этом в растениях с гладкими листьями (мятлик луговой), как правило, удельная активность радия ниже, чем в растениях с ворсистыми листьями (например, в полыни австрийской). Достаточно высокое содержание  $^{226}\text{Ra}$  в травянистых растениях территории Новочеркасской ГРЭС может быть связано с преобладающим фоллиарным типом загрязнения в результате деятельности данного предприятия.

Максимумы концентраций  $^{226}\text{Ra}$  в растительности природно-техногенной территории Новочеркасской ГРЭС в основном наблюдаются на участках, расположенных вдоль так называемого главного (генерального) направления (КУ 4, 5, 8—10) (рис. 4). В таком случае очевидна роль прямого загрязнения в первую очередь поверхности растений данным радионуклидом. Это может происходить как простым переносом частиц атмосферных выбросов предприятия по воздуху, так и при осаждении их из воздуха и ветровом подъеме поверхности почвы (вторичное загрязнение) [11].

Важно также отметить, что в каждом из растений концентрация  $^{226}\text{Ra}$  в корневой части превышает его концентрацию в стебле и соцветии, что говорит о почве как о главном источнике поступления данного радионуклида. В таком случае значительную роль в миграции радионуклидов в системе почва—растение начинают играть особенности свойств самой почвы. В пробах стеблей и корней мятлика лугового (*Poa pratensis*) и тысячелистника благородного (*Achillea nobilis*) на КУ 2 наблюдаются максимумы концентрации  $^{226}\text{Ra}$  (250—280 и 200—420 Бк/кг соответственно) (рис. 4). При этом в аллювиальных почвах (КУ 2 и 12) концентрация рассматриваемого радионуклида составляла всего 7—15 Бк/кг. Для данного типа почв характерен активный водный режим, что приводит к миграции радионуклидов как в системе почва—растение, так и по почвенному профилю. В связи с этим необходимо оценивать как воздушное, так и почвенное поступление радионуклидов (в частности,  $^{226}\text{Ra}$ ) в растения в районе расположения предприятий топливной энергетики.

Оценка степени перехода радионуклидов из почвы в растения показала, что максимальные величины  $K_d$ , отмечаются для  $^{40}\text{K}$  и  $^{226}\text{Ra}$  (таблица).

Коэффициенты перехода  $K_d$  радионуклидов из почвы в растения на контрольных участках природно-техногенной территории НЧГРЭС,  $\text{м}^2/\text{кг}$

Растение	$^{137}\text{Cs}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
Полынь	0,019—0,045	0,0007—0,2	~0,004	0,002—0,3
Мятлик	0,003—0,07	0,05—0,8	—	0,009—0,02
Тысячелистник	0,01—0,09	0,006—0,4	~0,05	~0,015

Достаточно высокие значения  $K_d$  для  $^{40}\text{K}$  объясняются тем, что этот естественный радионуклид яв-

ляется одним из важных биологических элементов. В почве калий содержится преимущественно в виде окислов, а в почвенном растворе — в виде солей. В биомассу на земной поверхности он поступает в основном в растворимой форме через корневую систему и распределяется в живых организмах равномерно [26]. О радионуклиде земного происхождения  $^{226}\text{Ra}$  можно сказать, что он содержится практически во всех объектах окружающей среды и достаточно хорошо усваивается растениями [15]. При этом, как уже было указано, не стоит исключать влияние НЧГРЭС на загрязнение радием растений.

Минимальные величины  $K_d$  радионуклидов в растительности получены для  $^{232}\text{Th}$  и  $^{137}\text{Cs}$  на всех контрольных участках.  $^{137}\text{Cs}$  считают радионуклидом с пониженной степенью переноса его из почвы в растения [18]. Торий достаточно прочно сорбируется почвами [27], что значительно затрудняет накопление данного радионуклида растениями. Периодическая индикация тория в растениях может быть обусловлена механическим загрязнением растительной массы за счет сухих и мокрых выпадений, а также ветрового подъема пыли.

В целом химические свойства данных радионуклидов, различия в почвах на контрольных участках территории исследования, климатические условия и биологические особенности растений могут приводить к достаточно неоднозначным результатам при оценке степени накопления радионуклидов растениями даже в пределах одного региона.

## Выводы

- В почвах природно-техногенной территории Новочеркасской ГРЭС наблюдаются значимые вариации радионуклидов как в пределах одного контрольного участка, так и на разных КУ.
- Имеет место зависимость удельной активности радионуклидов в растениях от расположения (и расстояния) относительно Новочеркасской ГРЭС.
- Показан конкурентный характер отношений калия и цезия в биологических объектах.
- На территории исследования преобладает корневое поступление радионуклидов в растения. При этом существенную роль играет листовое (фоллиарное) загрязнение растений радионуклидами, поступающими с атмосферными выбросами предприятия.

Стоит отметить, что необходимо не только уделять пристальное внимание новейшим методам улучшения технологий контроля выбросов и их уменьшению на предприятиях теплоэнергетики, но и проводить комплексные оценки изменения радиоактивности территорий и объектов в зонах расположения подобных предприятий.

