

ЭКОЛОГИЯ

промышленного
производства



МЕЖОТРАСЛЕВОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

Выпуск 1
Москва 2023





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

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



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



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



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



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



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

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

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

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

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

ЭКОЛОГИЯ

промышленного

производства

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

Выпуск 1 (121)

Издается с 1993 г.

Москва 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ, УТИЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕРАБОТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ И БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е. С. Пористый наполнитель на основе аспирационной пыли от феррохрома и жидкостекольной композиции 2

Артемов А. С. Возможность использования подземного пространства шахт и рудников для захоронения радиоактивных отходов 7

Борисова О. Н., Жаров В. Г., Тыгерь Л. М. Аналитический обзор оборудования для дробления и переработки техногенного сырья (Обзор) 11

Пикалов Е. С. Влияние древесной золы и полимерных отходов на свойства теплоизоляционного композиционного материала 19

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДООЧИСТКА

Ерхов А. А., Королёва Е. А. Техническое обслуживание и ремонт трубопроводов водоснабжения и водоотведения с использованием современной техники и на основе прогнозных показателей 24

Масленников А. А., Демидова С. А., Ходыкина Н. В., Почепцов А. Я., Гришина М. А., Алексеева И. С., Новикова О. Н. Оценка степени опасности содержимого бывшего накопителя сточных вод ВОО «Химпром» "Белое море" 35

ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И ЛИКВИДАЦИИ ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

Джаналиева Н. Ш., Серикбаева А. К., Сулейменова Б. С., Нурбаева Ф. К., Алтыбаева Ж. К. Комплексная оценка загрязнения тяжелыми металлами прибрежной зоны Каспийского моря в районе пригорода Актау 40

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Розенталь О. М., Федотов В. Х. Разведочный анализ состава и свойств речной воды с использованием нейросетевой методики 46

Тетельмин В. В. Энергетические особенности и пределы глобального потепления 51

Главный редактор

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

Заместители главного редактора:

В. Ф. Гракович, д-р техн. наук, проф., Национальный фонд содействия устойчивому развитию регионов;
А. Г. Ишков, д-р хим. наук, проф., ПАО «Газпром»;

Н. П. Кузнецов, д-р техн. наук, проф., ИжГТУ им. М. Т. Калашникова

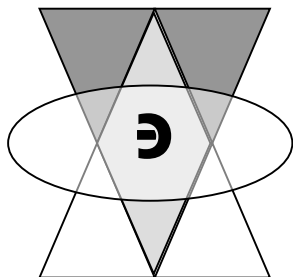
Ответственный секретарь К. В. Трыкина, начальник отдела научных и информационных изданий ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:

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



Обезвреживание, утилизация и переработка промышленных и бытовых отходов

УДК 666.774.017:543.429.3
DOI: 10.52190/2073-2589_2023_1_2
EDN: MFIEZC

Пористый наполнитель на основе аспирационной пыли от феррохрома и жидкостекольной композиции

В.З. АБДРАХИМОВ, д-р техн. наук

ФГАОУ ВО «Самарский государственный экономический университет»,
г. Самара, Россия

Е.С. АБДРАХИМОВА, канд. техн. наук

ФГАОУ ВО «Самарский университет»

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

Исследована аспирационная пыль от феррохрома, которая состоит из конгломератов различных форм, большинство которых размером в диапазоне от 0,2 до 22 мкм. В исследуемой аспирационной пыли повышенное содержание оксидов хрома (Cr_2O_3) — 21,32 % и магния (MgO) — 31,42 %, которые способствуют повышению физико-механических показателей пористого наполнителя. Показаны возможность получения теплоизоляционных пористых материалов на основе жидкостекольных композиций, используемых в качестве связующего, и возможность использования крупнотоннажной аспирационной пыли от феррохрома, используемая в качестве наполнителя. Получен пористый наполнитель с высокими физико-механическими показателями. На представленный в данной работе способ получения пористого наполнителя получен патент РФ № 2470885.

Ключевые слова: пористый наполнитель, жидкое стекло, аспирационная пыль, хлорид натрия, показатели.

Переработка коммунальных отходов и рециклинг промышленного техногенного сырья являются главной задачей по оздоровлению окружающей среды, минимизации загрязнения экологических систем и мутации методами преобразования любых отходов и техногенного сырья по чистым экологически безотходным технологиям в производстве строительных материалов массового производства [1]. При этом необходимо жестко соблюдать закон: техногенный

мир, сформированный человеком, должен сурово, но гармонично развиваться адекватно развитию Мира, который сотворила природа. Неисполнение установленного закона ввергнет любую страну в жесточайший экологический кризис.

Проблема рационального ресурсопользования в XXI в. не решена, неэффективная эксплуатация которых обречена на масштабное загрязнение не только воздушного пространства, но и водного бассейна. Загрязнённый воздух является источником ранних смертей от заболеваний сердца и органов дыхания сотен тысяч людей. Статистика показывает, что у каждого человека загрязнённый отравленный воздух отнимает до трех лет жизни [2]. Наиболее опасным и стоит на первом месте по загрязнению воздуха и водного бассейна является топливно-энергетический комплекс [3].

Абдрахимов Владимир Закирович, профессор.

E-mail: 3375892@mail.ru

Абдрахимова Елена Сергеевна, доцент.

E-mail: 3375892@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12 января 2023 г.

© Абдрахимов В. З., Абдрахимова Е.С., 2023

Металлургическая промышленность, согласно данным Росстата, после топливно-энергетического комплекса занимает второе место по загрязнению окружающей среды. В самой металлургической промышленности лидирует цветная металлургия, за ней следует чёрная. Но при этом следует обратить внимание, что не менее 90 % формирующихся в мире различных техногенных образований (отходов производств) — это техногенное сырьё черной металлургии, причем около 40 % образований, составляют дисперсные низкосортные загрязненные маслами, ржавчиной и т. д. отходы: обрезки, тонколистовой мелкий скраб, стружка и т. п.

Одной из самых экологических актуальных проблем в XXI в. является эффективная переработка крупнотоннажных отходов и использование техногенного сырья в массовом производстве керамических материалов строительного направления, обладающая неограниченными возможностями по рециклингу отходов [4, 5].

При отсутствии государственного финансирования на геологоразведочные изыскания сырьевых материалов для получения массовых керамических изделий актуальными становятся вопросы по замене природного традиционного сырья на крупнотоннажные отходы, которые сделают социально-экономический эффект максимальным. При этом на геологоразведочные работы, строительство и эксплуатацию карьеров исключаются затраты, значительные земельные участки освобождаются от воздействия негативных антропогенных факторов.

Постановка задачи. С учетом минимизации для производства керамических материалов строительного направления силикатного алюмосодержащего традиционного сырья необходимо изыскать и исследовать возможность по замене его на техногенное сырьё. Передовые зарубежные государства такой опыт показали и использовали его как инструментальный по предохранению природной среды от различных негативных последствий.

Цель работы — исследование влияния аспирационной пыли от феррохрома на физико-механические показатели и фазовый состав пористого заполнителя на основе жидкостекольных композиций без применения природных традиционных материалов.

Техногенное сырьё черной металлургии

Российская Федерация обладает масштабными резервами цветных и черных металлов. Благодаря таким обширным резервам в структуре экономики России металлургия находится на третьем месте. Во многих городах находятся металлургические предприятия. Такие предприятия пополняют местный бюджет, но вместе с этими суммами заметно меняют экологическую ситуацию, как правило, в худшую сторону. Даже от небольшого металлургического завода радиус распространения вредных отходов составляет 30 км. Влияние такие негативные компоненты оказывают не только на город, но и на территории к нему прилегающие.

Все металлургические предприятия относятся к сложным производственным комплексам, слагаю-

щимся из различных подразделений, но чаще всего из небольших заводов. Все технологические процессы на металлургических заводах сочетаются с крупными выделениями пыли, газов, сточных вод, шлаков, окалины, мусора и других выбросов.

Техногенное сырьё от продукция черной металлургии относится к очень вредным загрязнителям мирового масштаба. Миллиарды тонн отходов предприятий черной металлургии в отвалах причиняют экологическим системам осязаемый ущерб. Необходимо отметить, что не только на экологические системы оказывают влияние техногенные отходы негативные воздействия, но и на сброс отработанных вод в водный бассейн.

Преимущественно в черной металлургии остро отмечена проблема по неиспользованию шламов и пыли, и поэтому в настоящее время практически полностью идущей в шламонакопители и отвалы [1—3]. В связи с чем по масштабам вредоносного давления на экологию окружающей среды черная металлургия занимает одно из ведущих мест.

Металлургические предприятия повышенную роль отводят целесообразному применению сырьевых ресурсов, которые относятся к внутренним источникам и рециклингу техногенного сырья [1]. В области использования техногенного сырья определяющим вектором с имеющимися отходами ферросплавного изготовления стала их максимальная мобилизация в производственные процессы, что, в свою очередь, содействует сохранению энергетических и материальных средств и уменьшению себестоимости продукции.

Образующиеся в системах очистки в виде аспирационной и технологической пыли дисперсные отходы черной металлургии относятся к группе не утилизируемых, которые по фракционному составу представляют собой остатки минерального сырья и продуктов его переработки. Если переработка невозможна, то пыль аспирационной установки требует повышенной экологически безопасной утилизации. В литературе нет достаточных сведений о необходимой методике для оценки интенсивности в количественном выражении по образованию аспирационной пыли в зависимости от технологических показателей [6, 7].

Формирование в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) аспирационной пыли может достигнуть на 1 т стали до 30 кг. Ежегодно вентиляционным пылегазоочистительным оборудованием удаляется в пределах 650 тыс. т мелкофракционной пыли в электросталеплавильном цехе с учетом коэффициента по очистке газообразных продуктов — 99 % [7, 8]. Требование по использованию обязательной разработки специальной технологии для сокращения пылеобразования и утилизации оставшейся пыли продиктовано неблагоприятной ролью пыли не только на окружающую среду, но и на здоровье человека. Указания по показателям интенсивности образования пыли даст возможность не только контролировать, но и проконтролировать пылевынос из ДСП [7, 8].