Работа выполнена при финансовой поддержке  
Министерства науки и высшего образования  
Российской Федерации (Государственное задание  
в области научной деятельности,  
Южный федеральный университет, 2020 г.).  
Тема № БАЗ0110/20-3-07ИФ.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Мосинец В. Н., Грязнов М. В. Уранодобывающая промышленность и окружающая среда. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Макаров А. А., Митрова Т. А., Веселов Ф. В., Галкина А. А., Кулагин В. А. Перспективы электроэнергетики в условиях трансформации мировых энергетических рынков // Теплоэнергетика. 2017. № 10. С. 5—16.
3. Кондратьева О. Е., Росляков П. В. Сравнительный анализ газоаналитических систем для проведения непрерывного мониторинга выбросов ТЭС // Теплоэнергетика. 2017. № 6. С. 48—62.
4. Росляков П. В., Ионкин И. Л., Кондратьева О. Е. и др. Автоматизированные системы непрерывного контроля и учета выбросов вредных веществ ТЭС в атмосферу // Теплоэнергетика. 2015. № 3. С. 67—74.
5. Тумановский А. Г. Перспективы развития угольных ТЭС России // Теплоэнергетика. 2017. № 6. С. 3—13.
6. Делицын Л. М., Власов А. С., Бородин Т. И. и др. Инновационные направления полного использования золы ТЭС, работающих на угле, для производства глинозема и строительных материалов // Теплоэнергетика. 2013. № 4. С. 3—10.
7. Зройчиков Н. А., Зройчиков Н. А., Прохоров В. Б., Тупов В. Б. и др. Возможные пути снижения воздействия объектов теплоэнергетики на окружающую среду // Теплоэнергетика. 2015. № 2. С. 69—76.
8. Dinis M. L. et al. Modeling Radionuclides Dispersion and Deposition Downwind of a Coal-Fired Power Plant // Procedia Earth and Planetary Science. 2014. № 8. P. 59—63.
9. Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Chaplygin V. A. et al. Content and distribution of heavy metals in herbaceous plants under the effect of industrial aerosol emissions // J. Geochemical Exploration. 2017. V. 174. P. 113—120.
10. Крылов Д. А., Сидорова Г. П. Радионуклиды в углях и золе угольных ТЭС // Теплоэнергетика. 2013. № 4. С. 11—15.
11. Давыдов М. Г. и др. Радиоэкология: учебник для вузов. — Ростов н/Д: Феникс, 2013.
12. МВК 5.6(38)-11 Методика дозиметрического контроля объектов, содержащих ЕРН, 2011.
13. МВК №1.5.2(45)-11. Методика контроля удельной активности грунта (почвы) с применением пробоотбора. 2011. Свидетельство № 45090.1К196.
14. Buraeva E. A., Davydov M. G., Zorina L. V., Stasov V. V. Components of the background of GE(Li) and GE detectors in passive shielding // Atomic Energy. 2007. V. 103. № 5. P. 895—900.
15. Matveyeva I. et al. Uptake of uranium, thorium and radium isotopes by plants growing in dam impoundment Tasotkel and the Lower Shu region (Kazakhstan) // Radiochimica Acta. 2015. V. 104 (1). P. 51—57.
16. Chandrashekara K., Somashekarappa H. M. Estimation of radionuclides concentration and average annual committed effective dose due to ingestion for some selected medicinal plants of South India // J. Radiation Research and Applied Sciences. 2016. V. 9. P. 68—77.
17. Парамонова Т. А., Мамихин С. В. Корневое поглощение  $^{137}\text{Cs}$  и его распределение между надземными и подземными органами растений: анализ литературы // Радиационная биология. Радиоэкология. 2017. Т. 57. № 6. С. 646—662.
18. Парамонова Т. А. и др. Сравнительный анализ поступления  $^{137}\text{Cs}$  в луговую растительность районов черноземной зоны, в различной степени загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2017. Т. 57. № 4. С. 429—439.
19. СанПин 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).
20. Buraeva E. A., Stasov V. V., Nefedov V. S. et al. Features of  $^{137}\text{Cs}$  distribution and dynamics in the main soils of the steppe zone in the southern European Russia // Geoderma. 2015. V. 259, 260. P. 259—270.
21. Wang W. X. et al. Studies on natural radioactivity of soil in Xia-zhuang uranium ore field, Guangdong // Environmental Science. 2005. V. 25. P. 120—123.
22. Song G. et al. Natural radioactivity levels in topsoil from the Pearl River Delta Zone, Guangdong, China // J. Environmental Radioactivity. 2012. V. 103. P. 48—53.
23. Линник В. Г. Автореф. дис. ... д-ра географ. наук. — М.: МГУ, 2008.
24. Бурева Е. А. и др. Современные проблемы науки и образования [Электронный ресурс]. URL: [www.science-education.ru/110-9652](http://www.science-education.ru/110-9652)
25. Vaasma T. et al. The enrichment behavior of natural radionuclides in pulverized oil shale-fired power plants // J. Environmental Radioactivity. 2014. V. 138. P. 427—433.
26. Marculioniene D. et al. Accumulation and translocation peculiarities of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{40}\text{K}$  in the soil – plant system // J. Environmental Radioactivity. 2015. V. 150. P. 86—92.
27. Рачкова Н. Г., Шуктомова И. И., Таскаев А. И. Состояние в почвах естественных радионуклидов урана, радия и тория (обзор) // Почвоведение. 2010. № 6. С. 698—705.

## Radionuclides in terrestrial ecosystems of the natural and technogenic territory of Novochoerkasskaya TPP, Rostov Region

<sup>1</sup> E. A. BURAEVA; <sup>2</sup> V. V. CHECHEVATOVA; <sup>2</sup> A. I. SAEVSKIY,  
<sup>1,2</sup> T. A. MIKHAYLOVA, <sup>1</sup> E. A. KASHCHAEVA

<sup>1</sup> Research institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>2</sup> Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

V. A. CHAPLYGIN, Y. A. LITVINOV, T. M. MINKINA

Academy of Biology and Biotechnology Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

*The radionuclides activity concentration in soils and plants in the area of the natural and technogenic territory of Novochoerkasskaya TPP was estimated based on the results of expeditions 2012—2016. Equivalent dose of gamma radiation not exceed 0.3  $\mu\text{Sv}$  / h. The mean activity concentration of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  in soils are 20, 25, 250 and 350 Bq/kg, respectively. It has been shown that  $^{226}\text{Ra}$  is present in plants in significant quantities, probably directly entering the environment when burning fossil fuels.*

**Keywords:** radionuclides, soil, plants, distribution, equivalent dose rate of gamma radiation.

Bibliography — 27 references.

Received May 6, 2020



УДК 621.039 + 51-74 : 504.05

### Прогнозные оценки времени прогрева водоема-охладителя при тепловых сбросах с атомной станции малой мощности в Арктическом регионе

П. В. АМОСОВ, канд. техн. наук

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

*Представлены прогнозные оценки времени увеличения температуры водоема-охладителя в летний период при тепловых сбросах с реакторных установок атомной станции малой мощности от 0,5 до 10 МВт (тепл.) для климатических условий северо-востока России при вариации площади поверхности и глубины водоема. Расчеты выполнены на базе выведенного аналитического выражения. Проанализированы темпы прогрева для варьируемых значений площади поверхности зеркала и глубины водоема, при которых нагрев воды в наиболее жаркий летний месяц не превысит 0,5 °С, что обеспечит отсутствие негативного воздействия на экологию водоема. Для мощности реакторных установок 10 МВт (тепл.) получены аналитические зависимости, позволяющие оценивать продолжительность нагрева водоема-охладителя при вариации глубины и площади поверхности водоемов в широком диапазоне значений.*

**Ключевые слова:** атомная станция малой мощности, тепловые сбросы, поверхность зеркала, глубина водоема-охладителя.

#### Постановочная часть

В 2015—2017 гг. в Горном институте КНЦ РАН проводили исследования по теме "Разработка научных основ и методологии создания подземных комплексов для размещения атомных станций малой мощности в условиях Арктики". В рамках задачи "Исследование взаимодействия подземной атомной станции малой мощности с окружающей средой в условиях Арктики" выполнены оценки температурно-го режима водоема-охладителя при тепловых сбросах с атомной станции малой мощности (АСММ) для климатических условий северо-востока России. Постановочная часть задачи, обосновывающая необходимость выполнения оценок, и сами результаты исследований опубликованы в [1] и в отдельной главе коллективной монографии [2].

---

**Амосов Павел Васильевич**, ведущий научный сотрудник.  
E-mail: p.amosov@ksc.ru

Статья поступила в редакцию 6 июля 2020 г.

© Амосов П. В., 2020

Во введениях указанных публикаций представлены обоснования необходимости выполнения исследований по возможному использованию атомных станций малой мощности в Арктических регионах России [3—14]. За прошедшие после выхода публикаций [1, 2] годы интерес к исследованиям по указанной проблеме не уменьшился, свидетельством чему являются, например, публикации [15—30], в которых обсуждаются некоторые аспекты использования АСММ в различных сферах деятельности в Арктических условиях.

Основываясь на "Методических указаниях по технологическим расчетам водоемов-охладителей" [31], авторы работ [1, 2] выполнили оценки максимальной летней средней по свободной поверхности (среднеповерхностная) температуры  $T_s$  воды водоемов для климатических условий северо-востока России. Показано, что для мощностей реакторных установок (РУ) АСММ не более 10 МВт (тепл.) для охлаждения конденсаторов турбин при условии практического отсутствия негативного влияния на водоем достаточно иметь площади поверхности, не превышающие 1 км<sup>2</sup>. В связи с этим предложено для РУ АСММ мощно-

стью до 10 МВт (тепл.) сделать исключение из Водного кодекса [32] и разрешить использовать прямую схему сброса тепла в малые природные водоемы, что не повлечет негативных экологических последствий, но может существенно удешевить сооружение, эксплуатацию и последующий вывод из эксплуатации АСММ.

В 2019 г. в Горном институте КНЦ РАН исследования по разработке научных и инженерных основ создания подземных комплексов атомных станций малой мощности и методических подходов для обоснования технологий строительства подземных станций в условиях криолитозоны были остановлены в связи со смертью научного руководителя организации академика Н. Н. Мельникова. Лаборатория проблем освоения и рационального использования подземного пространства, которая на протяжении многих лет занималась исследованиями аспектов радиоэкологии, в том числе взаимодействия подземных объектов с массивами горных пород, и разработкой научных основ размещения подземных атомных станций, хранилищ радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива, расформирована.

В выполненных оценках работ [1, 2] выводы сделаны по максимально консервативным значениям среднеповерхностной температуры. При этом совершенно не обсуждается временная составляющая процесса прогрева водоема-охладителя. Оставаясь на методических позициях специалистов ОАО "ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева" [31], автор, продолжая начатую с коллегами задачу, делает попытку включить в оценку временную составляющую скорости увеличения среднеповерхностной температуры воды водоема. Как и ранее [1, 2], предложено ориентироваться на выводы специалистов института гидробиологии АН Украины [33]: при нагреве воды в наиболее жаркий месяц на 0,5—1,5 °С воздействие на водоем будет слабым (незначительные изменения гидрохимического и гидробиологического режимов). В выполненных оценках приняты наиболее консервативные условия: самый теплый месяц и минимальный прогрев воды (0,5 °С).