Необходимо отметить, что хром, используемый в качестве легирующих элементов для черной металлургии, стал одним из важнейших компонентов добавки для сталей [8, 9]. Использование элемента

хрома в качестве добавки как для сталей обычных, так и для сталей легированных значительно повышает их физические показатели, коррозионные и жаростойкие свойства, износостойкость и т. д.

В мировом масштабе доля сплавов хрома при получении ферросплавов составляет 27,5 % и уступает только доле сплава марганца — 38...39 %, на третьем месте доля сплавов кремния — 25...25,5 %, а все остальное — это доля оставшихся ферросплавов — 9 %. После 2000 г. отмечается некоторый рост темпов получения хромовых ферросплавов с предпочтением углеродистого феррохрома. При измельчении феррохрома получается значительный объем мелких частичек, которые имеют название — аспирационная пыль от феррохрома. К такой пыли относятся частички в большинстве случаев размером 0,01—1 мм, причем содержание оксида хрома (Cr_2O_3) более 20 %, а оксида магния (MgO) — более 30 %.

Учитывая, что аспирационная пыль от феррохрома является мелкодисперсным сырьем, она становится практически некондиционным материалом [8, 9]. Использование аспирационной пыли в производстве ферросплавов, как показывает практика убыточно, так как после загрузки этой пыли для дальнейшего переплава она разлетается на 60—70 %.

Отвалы аспирационной пыли, которые можно отнести к крупнотоннажным, насчитывают более 25000 т/год, что может заинтересовать производителей строительных материалов. Следует отметить, что улавливается только аспирационными установками пыли 5500 т/год, причем содержание в этой пыли Cr_2O_3 более 20 %, что значительно может повысить прочностные характеристики изделий.

Методика исследования

Для исследования керамических образцов автокламы были использованы современные методы химического анализа. Поэлементный анализ сырьевых материалов проводили с применением растрового электронного микроскопа JSM 6390A (фирмы "Jeol", Япония).

Исследования проводили в соответствии с методикой СамГТУ "Методика определения химического состава твердых тел. Методика выполнения измерений с помощью рентгеновского энергодисперсионного спектрометра в составе растрового электронного микроскопа".

Экспериментальная часть

Сырьевые материалы. Для получения пористого заполнителя использовали без применения традиционных природных материалов следующие компоненты: в качестве связующего — натриевое жидкое стекло, а в качестве отощителя — аспирационная пыль от феррохрома.

Аспирационная пыль от феррохрома — это один из образующихся видов техногенных отходов производства высокоуглеродистого феррохрома. Исследуемая пыль (ферропыль) представляет собой смесь мелких частиц руды, кокса и других материа-

лов, загружаемых в печь. Аспирационная пыль от феррохрома образуется также в результате механического измельчения при подготовке материалов, загрузке истирании шихты и в ходе технологического процесса производства ферросплавов. При выплавке феррохрома в открытой печи вынос пыли в объеме отходящих газов составляет 50—60 г/м³, в отдельных случаях достигает 100 г/м³. [8—10]. При выплавке данного сплава в закрытой печи из-за повышенного давления под сводом запыленность отходящего газа меньше и составляет 15—20 г/м³. Удельный выход пыли на 1 т феррохрома для закрытой печи составляет 50—150 и 25—75 кг/т для открытой печи [8—10]. Все отходы делятся на 5 классов опасности, 1 класс — самый вредный, аспирационная пыль феррохрома относится к пятому классу. Химические составы оксидный и поэлементный представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Усредненный химический оксидный состав аспирационной пыли от ферропыли

Содержание оксидов, масс. %							
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Cr_2O_3	$^*\text{R}_2\text{O}$	$\Delta m_{\text{пир}}$
25,82	6,54	5,23	—	31,42	21,32	—	9,67
$^*\text{R}_2\text{O} = \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$							

Таблица 2

Поэлементный химический состав аспирационной пыли от ферропыли

Содержание элементов, масс. %									
C	O	Na	Mg	Al	Si	Cr	K	Ca	Fe
6,23	40,24	—	23,51	2,87	12,3	12,3	—	—	2,55

Значение удельной поверхности аспирационной пыли феррохрома, определенное методом Брюнера-Эммета-Теллера (BET), составило 3,0 м²/г, а насыпная плотность — 1,2...1,3 г/см³ [8—10]. Микроскопический анализ с помощью электронного микроскопа марки JSM 6390A (фирмы "Jeol", Япония) показал, что аспирационная пыль состоит из конгломератов различных форм, большинство размеров которых лежат в диапазоне от 0,2 до 22 мкм (рис. 1), а фракционный состав пыли представлен в табл. 3.

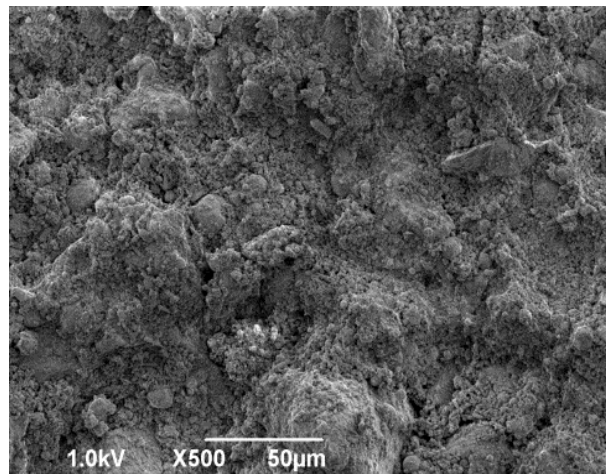


Рис. 1. Микроструктура аспирационной пыли от ферропыли. Увеличение: x500

Таблица 3

Фракционный состав аспирационной пыли от ферропеллы

Содержание фракций в %, размер частиц в мм				
>0,063	0,063—0,01	0,01—0,005	0,005—0,001	<0,001
3,0	4,8	11,3	28,2	52,7

Согласно данным табл. 1, содержание оксида хрома (Cr_2O_3) в аспирационной пыли — 21,32 %, а оксида магния (MgO) — 31,42 %, которые будут способствовать повышению физико-механических показателей пористого заполнителя.

В работе [10] было показано, что по данным рентгенофазового анализа хром в аспирационной пыли находится в виде сложного соединения типа $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{CrAl}_2\text{O}_4$, что затрудняет извлечь из этого соединения хром.

Аспирационную пыль от феррохрома использовали в качестве отощителя. Отощители — материалы, обладающие небольшой усадкой. Их используют для снижения излишней пластичности, из-за которой могут образоваться трещины при сушке и обжиге изделий. Отощители облегчают и ускоряют эти процессы, уменьшают виды брака и бой изделия. Они принимают участие в физико-химических процессах при обжиге изделия, взаимодействуют с другими компонентами, участвуют в образовании прочной структуры, являются как бы каркасом, вокруг которого образуется пленка расплава, вследствие чего изделие не деформируется в процессе обжига.

Жидкое стекло, обладающее связующими и клеящими способностями, выражается в технической литературе формулой $\text{R}_2\text{O}n\text{SiO}_2 + m\text{H}_2\text{O}$, где щелочной катион обозначается — R (Na^+ , K^+ , Li^+ или NH_4^+); n — силикатный модуль жидкого стекла (отношение кремнеземистого компонента к щелочному); m — количество молекул воды [11]. Натриевое жидкое стекло находит широкое применение в промышленности, является крупнотоннажным материалом неорганического синтеза и практически изготавливается во многих передовых странах мира.

В последние годы к натриевому жидкому стеклу плотностью 1,41 г/см³ (по ГОСТ 13075-81) возрос интерес, по-видимому, за счет содержания в нем широкого спектра компонентов экологически чистых совершенно без вредных свойств не только при производстве, но и отсутствием токсичности, негорючестью, доступностью и дешевизной его получения.

Использование жидкого стекла в чистом виде затрудняет сам процесс перемешивания, полученная консистенция склонна к высокой адсорбционной способности, поэтому в неё добавляют добавку-коагулятор — хлорид натрия (ГОСТ 13830-97, производства ОАО "Бассоль") в количестве от 2 до 5 %.

Получение пористого заполнителя. Компоненты — аспирационная пыль от феррохрома и хлорид натрия измельчали до прохождения сквозь сито 1 мм, затем в определенных пропорциях, представленных в табл. 4, полученная масса тщательно перемешивалась в мешалке, в которую заливали жидкое стекло. Перемешивание производили в течение от 5 до 15 минут до получения однородной массы.

Таблица 4

Составы композиции для производства пористого заполнителя

Компоненты	Содержание компонентов, масс. %		
	1	2	3
Натриевое жидкое стекло плотностью 1,41 г/см ³	75	60	50
Хлорид натрия	4	3	2
Аспирационная пыль от феррохрома	21	37	48

Полученную консистенцию разрезали на отдельные гранулы системой ножей. Полученные гранулы проходили термообработку в печном грануляторе в интервале температур 250—300 °С, вспучивались до образования эллипсообразных высокопористых гранул. Затем эллипсообразные гранулы помещали в электрическую печь, разогретую до температуры 1000 °С, и выдерживали (изотермическая выдержка) в печи 10 минут. Полученные гранулы после изотермической выдержки охлаждали при скорости охлаждения 40 °С/мин, на представленную в данной работе технологию получен патент РФ [12]. Физико-механические показатели пористого заполнителя представлены в табл. 5. Полученный образец представлен на рис. 2.