Именно этой проблеме посвящены исследования, и представлены результаты нестационарной оценки нагрева водоема в летний период при тепловых сбросах АСММ для линейки мощностей реакторных установок до 10 МВт (тепл.) с учетом глубины и площади зеркала водоема при выполнении строгого критерия увеличения температуры водоема-охладителя в течение месяца.

### Описание методического подхода

Нестационарное дифференциальное уравнение теплового баланса с равновесной температурой  $T_p$  приведено в методике "Методические указания по технологическим расчетам водоемов-охладителей" [31]

$$\frac{c_w \rho_w H}{k_h} \frac{dT_s}{dt} + \alpha_\Sigma (T_s - T_p) - \frac{\Delta S}{\Omega} = 0, \quad (1)$$

где  $\alpha_\Sigma = 3,3w_2 + 4,0(\Delta S / \Omega)^{1/3}$  — суммарный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$w_2$  — скорость ветра на высоте 2 м над свободной поверхностью водоема-охладителя, м/с;

$\Delta S = c_w \rho_w Q \Delta T$  — разность теплосодержаний поступающей в водоем и забираемой из него воды в единицу времени, Дж/с;

$c_w$  — удельная теплоемкость воды, Дж/(кг · °С);

$\rho_w$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$k_h$  — коэффициент неравномерности распределения температуры воды по глубине, численно равный отношению средней температуры свободной поверхности к средней по объему воды температуре. Специалисты ОАО "ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева" рекомендуют следующие значения этого коэффициента [31]: для глубоких водоемов-охладителей с явно выраженной вертикальной температурной стратификацией 1,1; для частично перемешанных по глубине — 1,05 (см. [31], Приложение III, где это значение используют для водоема глубиной 5 м); для нестратифицированных — 1,0;

$H$  — средняя глубина водоема-охладителя, м;

$Q$  — циркуляционный расход, определяемый по изложенному в работах [1, 2] алгоритму, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta T$  — температурный перепад водоема-охладителя, принимаемый равным температурному перепаду на конденсаторах турбин, °С;

$T_s$  — средняя температура свободной поверхности водоема (среднеповерхностная), °С;

$t$  — время, с;

$\Omega$  — площадь свободной поверхности водоема-охладителя, м<sup>2</sup>.

Решение нестационарного уравнения (1) может быть записано в виде (см., например, [34, с. 294, п. 1.2])

$$T_s = T_p + \frac{1}{\alpha_\Sigma} \frac{c_w \rho_w Q \Delta T}{\Omega} - \left( T_p + \frac{1}{\alpha_\Sigma} \frac{c_w \rho_w Q \Delta T}{\Omega} - T_{ss} \right) \exp \left( - \frac{\alpha_\Sigma k_h}{c_w \rho_w H} t \right), \quad (2)$$

где  $T_{ss}$  — начальное значение средней температуры свободной поверхности, выбор которого обсуждается далее.

Максимальные средние температуры  $T_s$  свободной поверхности воды определяются первыми двумя слагаемыми уравнения (2), т. е.  $T_s = T_p + \frac{1}{\alpha_\Sigma} \frac{c_w \rho_w Q \Delta T}{\Omega}$ .

Именно это соотношение использовали авторы публикаций [1, 2] в своих оценках.

Чтобы оценить время  $t^*$ , необходимое для увеличения средней температуры  $T_s$  свободной поверхности воды в текущем месяце на 0,5 °С, воспользуемся обозначениями

$$B = \frac{\alpha_\Sigma k_h}{c_w \rho_w H} \text{ и } A = T_p + \frac{1}{\alpha_\Sigma} \frac{c_w \rho_w Q \Delta T}{\Omega}$$

и выполним несложные преобразования уравнения (2).

В результате получим

$$t^* = \frac{1}{B} \ln \left( \frac{T_{s00} - A}{T_{s0} - A + 0,5} \right), \quad (3)$$

где  $T_{s00}$  — начальная средняя температура свободной поверхности водоема, приписываемая предыдущему месяцу и принимаемая равной равновесной температуре предыдущего месяца, °C;

$T_{s0}$  — начальная средняя температура свободной поверхности водоема, приписываемая текущему месяцу и принимаемая равной равновесной температуре текущего месяца, °C.

Представляется очевидным, что выражение (3) может быть использовано не только в оценках теплового воздействия АСММ на небольшие водоемы, но и в приложении к более мощным реакторным установкам и значительным размерам водоемов-охладителей.

Отметим, что в работах [1, 2] подробно описан переход от количества тепла, уносимого подогретой водой в единицу времени, к его количеству, сбрасываемому с паром в конденсаторы турбин, определяемый через тепловую мощность реактора  $N_{th}$ , КПД и коэффициент  $k$ , задающий отношение тепловых сбросов в конденсаторы турбин ко всем тепловым потерям. В этих же работах приведены значения некоторых метеорологических параметров для якутского населенного пункта Саскылах (71,5° с. ш., 114° в. д.), где расположена ближайшая к Томторскому месторождению метеорологическая станция [31].

Таким образом, избегая повторного изложения информации, констатируем, что время  $t^*$ , необходимое для увеличения средней температуры  $T_s$  свободной поверхности воды в текущем месяце на 0,5 °C, определяется рядом метеорологических параметров региона размещения АСММ, тепловой мощностью потенциальных реакторных установок  $N_{th}$ , площадью поверхности  $\Omega$  и глубиной водоема-охладителя  $H$ .

В табл. 1 приведены значения и диапазоны варьирования параметров, используемые в расчетах искомого времени прогрева для самого теплого месяца (июль).

Таблица 1

Значения и диапазоны варьирования параметров оценки

Параметр	Значение
Температурный перепад на конденсаторах турбин $\Delta T$ , °C [35]	15
Коэффициент полезного действия РУ АСММ, %	20 и 35
Коэффициент, определяющий отношение тепловых сбросов в конденсаторы турбин ко всем тепловым потерям $k$ [36]	0,9
Метеорологические параметры текущего месяца (июль) [31, с. 40]	$T_p = 15,5$ °C, $w_2 = 3,6$ м/с
Метеорологические параметры предыдущего месяца (июнь) [31, с. 40]	$T_p = 12,0$ °C
Площадь свободной поверхности водоема-охладителя $\Omega$ , км <sup>2</sup>	0,025—1,000
Глубина водоема-охладителя $H$ , м (коэффициент $k_H$ )	2,5 (1,0); 5,0 (1,05); 7,5 (1,075); 10,0 (1,1)
Тепловая мощность РУ АСММ $N_{th}$ , МВт (тепл.)	0,5—10

## Анализ и обсуждение результатов

Для действительных значений  $t^*$  аргумент логарифмической функции выражения (3) должен быть положительным, что может быть обеспечено при условии, что числитель и знаменатель аргумента имеют одинаковые знаки. Оказалось, что такое условие может быть выполнено не во всем диапазоне значений параметров варьирования, приведенных в табл. 1. Выполненные оценки показали, что значения функции числителя всегда отрицательны, а значения функции знаменателя знакопеременны. Заметим, что на графиках все функции знаменателя расположены выше соответствующих функций числителя на постоянную величину  $T_{s0} + 0,5 - T_{s00}$ . На рис. 1 представлена зависимость знаменателя логарифмической функции выражения (3) от площади водоема при вариации значений тепловой мощности РУ АСММ (КПД 35 %).

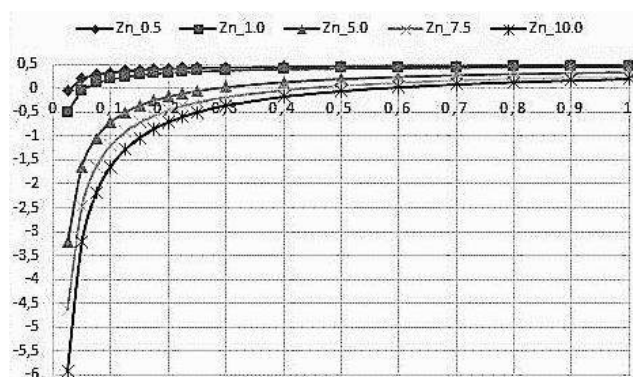


Рис. 1. Зависимость знаменателя логарифмической функции выражения (3) от площади водоема при вариации значений тепловой мощности РУ (КПД 35 %)

Приведенные кривые позволяют оценить площади водоема-охладителя, обеспечивающие безусловное выполнение условия недостижимости критического значения средней температуры свободной поверхности водоема выше на 0,5 °C равновесной температуры июля. Хорошо видно, что с увеличением тепловой мощности РУ АСММ происходит смещение вправо точки пересечения графиков с осью абсцисс. В результате область определения функции знаменателя увеличивается за счет как площади зеркала водоема, так и величины тепловой мощности РУ АСММ.

Результаты расчетов времени  $t^*$ , необходимого для увеличения средней температуры  $T_s$  свободной поверхности воды в июле на 0,5 °C в водоеме глубиной 5,0 м, представлены в табл. 2 для минимального и максимального значений КПД. В табл. 2 не приведены расчетные значения времени  $t^*$ , которые превышают 30 сут (использован символ Б), и, естественно, ситуаций, для которых отсутствуют действительные решения (символ Ф).

Анализ данных табл. 2 свидетельствует о том, что представленные результаты правильно отражают физику процесса.

Таблица 2

Расчетные значения времени  $t^*$ , необходимого для увеличения средней температуры  $T_s$  свободной поверхности воды в июле на  $0,5^\circ\text{C}$  в водоеме глубиной  $5,0$  м

Площадь водоема, $\text{км}^2$	Тепловая мощность РУ АСММ, МВт (КПД 35 %)					Тепловая мощность РУ АСММ, МВт (КПД 20 %)				
	0,5	1,0	5,0	7,5	10,0	0,5	1,0	5,0	7,5	10,0
0,025	Б	21,8	5,9	4,2	3,3	Б	18,3	5,0	3,5	2,7
0,050	Ф	Б	10,5	7,5	5,9	Ф	Б	8,9	6,4	5,0
0,075	Ф	Ф	14,4	10,5	8,3	Ф	Ф	12,2	8,9	7,0
0,100	Ф	Ф	18,1	13,1	10,5	Ф	Ф	15,4	11,1	8,9
0,125	Ф	Ф	21,8	15,7	12,5	Ф	Ф	18,3	13,3	10,6
0,150	Ф	Ф	25,5	18,1	14,4	Ф	Ф	21,3	15,4	12,2
0,175	Ф	Ф	29,4	20,5	16,3	Ф	Ф	24,3	17,4	13,8
0,200	Ф	Ф	Б	23,0	18,1	Ф	Ф	27,4	19,3	15,4
0,225	Ф	Ф	Б	25,5	19,9	Ф	Ф	Б	21,3	16,9
0,250	Ф	Ф	Б	28,1	21,8	Ф	Ф	Б	23,3	18,3
0,300	Ф	Ф	Ф	Б	25,5	Ф	Ф	Б	27,4	21,3
0,400	Ф	Ф	Ф	Б	Б	Ф	Ф	Ф	Б	27,4
0,500	Ф	Ф	Ф	Ф	Б	Ф	Ф	Ф	Б	Б
0,600	Ф	Ф	Ф	Ф	Ф	Ф	Ф	Ф	Ф	Ф

Примечания: Б — значение более 30 сут; Ф — отсутствует действительное решение, т. е. аргумент логарифмической функции отрицателен.