Таблица 5

Физико-механические показатели

Показатель	Состав		
	1	2	3
Прочность на сжатие, МПа	2,24	2,28	2,31
Насыпная плотность, кг/м ³	420	440	490
Потери при 5-минутном кипячении, %	0,18	0,21	0,22
Коэффициент размягчения, %	95,7	95,8	96,2
Марка по насыпной плотности	400	400	450
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,212	0,219	0,23

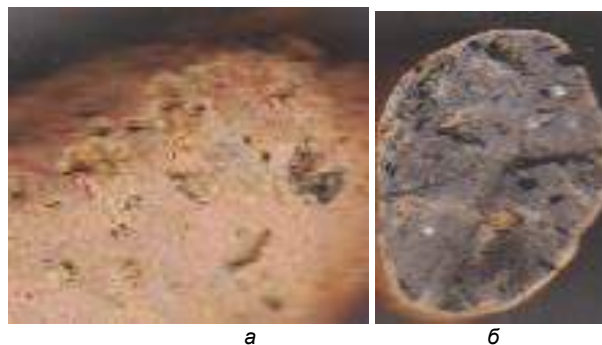


Рис. 2. Фото пористого заполнителя (состав 2), вид: а — внешний; б — внутренний

Данные табл. 5 показывают, что пористые заполнители из предложенных составов имеют высокие показатели на прочность при сжатии и коэффициент размягчения, при этом марка по насыпной плотности не превышает 450, а теплопроводность менее — 0,25 Вт/(м·°С). Оптимальным составом можно считать состав № 2, у которого насыпная плотность не превышает 440 кг/м³ (марка 400), и при этом прочность по отношению к составу № 1 увеличилась (табл. 5).

Рис. 2, а показывает, что пористость на внешнем виде, в отличие от внутреннего вида, мало видно, т. е., это означает, что золошлаковый материал способен к получению в пористом заполнителе замкнутых пор.

Выводы

Необходимо отметить, что отвалы с техногенным сырьем, как правило, находятся в непосредственной близости от проживания людей, поэтому таким отвалам практически некуда расширяться. Для проживания жителей такие отвалы — очевидное зло. Кроме экологического вреда, отвалы с техногенным сырьем в черте проживания людей занимают полезные площади, которые можно было бы использовать под озеленение и создание парков и под строительство различных объектов.

На основе жидкостекольной композиции и аспирационной пыли от феррохрома с высокими физико-механическими показателями получен пористый заполнитель.

Использование аспирационной пыли от феррохрома-материала на основе жидкостекольной композиции в производстве пористого заполнителя без применения природного традиционного материала способствует снижению антропогенной составляющей при формировании окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хорошавин Л. Б., Беляков В. А., Свалов Е. А. Основные технологии переработки промышленных и твердых и коммунальных отходов. — Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2016. — 220 с.
2. Коробкова Ю. Ю., Сафронов Е. Г., Краскова Н. И., Абдрахимов В. З. Экологический менеджмент и рециклинг железосо-

державшего шлака ТЭЦ в производстве безобжиговых жаростойких композитов // Уголь. 2020. № 12. С. 49—52.

3. Стеценко С. А., Абдрахимов В. З. Использование отходов топливно-энергетического комплекса и фосфорного производства в производстве керамического кирпича. // Экология промышленного производства. 2020. № 3. С. 23—28.

4. Ровин С. Л., Ровин Л. Е., Заяц Т. В. Металлургические достоинства ротационных наклоняющихся печей // Литье и металлургия. 2010. № 4. С. 40—44.

5. Safronov E. G., Silinskaya S. M., Naryzhnaya N. Y., Abdrahimov V. Z. Ecological feasibility of ash slag recycling in the production of wall materials and optimization of ceramic masses according to technical indicators Authors // Ugol. 2021. № 6. P. 44—49.

6. Abdrahimov V. Z., Abdrahimova 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. Абдрахимова Е. С. Использование отходов углеобогащения и межсланцевой глины в производстве кирпича // Уголь. 2021. № 7. С. 52—55.

8. Исакова А. С., Исаков К. М., Шумейко И. А. Высокоуглеродистый феррохром с использованием хромового сырья // Наука и техника Казахстана. 2018. № 4. С. 84—93.

9. Жунусова А. К., Мамонов А. Р., Жунусов А. К. Переработка аспирационной пыли феррохрома // Наука и техника Казахстана. 2016. № 3—4. С. 66—70.

10. Прошкин А. В., Тинькова С. М., Набиулин А. Б. Исследование свойств аспирационной пыли // Успехи современного естествознания. 2011. № 5. С. 102—103. [Электронный ресурс]. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=21479> (дата обращения: 09.01.2023).

11. Ильина Ж. П., Абдрахимов В. З. Использование топливно-энергетической промышленности — золошлакового материала в производстве пористого заполнителя на основе жидкостекольной композиции // Экология промышленного производства 2018. № 4. С. 16—22.

12. Абдрахимов В. З. Способ получения огнеупорного пористого заполнителя. Патент РФ № 2470885. С1 C04B 14/24, 20/06. Заявл. 13.05.2011. Оpubл. 27.12.2012. Бюл. № 36.

Porous filler based on aspiration dust from ferrochrome and liquid glass composition

V. Z. ABDRAKHIMOV

Samara State University of Economics, Samara, Russia

E. S. ABDRAKHIMOVA

Samara University (Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev), Samara, Russia

The object of the study is aspiration dust from ferrochrome, which consists of conglomerates of various shapes, most of the sizes of which range from 0.2 to 22 microns. The studied aspiration dust has an increased content of chromium oxides (Cr_2O_3) — 21.32 %, and magnesium (MgO) — 31.42 %, which will contribute to an increase in the physico-mechanical properties of the porous filler. The presented work shows the achievements of research on the possibility of obtaining heat-insulating porous materials based on a liquid-glass composition used as a binder, and large-tonnage aspiration dust from ferrochrome used as a filler. A porous aggregate with high physical and mechanical properties was obtained. RF Patent № 2470885 was obtained for the method of obtaining a porous filler presented in this article.

Keywords: porous filler, liquid glass, aspiration dust, sodium chloride, indicators.

Bibliography — 11 references.

Received January 12, 2023

УДК 621.039.743

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_1_7

EDN: MPDDSP

Возможность использования подземного пространства шахт и рудников для захоронения радиоактивных отходов

А. С. АРТЕМЬЕВ

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина»,
г. Снежинск, Челябинская обл., Россия

Решение проблемы увеличения объемов токсичных отходов и трудности, связанные с их обращением. Переработка и временное складирование таких отходов не являются решением проблемы. Поэтому захоронение рассматривается как самый безопасный и экологичный способ обращения. Для примера приняты радиоактивные отходы (РАО). Предлагается рассмотреть существующие горные выработки промышленного назначения для целей захоронения в рудниках. Этот способ имеет ряд преимуществ при большом количестве потенциально пригодных выработок.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, горные выработки, подземные хранилища, захоронение радиоактивных отходов.

Неравномерное развитие технологий утилизации и их высокая стоимость привели мир к проблеме обращения с отходами. Их объем неуклонно увеличивается и тенденции к сокращению накопленного объема не ожидается (рис. 1).

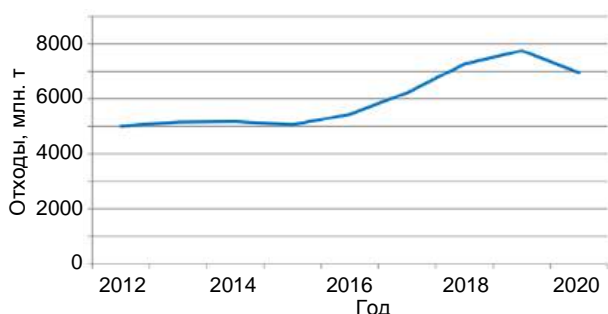


Рис. 1. Динамика показателей объема образования отходов производства и потребления в Российской Федерации 2010—2020 гг [1]

Эта проблема становится все острее в связи с тем, что из области экологии—экономики она стала переходить в область политики и межгосударственных отношений.

Развитые страны активно включаются в решение проблем обращения с отходами, используя три пути — утилизация, временное складирование или захоронение.

Технологии утилизации отходов успешно применяются и активно развиваются. Однако это решение проблемы не всегда применимо по технологическим или экономическим причинам [2]. Разработка технологий утилизации проводится, но лишь малая часть доходит до промышленного применения.

На данный момент применяется временное складирование отходов, но полноценной технологии утилизации для большинства из них не найдено. Для части отходов складирование не является конечным решением проблемы и в дальнейшем потребует внимания.

С учетом изложенного выделяется группа отходов, для которых единственным методом обращения на данный момент, является захоронение. Для таких отходов захоронение является единственным возможным решением проблемы. При этом необходимо обеспечение защиты населения и окружающей среды от вредного воздействия на весь период потенциальной опасности. К ним относятся отходы высокого и среднего уровня опасности (1—4 класс) — химические вещества, радиоактивные материалы, техническая вода, шламы и хвосты горного производства, имеющие твердые и жидкие состояния. Таких отходов на территории РФ накоплено большое количество, что является проблемой.

Таблица 1

Объем накопленных отходов в РФ на 2022 г.
(Источник Росприроднадзор [3])

Тип отходов	Объем, млрд т
Промышленные	46,58
ТБО	5,18
РАО	0,001
Всего	51,75

Рассмотрим современную ситуацию по обращению с такими отходами на примере наиболее опасных и привлекающих внимание — радиоактивных отходов (РАО). В настоящее время преобладает способ временного размещения таких отходов на поверхности земли или на глубине до 10 м ввиду его технологической простоты и низкой стоимости [4]. Более безопасный и, потому, рекомендованный способ — захоронением — менее распространен в связи с его высокой стоимостью и сложностью. В Россий-

Артемьев Андрей Сергеевич, инженер-испытатель.
E-mail: tskorvin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2022 г.