Действительно, при прочих равных условиях расчетное время  $t^*$  при меньшем КПД сокращается: больше тепла уходит в водоем, а увеличение площади водоема (и его объема) увеличивает время прогрева на  $0,5^\circ\text{C}$ . При этом данные табл. 2 не противоречат основному выводу работ [1, 2] относительно площади поверхности водоема, не превышающей  $1 \text{ км}^2$ , для мощностей РУ АСММ не более  $10 \text{ МВт}$  (тепл.).

Подтверждением отмеченных моментов являются графики расчетного значения времени  $t^*$ , необходимого для увеличения средней температуры  $T_s$  свободной поверхности воды в июле на  $0,5^\circ\text{C}$  в водоеме в зависимости от его площади поверхности при вариации глубины водоема для РУ АСММ мощностью  $10 \text{ МВт}$  (тепл.) (см. рис. 2, а и б).

Анализ графиков, представленных на рис. 2, а и б, свидетельствует о том, что физика процесса соблюдается:

- уменьшение КПД РУ АСММ при прочих равных условиях требует большие площади поверхности водоема для достижения той же величины прогрева;
- увеличение глубины водоема при той же площади поверхности приводит к росту значения искомого

расчетного времени  $t^*$ ; при этом линейность отклика нарушается ввиду наличия в выражении (3) коэффициента  $k_h$ , который зависит от глубины водоема.

Зависимость расчетного времени для РУ АСММ мощностью  $10 \text{ МВт}$  (тепл.) с высоким коэффициентом достоверности (выше  $0,995$ ) описывает степенная функция  $t_i^* = A_i S^{B_i}$  двух параметров: глубины и площади водоема. В приведенном выражении индекс "i" относится к величине КПД (35 либо 20 %). При этом коэффициент  $A_i$  является линейной функцией глубины водоема. Коэффициент  $B_i$  слабо зависит от параметра глубины (отклонения от среднего значения не превышают  $1,6\%$ ). В этом случае можно воспользоваться средней величиной. В результате для КПД 35 % зависимость имеет вид  $t_{35}^* = (-13,55H + 174,97)\Omega^{0,8504}$ , а для КПД 20 % — вид  $t_{20}^* = (-11,34H + 146,35)\Omega^{0,8485}$ . Справедливость приведенных соотношений проверена для водоемов глубиной до  $10 \text{ м}$  и площади зеркала поверхности до  $0,6 \text{ км}^2$ .

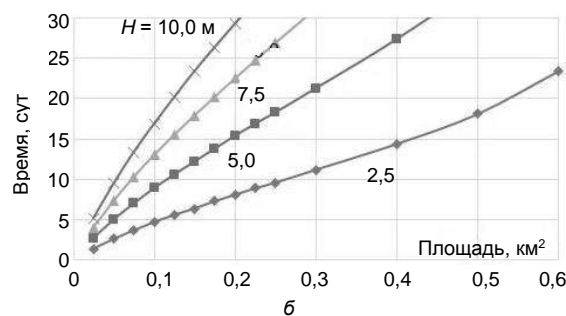
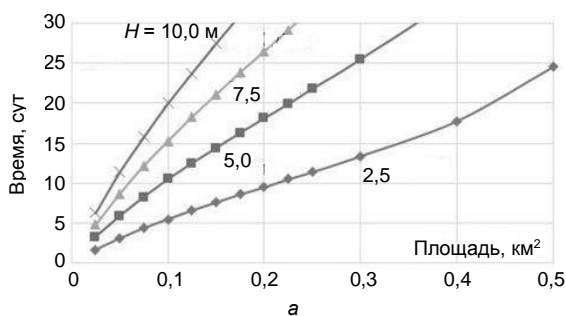


Рис. 2. Расчетные значения времени  $t^*$ , необходимого для увеличения средней температуры  $T_s$  свободной поверхности воды в июле на  $0,5^\circ\text{C}$  в водоеме, в зависимости от площади поверхности и глубины водоема для РУ АСММ мощностью  $10 \text{ МВт}$ : а — КПД 35 %; б — КПД 20 %

### Заключение

Таким образом, в работе представлено аналитическое решение нестационарного дифференциального уравнения теплового баланса с равновесной температурой для водоема-охладителя, позволяющее прогнозировать среднюю по свободной поверхности температуру  $T_s$  воды во времени.

Получено и проанализировано выражение для оценки времени, необходимого для увеличения средней температуры свободной поверхности воды в текущем месяце на 0,5 °С. Представленное выражение не ограничено проанализированными мощностями и параметрами водоемов-охладителей.

Выполнены прогнозные расчеты времени увеличения температуры водоема-охладителя на 0,5 °С в летний период при тепловых сбросах с реакторных установок мощностью от 0,5 до 10 МВт (тепл.) АСММ для климатических условий северо-востока России при вариации площади поверхности и глубины водоема. Проанализированы темпы прогрева при фиксированных площади поверхности зеркала и глубине водоема, при которых нагрев воды в наиболее жаркий летний месяц не превысит 0,5 °С, что обеспечит отсутствие негативного воздействия на экологию водоема. Для РУ АСММ мощностью 10 МВт (тепл.) результаты анализа доведены до аналитических зависимостей, применение которых позволяет оценить продолжительность нагрева воды в широком диапазоне параметров водоема-охладителя.