© Артемьев А. С., 2023

ской Федерации существует один приповерхностный (г. Новоуральск, Свердловская обл.) и три глубинных пункта захоронения (г. Димитровград, Ульяновская обл., г. Железногорск, Красноярский край, г. Северск, Томская обл.) [5]. Что касается высокоопасных РАО 1—2 классов, то, учитывая экологические и экономические проблемы, связанные с их захоронением в приповерхностных пунктах (опасность аварии, необходимость охраны и обслуживания, возможность теракта и пр.), оно должно осуществляться в соответствии с федеральным законом [6] в пунктах глубинного захоронения. К строительству и содержанию этих пунктов предъявляется множество требований на всех этапах. Например, к месту расположения предъявляются следующие требования [7]:

- не допускается размещать пункт захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) на территориях, в пределах которых размещение ПЗРО запрещено законодательством, в том числе природоохранным;
- не допускается размещать ПЗРО на площадках, расположенных непосредственно на активных разломах или активных геодинамических зонах;
- не допускается размещать ПЗРО на площадках, сейсмичность которых характеризуется интенсивностью максимального расчетного землетрясения, превышающей 8 баллов по шкале МСК-64;
- не допускается размещать ПЗРО на территории, подверженной воздействию действующих вулканов, и на территории проявления активного грязевого вулканизма.

В связи с накоплением РАО способ их глубинного захоронения становится актуальным. Основным недостатком данной технологии является её затратность в связи с высокой стоимостью горнопроходческих работ на подобных глубинах [4] и небольшой опыт использования подобных объектов в отечественной практике.

Выходом из сложившейся ситуации служит использование для этих целей уже построенных объектов, расположенных на значительных глубинах. Данный способ используется в зарубежной [8] и отечественно практике [9], хотя в отечественной практике такой опыт невелик. Требуется найти способ удешевления процессов, связанных со строительством и эксплуатацией таких хранилищ.

Все глубинные пункты захоронения являются горными выработками, классифицирующимися по

назначению как подземные хранилища или сосуды — в зависимости от технологии захоронения и типа отходов.

При схожих горно-геологических условиях, хранилища отходов и горные выработки (ГВ) горных предприятий в обоих случаях являются искусственно созданными пустотами в верхней части земной коры с крепью, обеспечивающей устойчивость пород на определенный срок службы. Геометрические размеры и формы подземных хранилищ стремятся к формам и размерам выработок горнопромышленного назначения, т. к. сооружаются теми же методами — обычно, это камерные или протяженные выработки.

Благодаря богатой истории горной отрасли в нашей стране имеется большое количество выведенных из строя горных выработок. Их разнообразие по ключевым параметрам весьма велико, а география расположения охватывает всю страну. Процесс добычи полезных ископаемых сопряжен с постоянным строительством новых очистных и удлинением капитальных ГВ. Отработанные и капитальные выработки выводятся из эксплуатации по мере минования их надобности. Такие выработки могут принудительно обрушать или оставлять в проектных геометрических размерах продолжительное время в зависимости от инженерно-геологических условий. Капитальные выработки обычно проектируют так, чтобы использовать их максимально продолжительное время, после истечения которого их консервируют, ограждают или закладывают в зависимости от потребностей производства. Как следствие, на любом функционирующем руднике имеется фонд неиспользуемых ГВ разной степени сохранности, с частично сохраненной инфраструктурой. Объем неиспользуемых выработок только на одном предприятии может составлять около 1 млн м³, а выработок, находящихся в работе, до трех и более раз больше. Имеющийся опыт показывает, что изменить назначение ГВ с горнодобывающих на хранилища вполне возможно [8].

Сопоставим объемы существующих неиспользуемых выработок только на одном предприятии с прогнозом РАО, виден потенциал данного варианта захоронения. Для РАО 1—2 класса пункт глубинного захоронения на основе существующих ГВ на таком предприятии сможет перекрыть потребность на многие годы (рис. 2).

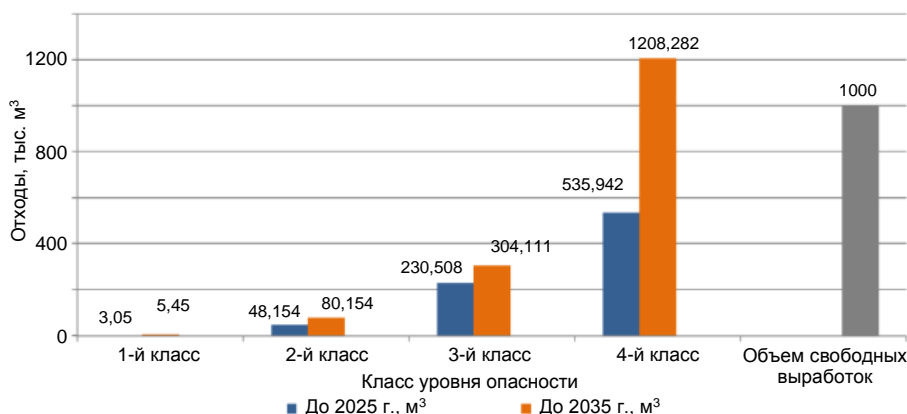


Рис. 2. Прогноз образования РАО предприятиями ГК "Росатом" и свободный объем выработок [10]

Очевидно, что реконструкция значительно дешевле и проще, чем строительство нового комплекса. Кроме того, на работающем предприятии имеется не только фонд ГВ, но и специфическое горное оборудование, необходимые кадровые ресурсы и большой объем информации о массиве ГП, без которой не строится ни одно горное предприятие.

Основные преимущества использования, существующих ГВ:

- Существующая окружающая инфраструктура — около рудников существуют населенные пункты, которые обеспечивают обслуживание горного комплекса, включая транспортную и логистическую доступность, выстроенную цепочку доставки материалов, достаточное энергообеспечение и пр.
- Существующее технологическое оснащение горного комплекса — здания и сооружения на поверхности, подъемные машины, электрическое хозяйство, ремонтные и производственные цеха на поверхности.
- Существующая подземная инфраструктура — подземные склады и ремонтные цеха, сеть энергоснабжения, водоотведения, вентиляции и освещения, контроль параметров шахтной атмосферы.
- Существующая система горных выработок, которая может служить не только для непосредственного захоронения отходов, но и для их обслуживания, доставки и мониторинга.
- Результаты инженерно-геологических, гидрологических и прочих изысканий.

Особое внимание следует уделить результатам инженерно-геологических изысканий. Именно геологическая характеристика является основным носителем информации, которая позволит оценить безопасность размещения того или иного типа отходов, а значит и возможность создания глубинного пункта захоронения. Кроме того, большой объем данных о строении массива может значительно облегчить и удешевить проектные и исследовательские работы при создании пунктов глубинного захоронения.

При выполнении проектно-исследовательских работ возможно прямое изучение массива, обеспечиваемое существующими ГВ. Гидрологическая ситуация также может быть оценена для каждого отдельного горизонта или участка массива. Облегчит проведение исследований и существующая накопленная статистика по водопитоку за все время работы предприятия. Такой объем данных поможет максимально точно оценить пригодность выработок для сооружения хранилища.

Предложение использовать рудники в качестве пунктов захоронения весьма разумно [10]. Однако необходим системный подход, который предоставит возможность выбора подходящего варианта. В связи с этим требуется разработать методику выбора горных предприятий, пригодных для создания на их базе пунктов захоронения. Методика должна быть основана на систематизации требований для хранения каждого вида отходов и их соотношения с параметрами существующих горных выработок. Такая методика позволит определить перечень горных предприятий, соответствующих требованиям захоронения, и выделить несколько предприятий для проведения дальнейших исследований.

Систематизация требований и их соотношение с существующими параметрами позволит исключать неподходящие рудники без лишних временных и экономических затрат. Для каждого типа отходов методика потребует разработку конкретной системы критериев, удовлетворяющих федеральным требованиям по безопасности [6].

В зависимости от критериев будут рассмотрены различные параметры горных предприятий, основные из которых перечислены далее:

- Инженерно-геологические условия.
- Техническое состояние предприятия.
- Доступность предприятия.
- Наличие доступных для исследования выработок.
- Обеспеченность предприятия кадрами и оборудованием.

Инженерно-геологические условия. Этот критерий является основополагающим. Пригодность массива к захоронению того или иного типа отходов является не единственным применением данной информации, не менее важны и другие параметры:

- перспектива развития горных выработок в плане или в глубину;
- тип и интенсивность водопритоков;
- наличие опасных зон (наличие газоносных областей или напряженных участков горных пород).

Техническое состояние предприятия. Техническое состояние рудника и системы выработок является важнейшим критерием. Даже при соответствии инженерно-геологическим условиям, потенциал может быть нивелирован деградацией предприятия, предотвратить которое будет экономически нецелесообразно.

Доступность. Логистические издержки могут составлять до 20 % стоимости захоронения [4]. Отсутствие железнодорожной сети и удаленность от крупных транспортных центров значительно усложняет доставку.

Наличие доступных для исследования выработок. На этапе отбора может возникнуть необходимость доступа в выработки для их изучения. Наличие свободных выработок может значительно ускорить исследования, исключив необходимость в постройке новых ГВ.

Обеспеченность предприятия кадрами и оборудованием. Специфическое горное оборудование и обученный работе на нем персонал потребуются как при проведении исследований, так и при строительстве хранилища.

Заключение

Нарастающий объем отходов требует безопасных методов обращения с ними. Отдельные типы отходов невозможно переработать или перевести в безопасное состояние. В связи с этим актуальным способом обращения с такими отходами является захоронение в приповерхностных или глубинных пунктах захоронения. Т. к. пункты глубинного захоронения обладают параметрами, схожими с горными выработками горнопромышленного назначения, предлагается исполь-

зывать последние для этих целей. В связи с большим объемом выработок и множеством плюсов у действующих предприятий такой вариант имеет большой потенциал. Для обеспечения возможности выбора подходящих предприятий необходимо разработать методику оценки параметров существующих горных выработок, удовлетворяющих требованиям для каждого типа отходов. Системный подход к выбору горных выработок позволит сократить экономические и временные издержки, повысить качество исследовательских работ, что, в итоге обеспечит максимально эффективный с экономической и экологической точки зрения результат.

Автор выражает благодарность Н. В. Горину и М. В. Красносельских за оказанную помощь в написании настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. — М.: Минприроды России / МГУ им. М. В. Ломоносова, 2021. — 864 с.
2. Хасанова В. К., Шильникова Н. В. Проблема утилизации промышленных отходов в России на современном этапе её развития // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 2. С. 76—78.
3. ТАСС, информационное агентство. Что известно о реформе отрасли обращения с отходами в России [Электронный ресурс]. URL: <https://tass.ru/info/11787987> (дата обращения: 30.01.2022 г.).
4. Сорокин В. Т., Павлов Д. И. Стоимость захоронения РАО: зарубежные оценки // Радиоактивные отходы. 2019. № 1(6). С. 46—55.
5. НО РАО. ФГУП "Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами" г. Москва [Электронный ресурс]. URL: <http://www.norao.ru/> (дата обращения: 30.01.2022 г.).
6. Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации. Федеральный закон от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ.
7. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии "Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности" (НП-055-14). Приказ Ростехнадзора от 22.08.2014 № 379.
8. Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Капырин И. В. и др. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО. — М.: Комтехпринт, 2015. — 208 с.
9. Рыбальченко А. И., Курочкин В. М., Ершов Б. Г. и др. 50 лет глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов — практические и научные результаты // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2014. № 1. С. 86—90.
10. Кузьмин Е. В., Калакуцкий А. В., Тарасов М. А., Морозов А. А. Обоснование возможности размещения радиоактивных отходов 2-го и 3-го классов в подземном пространстве урановых рудников // Горная промышленность. 2020. № 5. С. 32—37. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-5-32-37.

Assessing the feasibility of underground space in mines and mine openings for radioactive waste disposal

A. S. ARTEMYEV

FSUE RFNC –VNIITF named after Academ. E. I. Zababakhin,
Snezhinsk, Chelyabinsk Reg., Russia

The existing industrial mine openings are proposed to consider as waste disposal sites. Due consideration has been given to domestic and foreign experience in deep earth waste disposal in unused mines. A lot of would-be suitable mine openings may prove this method highly beneficial. A technique for judicious selection of best mine openings is to be developed. Criteria that constitute a basis for this technique are provided.

Keywords: radioactive waste, mine openings, underground storage facilities, radioactive waste disposal.

Bibliography — 10 references.

Received December 14, 2022

УДК 504.064.4

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_1_11

EDN: MXMWVU

Аналитический обзор оборудования для дробления и переработки техногенного сырья (Обзор)

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

В. Г. ЖАРОВ, канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина»,
Москва, Россия

При обогащении техногенного сырья применяют дробление (измельчение) для уменьшения крупности материалов и освобождение их от упаковки, содержащихся в исходном сырье, и доведения исходного сырья до необходимой крупности или гранулометрического состава. Измельчение вторичного сырья имеет немаловажное значение в общей системе рециркуляции. Без дробления отходов и доведения их до требуемой фракции вторичное производство новых материалов просто невозможно. Представлен аналитический обзор дробильного оборудования для переработки вторичных материалов и отобранных отходов.

Ключевые слова: ТБО, оборудование, дробление, сортировка, технические характеристики оборудования.

Утилизация твердых бытовых отходов (ТБО) — одна из самых острых и актуальных экологических проблем на сегодняшний день. Потребление продуктов человечеством с каждым годом только увеличивается, соответственно растут и темпы производства. А рост производства, что вполне логично, сопровождается количеством образующихся отходов. Как показывает экологический мониторинг уровень загрязнения в российских городах резко увеличился. Это обусловлено накоплением значительных масс ТБО, существующим уровнем технологии переработки сырья и недостаточностью его комплексного использования [1].

Утилизация твердых отходов приводит к необходимости либо разделения их на составляющие с последующей обработкой отделенных материалов различными методами, либо придания им определенной формы [2, 3].

Одной из вспомогательных операций, применяемых при переработке отходов, является дробление. Дроблением (измельчением) называют процессы разрушения и уменьшения крупных твердых кусков материала под действием различных сил: внешних механических, тепловых, электрических сил,

направленных на преодоление внутренних сил сцепления, связывающих между собой частицы твердого тела и др., до частиц нужного размера [4, 5].

Дробление широко применяют при переработке отходов открытых горных работ, отвальных шлаков металлургических предприятий, устаревших резинотехнических изделий, отвалов галита и фосфогипса, древесных отходов, некоторых пластмасс, строительных и многих других материалов. Выбор оборудования для дробления техногенного сырья обусловлен его составом, крупностью, свойствами и технологиями его переработки [6—8].

Для дробления техногенного сырья чаще всего применяют дробилки роторного типа: ножевые и дисковые, молотковые; реже применяют щековые дробилки.

Целевое применение ряда дробилок ограничено их использованием только для вскрытия пакетов (избирательное дробление).

Разрыватели пакетов фирмы "Netmus" (Россия) используют в начале сортировочного процесса для вскрытия пакетов с затаренными в них отходами. Аппараты этой фирмы отличаются способностью вскрывать пакеты различной величины при практически полном их освобождении. При этом общая масса отходов разрыхляется, отходы разъединяются и равномерно подаются в процесс сортировки. Весьма важно, что отходы в процессе вскрытия пакетов практически не измельчаются, что способствует повышению эффективности последующей сортировки.

Разрыватель пакетов DKZ-B50M, предлагаемый фирмой "Netmus" (Россия, официальный дилер европейских фирм) (рис. 1) имеет зубчатый механизм, обеспечивающий разрывание пакетов (без дробле-

Борисова Оксана Николаевна, доцент.

E-mail: borisova-on@bk.ru

Тыгер Любовь Михайловна, доцент.

E-mail: lyutyger@yandex.ru

Жаров Василий Геннадьевич, доцент.

E-mail: basille@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2022 г.

© Борисова О. Н., Тыгер Л. М., Жаров В. Г., 2023

ния и деформации содержимого пакетов). Отходы, затаренные в мешки, загружаются в бункер, обслуживаемый подвижным полом и подаются к разрывному устройству равномерным слоем с помощью цепного конвейера. Высота зубчатого механизма регулируется (в зависимости от размера пакетов) с помощью гидравлического привода. Преобразователь частоты регулирует скорость движения материала.

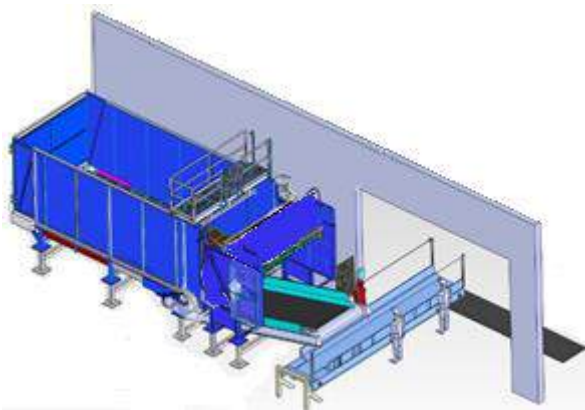


Рис. 1. Общий вид разрывателя пакетов DKZ-B50M3 фирмы "Netmus"

Техническая характеристика разрывателя пакетов DKZ-B50M3 фирмы "Netmus":

- горизонтальный подвижный пол
 - длина пола 6200 мм;
 - мощность двигателя 2,2 кВт;
 - скорость движения конвейера 0,2—7,5 м/мин;
- наклонный подвижный пол
 - длина пола 3000 мм;
 - скорость движения пола 1,05—10,0 м/мин;
- устройство для разрывания и сортировки
 - количество разрывающих элементов 10 шт.;
 - мощность двигателя 4 кВт;
 - габариты (в т. ч. перила на платформе) 9510×3680×4270;
 - масса 9,3 т;
- цепной ленточный конвейер
 - ширина ленты 3000 мм;
 - длина ленты 4000 мм;
 - мощность 1,5 кВт;
 - скорость движения ленты 0,6 (0,8) м/сек.

В другом разрывателе пакетов OC250/75 фирмы "Netmus" на поверхности вращающегося с малой скоростью ротора по спирали расположены зубья, которые вскрывают пакеты путем прижатия их к ряду дополнительных зафиксированных зубьев (рис. 2).

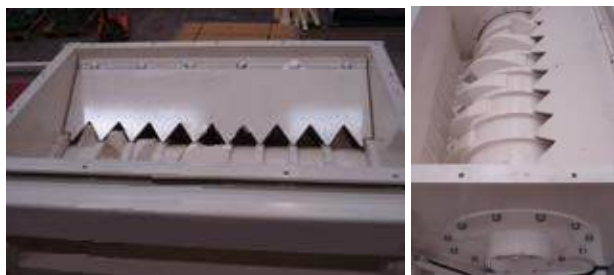


Рис. 2. Общий вид разрывателя пакетов OC250/75 фирмы "Netmus"

Расстояние между зубьями ротора и рядом зафиксированных зубьев регулируют вручную (в диапазоне 5—150 мм). Скорость вращения ротора регулируется с помощью частотного преобразователя. Установка вскрывает пакеты и не разрушает материал внутри пакетов. Разрыватель пакетов модели OC оборудован системой самоочистки.

Ниже приведена техническая характеристика разрывателя пакетов OC250-75 фирмы "Netmus":

- габариты 4635×1500×1855 мм;
- масса 6,8 т;
- длина ротора 2500 мм;
- диаметр ротора 950 мм;
- скорость вращения ротора 0—12 об/мин;
- количество зубьев на роторе 26 шт.;
- ряд зафиксированных зубьев 13 шт.;
- установочная мощность 75 кВт.