Полученные оценки не противоречат ранее высказанному предложению специалистов Горного института КНЦ РАН о допустимости исключения из Водного кодекса запрета и разрешения для АСММ мощностью до 10 МВт (тепл.) использования прямой схемы охлаждения конденсаторов турбин.

Автор благодарит бывшего ведущего технолога Горного института КНЦ РАН С. Г. Климина, который внес заметный вклад в постановку задачи и обобщение результатов совместных исследований в период 2015—2017 гг. по оценке температурного режима водоема-охладителя при тепловых сбросах АСММ в условиях Арктики.

*Автор посвящает эту статью светлой памяти академика Н. Н. Мельникова, безвременно ушедшего из жизни в июне 2018 г., который на протяжении более 30 лет руководил Горным институтом КНЦ РАН и привлек автора к исследованиям по проблеме освоения и рационального использования подземного пространства, в том числе радиогеоэкологических аспектов радиационно-опасных объектов.*

### ЛИТЕРАТУРА

- Мельников Н. Н., Амосов П. В., Климин С. Г. Оценка теплового воздействия атомной станции малой мощности на водоем-охладитель в Арктическом регионе // Экология промышленного производства. 2017. № 1 (97). С. 48—53.
- Мельников Н. Н., Амосов П. В., Климин С. Г., Новожилов Н. В. Экологические аспекты безопасности подземной атомной станции малой мощности в условиях Арктики. — Ярославль: ООО "Принтхаус-Ярославль", 2018. — 170 с.
- Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу. Утв. Президентом РФ 18.09.2008. № Пр-1969 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rg.ru/2009/03/30/arktika-osnovy-dok.html>
- Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 г. Утв. Президентом РФ 8.02.2013. № Пр-232 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://government.ru/news/432/>
- Восточный вектор энергетической стратегии России: современное состояние, взгляд в будущее / под ред. Воропая Н. И., Санин Б. Г. — Новосибирск: Академическое изд-во "Гео", 2010. — 368 с.
- Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / под ред. Саркисова А. А. — М.: Наука, 2011. — 375 с.
- Санев Б. Г., Иванова И. Ю., Тугузова Т. Ф., Франк М. И. Приоритеты использования атомных станций малой мощности на Востоке России // Атомная энергия. 2011. Т. 111. Вып. 5. С. 276—281.
- Саркисов А. А. Новое направление развития — ядерная энергетика малой мощности // Атомная энергия. 2011. Т. 111. Вып. 5. С. 243—245.
- Алексеев П. Н., Субботин С. А., Стукалов В. А., Щепетина Т. Д. Система атомных станций малой мощности как стратегическое направление достижения состояния защищенности жизненно важных интересов общества // Атомная энергия. 2011. Т. 111. Вып. 5. С. 250—255.
- Сидоренко В. А. Задачи, проблемы и возможности создания атомной энергетики малых мощностей / Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / под ред. Саркисова А. А. — М.: Наука, 2011. С. 79—87.
- Кривичкий И. С. В роли Золушки пребывает пока в нашей стране малая энергетика // Атомная стратегия XXI. 2005. № 2 (16). С. 5—6. [http://www.proatom.ru/files/as16\\_01\\_08.pdf](http://www.proatom.ru/files/as16_01_08.pdf)
- Получено положительное заключение Главгосэкспертизы по проекту СВБР-100 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nuclear.ru/rus/press/nuclearenergy/2132705/>
- Мельников Н. Н., Амосов П. В., Новожилов Н. В., Климин С. Г. Экология подземных объектов ядерной энергетики в условиях криолитозоны. — Ярославль: ООО "Принтхаус-Ярославль", 2015. — 119 с.
- Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики. Т. 2 / под ред. Саркисова А. А. — М.: Академ-Принт, 2015. — 387 с.
- Мелькин В. С., Ужанова В. В. Разработка модульных реакторов малой мощности — вопросы безопасности, перспективы и препятствия на пути их развертывания // Атомная техника за рубежом. 2016. № 2. С. 16—23.
- Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment. OECD-NEA [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7213-smrs.pdf>
- Лукин А. П. Проект "Павловское". Создание на архипелаге Новая Земля горнодобывающего производственного комплекса по добыче и переработке свинцово-цинковых руд [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.innovrosatom.ru/files/articles/aad130851e21bd886f2756c9184c7308.pdf>
- Самойлов А. Г. Как нам обустроить Арктику [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.priroda.ru/reviews/detail.php?ID=10984>
- Атомная энергетика: большие надежды на малые реакторы: энергетический бюллетень № 40. — М.: Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации, 2016. — 26 с.
- Лукашевич И. Б., Молоканов Н. А., Назаров В. С., Никель К. А., Прокопович А. А., Романова Н. В., Третьяков И. Т. Проекты энергоблоков для АСММ на базе корпусного кипящего реактора типа КАРАТ: мат. 10-й Межд. науч.-техн. конф. "Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2016/MNTK-2016.pdf>
- Жарков О. Б. Атомные станции малой мощности. Принципы и подходы к сооружению наземных АСММ [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://atomsro.ru/wp-content/uploads/file/OPORTAL/AtomStroyStandart\\_2016/Jarkov\\_2016\\_AS.pdf](http://atomsro.ru/wp-content/uploads/file/OPORTAL/AtomStroyStandart_2016/Jarkov_2016_AS.pdf)
- Инновационные проекты атомных станций малой мощности для освоения месторождений и энергообеспечения других объектов арктических территорий России [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.ndexpo.ru/mediafiles/u/files/materials\\_2016/47Pimenov.pdf](http://www.ndexpo.ru/mediafiles/u/files/materials_2016/47Pimenov.pdf)
- Гольцов Е. Н., Гречко Г. И., Куликов Д. Г., Трапезников И. Н. Автономная саморегулируемая реакторная установка "Униатерм" с повышенным уровнем безопасности: сб. докл. IV Межд. науч.-техн. конф. "Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.>



nikiet.ru/images/stories/NIKIET/Publications/Conf/mntk\_nikiet\_2016/ru-doklady\_vol\_1.pdf