В двух- и трехроторных дробилках роторы выполнены в виде винтов, режущие кромки которых обеспечивают дробление материала (рис. 3). Дробилки этого типа часто используются в зарубежной практике перед сепарацией ТБО для вскрытия мешков и пакетов с отходами.

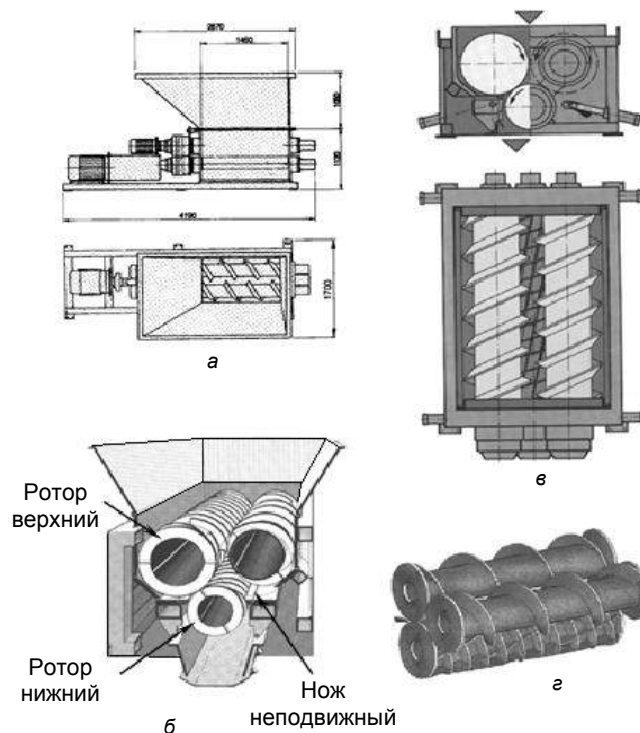


Рис. 3. Трехроторная ножевая дробилка:

а — общий вид дробилки типа Malin 400 (диаметр роторов 400 мм) с приводом; б — схема взаиморасположения рабочих элементов дробилки (вращающиеся роторы и неподвижные ножи); в — план и разрез дробилки; г — роторы с режущими ножами винтового типа

Нижний ротор образует режущую поверхность как с двумя верхними роторами, так и с неподвижными ножами, закрепленными на корпусе (за счет дополнительных многозаходных витков). Степень дробления регулируется с помощью изменения зазора между нижним ротором и стационарными ножами.

Скорость вращения каждого ротора можно плавно и индивидуально регулировать.

Материал в роторные дробилки может подаваться с помощью ленточного конвейера или погрузчика; при попадании недробимых предметов автоматически обеспечивается реверсивное вращение ротора. При использовании роторных дробилок характерно низкое пылеобразование.

Два верхних винтовых ротора, вращающихся с небольшой скоростью навстречу друг другу, обеспечивают предварительное дробление материала, нижний ротор — его доизмельчение.

Далее рассмотрим дробилки группы компаний "Нетмус", предназначенные для дробления разнообразных материалов в процессах обращения с отходами. Дробилки отличаются простотой обслуживания и относительно высокой производительностью при низ-

ких затратах энергии; допускается дробление влажных материалов. Дробилки сертифицированы в ЕС и РФ.

В табл. 1 приведена характеристика различных моделей однороторных дробилок "Нетмус", а на рис. 4 — схема работы однороторной дробилки.

В табл. 2 приведена характеристика различных моделей двухроторных дробилок "Нетмус", а на рис. 5 — общий вид двухроторной дробилки (модель M250/2-160). Дробилки этого типа могут быть использованы в линиях сортировки отходов и переработки вторсырья.

Трехроторная дробилка серии "Нетмус" выпускается пяти типоразмеров (табл. 3 и рис. 6) и также может использоваться в линиях сортировки отходов и переработки вторсырья.

Таблица 1

Характеристика однороторных дробилок системы "Нетмус" для дробления пластмассовых отходов (гарантийный срок службы 2 года)

Модель	Технические данные				
	Габариты, мм	Мощность, кВт	Камера дробления (резки), мм	Ножи, шт.	Ширина ножей, мм
M400/1-200	1000×850×1600	2,2	200×215	2	20
M400/1-400	1000×850×1600	2,2—3	405×215	2	20
M600/1-400	1250×1380×1600	5,5	600×500	3	25
M600/1-600	1581×602×502	5,5	600×500	3	25
M700/1-600	2437×883×406	15—30	580×670	1	30
M700/1-900	2737×883×406	15—30	880×670	1	30

Примечание. Производительность дробилки M400/1-200 до 40 кг/час, масса 280 кг. Срок эксплуатации ножей — 2000 часов. Область применения: дробление ПЭТФ-бутылок, пластмассовых банок, фольги.

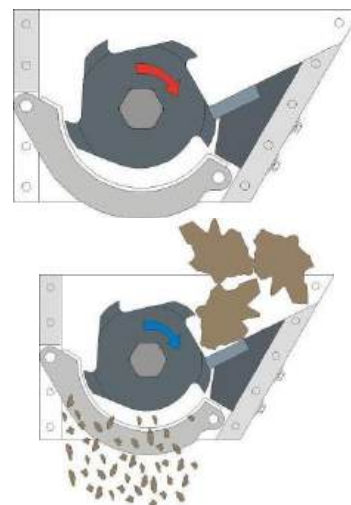


Рис. 4. Схема работы однороторной дробилки системы "Нетмус"

Таблица 2

Характеристика двухроторных дробилок системы "Нетмус" для дробления крупных материалов и отходов (шины легковых авто, пластмасса, фольга) (гарантийный срок службы — 2 года)

Модель	Технические данные		
	Габариты, мм	Камера дробления (резки), мм	Мощность, кВт
M250/2-160	930×15×341,5	160×265	3
M250/2-230	1050×415×341,5	230×265	3
M250/2-350	1170×415×341,5	350×265	3
M350/2-330	1306×733×497	325×390	2,2—4,0
M350/2-410	1382×733×493	410×390	2,2—4,0
M450/2-360	1140×910×601,5	368×580	5,5—7,5
M450/2-420	1200×910×601,5	428×580	5,5—7,5
M450/2-480	1260×910×601,5	488×580	5,5—11,0
M450/2-720	1378×910×601,5	736×580	11
M450/2-1250	1910×910×601,5	1256×580	11
M465/2-480	1175×1033×829	488×620	11—15
M465/2-570	1265×1033×829	578×620	11—15
M465/2-720	1425×1033×829	725×620	11—15
M465/2-1000	1695×1033×829	1008×620	11—15
M465/2-1250	1945×1033×829	1258×620	11—15
M468/2-750	1637×540×1194	758×642	15—22

Примечание. Масса дробилки M250/2-160 — 250 кг.

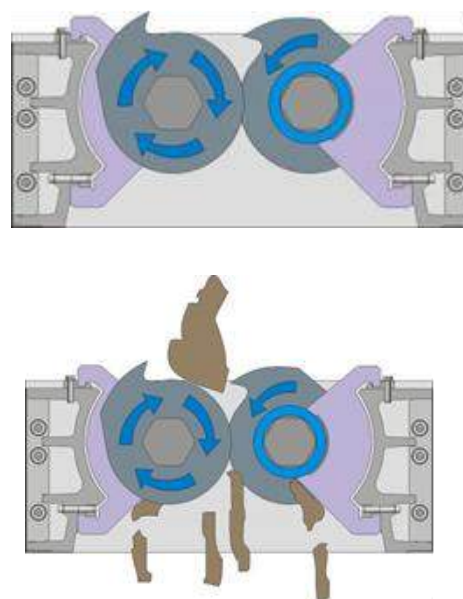


Рис. 5. Схема работы двухроторной дробилки системы "Нетмус"

Таблица 3

Характеристика трехроторных дробилок системы "Нетмус" для дробления однородных материалов (резиноотходы, пластмассовые отходы, фольга и др.) Гарантийный срок службы — 2 года

Модель	Технические данные			
	Габариты, мм	Мощность, кВт	Загрузочное окно, мм	Масса, т
M465/3-480	1053×1245×1198	2×11	488×605	1670
M465/3-720	1300×1245×1198	2×11	736×605	2145
M/H 480/3-750	1660×2015×870	—	758×760	—
M/H 480/3-1000	1910×2015×870	—	1008×760	—
M/H 480/3-1250	2160×2015×870	—	1258×760	—

Примечание. В дробилке M465/3-480 размеры режущего блока 488×605мм (количество неподвижных ножей 3 шт.)

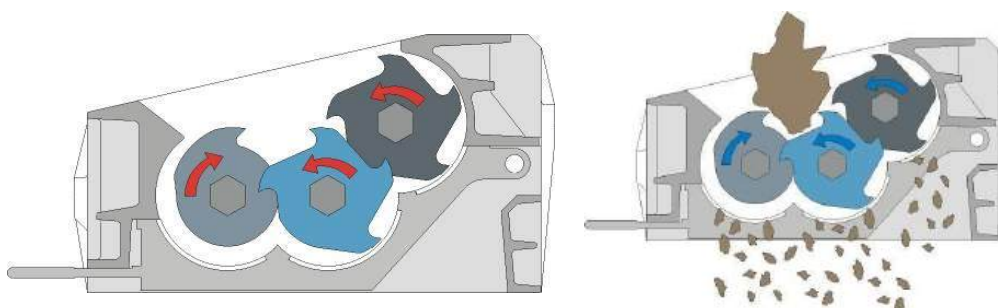


Рис. 6. Схема работы трехроторной дробилки системы "Нетмус"

Известны случаи применения щековых дробилок для дробления ТКО, но значительно чаще их применяют для дробления бетонных и железобетонных отходов (образующихся, например, при сносе зданий), кирпича и асфальта.

В щековой дробилке дробление производится путем раздавливания дробимых кусков между вертикальной и наклонной плоскостями (щеками). Материал загружается в приемное отверстие между щеками. По мере уменьшения размеров куски опускаются вниз к выходной щели.

На рис. 7 показана схема работы щековой дробилки типа ЩДС со сложным качанием щеки, на рис. 8 — типа ЩДП с простым качанием щеки. В дробилке ЩДС движение подвижной щеки осуществляется в результате вращения маховика с эксцентриковым валом (подвижная щека непосредственно подвешена на эксцентриковом валу и совершает сложное движение в виде замкнутых кривых). В дробилке ЩДП движение подвижной щеки осуществляется при движении вверх—вниз шатуна с эксцентриковой осью, шатун приводит в движение распорные плиты.



Рис. 7. Щековая дробилка типа ЩДС

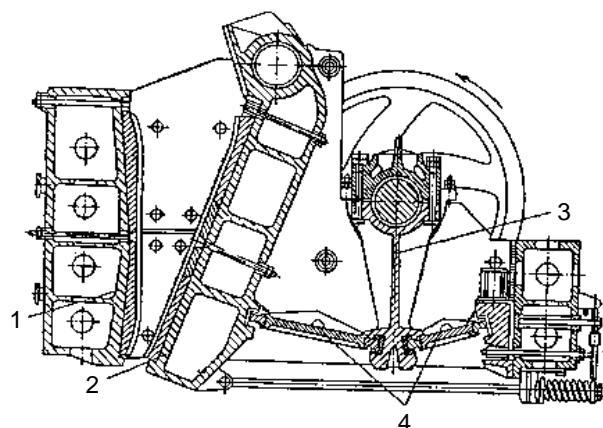


Рис. 8. Щековая дробилка типа ЩДП:

1 — неподвижная щека; 2 — подвижная щека;
3 — шатун; 4 — распорные плиты

Весьма эффективны для дробления материалов повышенной прочности (в том числе техногенного сырья, включая отходы железобетона и другие строительные отходы, отходы футеровки термического оборудования, металлургические шлаки, отходы керамики и пр.) вибрационные щековые дробилки типа ВЩД, созданные в АО "Механобр-техника" (Санкт-Петербург). Крупность дробленного продукта в вибрационной щековой дробилке снижается в два раза по сравнению с обычной при одинаковой производительности (высокая частота ударов щек обеспечивает повышенную степень дробления — до 10...20 и выше, причем для разрушения материала, вследствие ударно-вибрационного воздействия щек, требуются меньшие усилия, чем в обычных щековых дробилках).

Дробилка типа ВЩД отличается простотой конструкции (рис. 9).

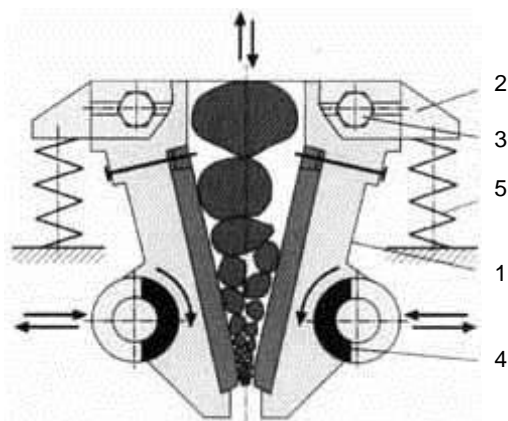


Рис. 9. Вибрационная щековая дробилка типа ВЩД:
1 — щека; 2 — корпус; 3 — торсионы; 4 — вибровозбудители;
5 — мягкие пружины

Дробление материала осуществляется между двумя щеками 1, подвешенными к корпусу 2 на торсионах 3. Щеки совершают синхронные колебания (частота 800—1500 в минуту) под действием вибровозбудителей 4, которые одновременно вызывают вертикальные колебания дробилки на мягких пружинах 5. За счет направленного вибрационного воздействия щеки на дробимый материал обеспечивается повышенная производительность машины — до 100 т/час при использовании наиболее крупной дробилки с размером отверстия 1200×1500 мм (при максимальной крупности исходного питания 1000 мм крупность готового продукта после дробления в этой дробилке материала средней прочности составляет 70 мм).

Дробилки ВЩД характеризуются низким энергопотреблением (мощность привода наиболее крупной дробилки составляет 2×55 кВт).

Масса самой крупной дробилки 54 т, наиболее мелкой — 1,4 т (размеры приемного отверстия 80×300 мм, наибольшая крупность питания 65 мм,

крупность готового продукта 15 мм, мощность привода 2×75 кВт). Габариты самой крупной дробилки 4000×3700×4000 мм, самой мелкой — 1500×1240×1400 мм.

Вибрационная щековая дробилка ВЩД 440×800 мм (масса 15 т, мощность привода 2×30 кВт) продана в Японию, где получила название "Катюша" (рис. 10).



Рис. 10. Общий вид вибрационной щековой дробилки ВЩД (Механобр-техника)

Характеристика щековых дробилок приведены в табл. 4 и 5.

Дробилки типа ВЩД характеризуются автоматическим пропуском недробимых тел, размеры которых превышают размеры разгрузочной щели, т.е. эти дробилки, в отличие от стандартных, не требуют специальных предохранительных устройств. Другая особенность дробилок типа ВЩД — они могут работать как при дозированной загрузке, так и под завалом (дробилка может запускаться под нагрузкой с полностью заполненной камерой дробления).

Молотковые дробилки включают дробильную камеру с решетчатой нижней частью, через которую разгружается дробленый материал, и вращающийся вал с жестко закрепленными или шарнирно подвешенными на нем билами (ударными вращающимися инструментами, часто называемыми молотками).

Молотковые дробилки бывают двух типов — горизонтального и вертикального.

Таблица 4

Характеристика щековых дробилок АО "Механобр-техника"

Модель	Шифр	Производительность, кг/час	Крупность исходного материала, мм	Крупность готового материала, мм	Мощность привода, кВт	Масса, кг
ДЩ 60х100	179ДР	50—300	До 55	1—20	1,1	150
ДЩ 100х200	187ДР	80—500	До 95	2—20	2,2	250
ДЩ 160х250	—	3 м³/час	До 130	Ширина щели, 13—45	7,5	1,6 т
ДЩ 180х250	235ДР	3 м³/час	До 170	Ширина щели, 5—15	7,5	1,1 т

Таблица 5

Характеристика виброщековых дробилок АО "Механобр-техника"

Модель	Шифр	Производительность, т/час	Крупность исходного материала, мм	Крупность готового продукта, мм	Мощность привода, кВт	Масса, т
ВЩД 80х300	150ДР	1—1,5	До 65	15	2×7,5	1,4
ВЩД 130х300	184ДР	До 1,5	До 110	20	2×11	1,5
ВЩД 440х800	238ДР	До 35	До 350	40	2×30	15
ВЩД 440х1200	240ДР	До 50	До 350	50	2×45	20

Дробилки типа ВЩД характеризуются автоматическим пропуском недробимых тел, размеры которых превышают размеры разгрузочной щели, т.е. эти дробилки, в отличие от стандартных, не требуют специальных предохранительных устройств. Другая особенность дробилок типа ВЩД — они могут работать как при дозированной загрузке, так и под завалом (дробилка может запускаться под нагрузкой с полностью заполненной камерой дробления).

Молотковые дробилки имеют дробильную камеру с решетчатой нижней частью, через которую разгружается дробленый материал, и вращающийся вал с жестко закрепленными или шарнирно подвешенными на нем билами (ударными вращающимися инструментами, часто называемыми молотками).

Молотковые дробилки бывают двух типов — горизонтального и вертикального.

На рис. 11 представлена молотковая дробилка для дробления ТБО горизонтального типа.

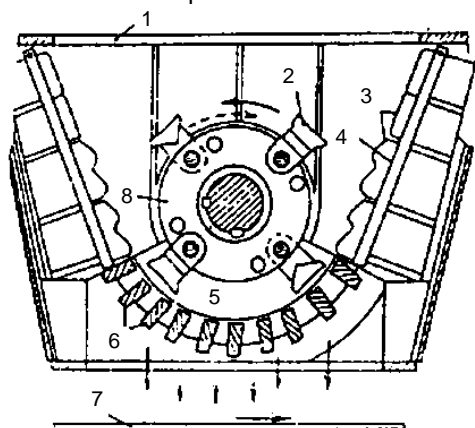


Рис. 11. Молотковая дробилка горизонтального типа (фирма "Нейшенел" Рискайлин, США):

1 — загрузочное отверстие; 2 — молотки; 3 — режущие ножевые элементы; 4 — стенка корпуса; 5 — зона доизмельчения; 6 — решетка; 7 — конвейер; 8 — ротор

Материал поступает через загрузочное отверстие 1 в рабочую камеру дробилки. Дробящими элементами дробилки являются молотки 2, укрепленные на роторе 8, и режущие ножевые элементы 3, установленные на стенке 4 (стенка имеет некоторую подвижность, что устраняет заклинивание дробилки при попадании крупногабаритных предметов). Отходы измельчаются до 100—125 мм, проходят через решетку 6 и поступают на конвейер 7. Недоизмельчен-

ный материал скапливается над решеткой в пространстве 5 и измельчается при реверсивном движении ротора 8.

На рис. 12 представлена молотковая дробилка для дробления ТБО вертикального типа.