24. **Егоров С. В.** Потенциал создания энергоисточников на базе АСММ для применения в условиях Арктической зоны [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.ndexpo.ru/mediafiles/u/files/materials\\_2016/4/5Egorov.pdf](http://www.ndexpo.ru/mediafiles/u/files/materials_2016/4/5Egorov.pdf)

25. Возможности применения АЭС малой мощности для энергоснабжения гражданских потребителей [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://nts-ees.ru/sites/default/files/nts\\_ees\\_17\\_noyab.pdf](http://nts-ees.ru/sites/default/files/nts_ees_17_noyab.pdf)

26. **Будылов Е. Г., Тревгода М. М., Глебов А. П.** Конкурентоспособность ядерных энергоисточников особо малой мощности в условиях территорий Крайнего Севера России: сб. докл. 10-й Межд. науч.-техн. конф. "Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2016/MNTK-2016.pdf>

27. Атомная станция малой мощности АСММ "Униатерм" для электро- и теплоснабжения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://atomicexpert-old.com/sites/default/files/library-pdf/Униатерм%20%28НИКИЭТ%29.pdf>

28. **Адамов Е. О.** Состояние разработок АСММ в мире и России, приоритеты и перспективы их создания [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://innov-rosatom.ru/events/grouparctic/5e334977fec5bf72d7dedcb904a914c0.pdf>

29. Обликовый проект АСММ с РУ РИТМ-200: сб. докл. V Межд. науч.-техн. конф. "Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики" [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://istc-2018.nikiet.ru:8080/apex/www\\_flow\\_file\\_mgr.get\\_file?p\\_security\\_group\\_](http://istc-2018.nikiet.ru:8080/apex/www_flow_file_mgr.get_file?p_security_group_)

id=2087214192187084&p\_flow\_id=301&p\_fname=rus\_eng\_istc-2018\_papers.pdf

30. **Пименов А. О., Святецкий В. С., Лукин А. П., Кашка М. М.** Различные аспекты применения автономных атомных источников энергообеспечения (безопасность, энергоэффективность, труднодоступные территории) [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/2017/materials/04\\_Pimenov\\_NIKIET.pdf](http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/2017/materials/04_Pimenov_NIKIET.pdf)

31. Методические указания по технологическим расчетам водоемов-охладителей. РД 153-34.2-21.144-2003. — СПб.: ОАО "ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева", 2004. — 57 с.

32. Охрана водных объектов при проектировании, строительстве, реконструкции, вводе в эксплуатацию, эксплуатации водохозяйственной системы Водный кодекс РФ. Статья 60 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.zakonrf.info/vodniy-kodeks/60/>

33. **Антонова Л. Н., Канюк Г. И., Погонина Т. Е., Михайский Д. М., Омельченко Л. Н., Фокина А. Н.** Назначение и особенности условий работы водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. № 2/10 (56). С. 56—63.

34. **Камке Э.** Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. — М.: Наука, 1976. — 576 с.

35. Теплообменники энергетических установок [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://openedu.ufu.ru/files/book/index.html>

36. **Маргулова Т. Х.** Атомные электрические станции. — М.: Высшая школа, 1994. — 201 с.

## Forecast estimates of the time of heating of the cooling reservoir during thermal discharges from a small nuclear power plant in the Arctic region

P. V. AMOSOV

Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia

*The article presents forecast estimates of the increase time of the temperature of the reservoir-cooler in the summer for the thermal discharges from the reactors of the small nuclear power plant from 0.5 to 10 MW (th.) for the climatic conditions of the North-East of Russia in variation of surface area and depth of the reservoir. The calculations are based on the derived analytical expression. The rates of warming up for varying values of the mirror surface area and depth of the reservoir are analyzed, at which the water heating in the hottest summer month will not exceed 0.5 °C, which will ensure that there is no negative impact on the ecology of the reservoir. Analytical dependences were obtained for the reactor installations with a capacity of 10 MW (th.). Dependences allow us to estimate the duration of heating of the cooling reservoir with variations in the depth and surface area of reservoirs in a wide range of values.*

**Keywords:** a small nuclear power station, thermal discharges, a mirror surface, depth of a cooling reservoir.

**Bibliography** — 36 references.

*Received July 6, 2020*

Экология промышленного производства: Межотр. науч.-практ. журнал / ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2020. Вып. 3. С. 1—56.

Редактор *О. А. Константинова*

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

Подписано в печать 17.08.2020.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 6,5. Уч.-изд. л. 6,7.

Тираж 250 экз. Заказ 1956.

Свободная цена.

Адрес редакции: 125424, Москва,

Волоколамское ш., 77. ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».

<http://ntckompas.ru>

Отпечатано в ООО "РАПИТОГРАФ".

117342, Москва, ул. Бутлерова, д. 17Б.

Индекс 80090.