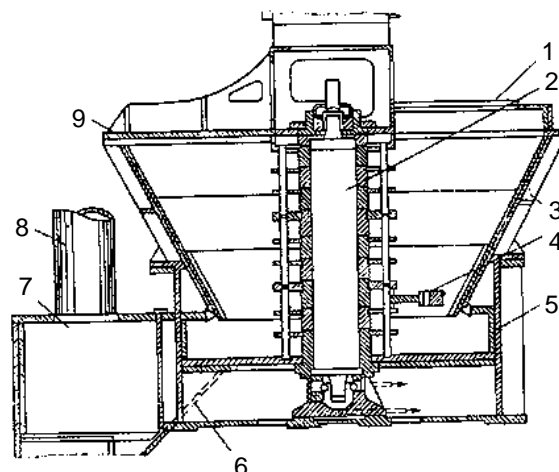


Рис. 12. Молотковая дробилка вертикального типа (фирма "Толлемач", Великобритания):

1 — загрузочный люк; 2 — вертикальный ротор; 3 — конический корпус; 4 — молотки; 5 — цилиндрический корпус; 6 — перепускные каналы; 7 — циклон; 8 — воздухопровод; 9 — крышка

Материал поступает через загрузочный люк 1 в крышке 9 в рабочую зону дробилки, где разбрасывается воздушным потоком, созданным вращающимся вертикальным валом (ротором) 2 с установленными на нем молотками 4 (частота вращения вала 800 об/мин); вал имеет реверсивное вращение. В конусной части дробилки отходы подвергаются предварительному дроблению с помощью небольшого числа молотков. Далее отходы дробятся до 15—25 мм в цилиндрическом корпусе 5 дробилки и разгружаются через перепускные каналы 6 в циклон 7 и затем — на конвейер. Разгрузочное отверстие дробилки не закрыто решеткой, что исключает образование пробок. Дробилка снабжена блокирующим устройством, автоматически отключающим ее при попадании недробимых отходов. В этой дробилке одновременно происходит баллистическая сепарация (мягкие отходы отражаются молотками 4 и направляются в специальное окно в крышке 9).

В табл. 6 приводится характеристика молотковых дробилок фирмы АО "Механобр-техника" (Россия).

Таблица 6

Техническая характеристика молотковых дробилок фирмы АО "Механобр-техника" (Россия)

Технические данные	Ед. изм.	Модель МД						
		1,5x1	3x2	5x2	5x5	7x5	7x7	7x9
Диаметр ротора	мм	150	300	500	500	700	700	700
Длина ротора	мм	100	200	200	500	500	700	900
Производительность	кг/час	до 20	до 70	до 100	до 150	до 200	до 350	до 600
Размеры загрузочного отверстия	мм	70×70	200×150	235×235	220×500	530×340	730×340	930×340
Крупность готового продукта	мм	1—3	2—10	3—10	3—15	5—35	5—35	5—35
Мощность привода	кВт	1,1	4	11	15	22	30	37
Масса	т	0,04	0,15	0,7	0,9	2,1	2,2	2,6

В РФ (завод "Инфед") выпускается молотковая дробилка Molot-5000. Дробилка позволяет дробить в одном аппарате как хрупкое, так и вязкое сырье. Завод Инфед выпускает более тысячи дробилок. Область применения: дробление пластмасс, картона, древесных отходов, строительных отходов. Отличительная особенность дробилки — вал двигателя соединен с массивным ротором с пальцами, на которых крепятся закаленные металлические молотки или ножи. Молотки и ножи имеют зазубренную форму, что позволяет не только дробить, но и резать материал. Скорость вращения ротора регулируется с помощью преобразователя. Решетка внизу дробилки установлена в направляющих и легко заменяется. Гарантийный срок службы дробилки — 2 года, срок службы — 15 лет. Общий вид дробилки показан на рис. 13.



Рис. 13. Общий вид молотковой дробилки Molot-5000 (Россия)

Техническая характеристика дробилки Molot-5000:

- производительность — до 5000 кг/час;
- размеры загрузочного отверстия 80×350 мм;
- крупность дробимого материала — до 40 мм;
- крупность дробленого материала — от 80 мкм до 10 мм (регулируется с помощью отверстий решетки);
- емкость бункера (приемной воронки) — 100 л;
- диаметр ротора 390 мм;
- скорость вращения ротора 2900 об/мин;
- установочная мощность 7,5 кВт;
- габаритные размеры 1200×700×1700 мм;
- масса 200 кг.

Завод "Тюльские машины" (Россия) выпускает минимолотковые дробилки МПС-200 для дробления отходов кирпичей и стекла (рис. 14). Срок эксплуатации без капремонта — до 10 лет; гарантийный срок службы 1 год. Производительность дробилки — до 4 т/час, установочная мощность 7,5 кВт, скорость вращения 100 об/мин.

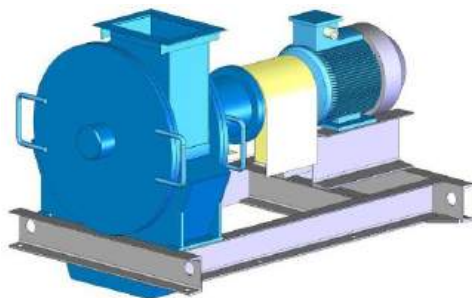


Рис. 14. Общий вид минимолотковой дробилки МПС-200 (Россия)

Завод "Тюльские машины" производит также вертикальные молотковые дробилки, предназначенные для дробления материалов средней прочности (влажность — до 7 %). Материал дробится за счет ударного действия молотков и за счет удара об отбойники брони. Дробилки эффективны для дробления бетона и стекла. Общий вид вертикальной молотковой дробилки ВД-1С представлен на рис. 15.

Техническая характеристика дробилки ВД-1С:

- производительность — до 5 т/час;
- крупность дробимого материала — до 150 мм;
- крупность дробленого материала — 2 мм;
- установочная мощность 45 кВт;
- масса 2,5 т.



Рис. 15. Общий вид вертикальной молотковой дробилки ВД-1С (Россия)

Фирма АО "НИИпроектасбест" (Россия) выпускает некрупные вертикальные и горизонтальные молотковые дробилки.

Дробилки вертикального типа (табл. 7) предназначены для дробления материалов малой образивности, для отделения мягких изоляционных материалов от металлических жил проводов, для дробления металлической стружки из углеродистой стали, для дробления древесных отходов и может быть использована на предприятиях машиностроения, металлургической промышленности и др. По данным фирмы, дробилки удобны для технического обслуживания, надежны в эксплуатации. Объекты внедрения — ООО "Техметалл" (г. Ульяновск) и ООО ПК "АрсеналВторМет" (г. Екатеринбург).

Таблица 7

Техническая характеристика молотковой дробилки вертикального типа фирмы АО "НИИпроектасбест" (Россия)

Параметры	Ед. изм.	Модель	
		ДМВ-310	ДМВ-500
Крупность исходного материала, не более	мм	30	50
Производительность (максимальная)	т/час	3,0	5,0
Окружная скорость ротора	м/с	36	60
Частота вращения ротора	об/мин	2500	2500
Число рядов молотков	—	4	4
Установочная мощность	кВт	7,5/11,0	11
Габаритные размеры	мм	1225×500×920	1280×865×800
Масса	т	0,505	0,5

Молотковая дробилка ДМС горизонтального типа этой фирмы предназначена для дробления стружки из стали и цветных металлов и может быть использована на предприятиях машиностроения, металлургической промышленности и др.

Характеристика дробилки ДМС:

- производительность — до 1 т/час;
- установочная мощность — 18,5 кВт;
- габаритные размеры — 1787×980×1100 мм;
- масса — 1,2 т.

С точки зрения государственных интересов, здравого смысла, актуальности и сложности стратегических задач решение проблемы ТБО требует первоочередного внимания. В то же время в технологиях переработки ТБО операция дробления существенной роли не играет, за исключением необходимости вскрытия перед сортировкой ТБО полиэтиленовых пакетов (мешков) с затаренными в них отходами (по возможности, без дробления содержимого пакетов). В современной практике вскрытие тары с отходами достигается применением избирательного дробления.

Очевидно, что разработки, связанные с созданием принципиально иной техники, позволяющей эффективно решать проблемы техногенного сырья и учитывающей современные требования энергосбережения,

экономики, экологии и надежности, являются наиболее перспективными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шубов Л. Я., Борисова О. Н., Доронкина И. Г. Оптимизация системы комплексного управления ТБО в российской Федерации (обосновывающие материалы и стратегия) // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. 2018. № 1. С. 2.
2. Доронкина И. Г., Борисова О. Н., Гречишкин В. С. Оптимизация процесса утилизации твердых бытовых отходов (ТБО) // Сервис в России и за рубежом. 2011. № 1(20). С. 62—67.
3. Борисова О. Н. Предпосылки для рационального ресурсосбережения — создание экотехнопарков // Славянский форум. 2018. № 2(20). С. 124—129.
4. Борисова О. Н. Ресурсоэффективное использование техногенного сырья в строительстве: новые горизонты для инноваций: сб. "Наука — сервису". Мат. XXIII Межд. науч.-практ. конф. 2018. С. 294—303.
5. Борисова О. Н. Сравнительный анализ технологий по сортировке отходов компании "BENLI RECYCLING GROUP" и регионального оператора "ТБО "ЭКОСЕРВИС" // Экология промышленного производства. 2021. № 1(113). С. 8—11.
6. Шубов Л. Я., Борисова О. Н. Об оптимизации управления твердыми бытовыми отходами в системе ЖКХ // ЖКХ. 2013. № 11. С. 20—29.
7. Гречишкин В. С., Борисова О. Н. Практика переработки твердых бытовых отходов и тенденции развития технологий: сб. "Современные проблемы туризма и сервиса". Мат. Всеросс. науч. конф. аспирантов и молодых ученых. 2013. С. 128—132.
8. Шубов Л. Я., Борисова О. Н. Утилизация ценных компонентов твердых бытовых отходов // ЖКХ. 2013. № 8. С. 59—64.

Analytical review of equipment for crushing and processing of technogenic raw materials (Review)

O. N. BORISOVA, L. M. TYGER

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

V. G. ZHAROV

A. N. Kosygin Russian State University, Moscow, Russia

When enriching manmade raw materials, crushing (grinding) is used to reduce the size of materials and release them from the packaging contained in the feedstock, and bring the feedstock to the required size or granulometric composition. The grinding of secondary raw materials is of no small importance in the general recycling system. Without crushing waste and bringing it to the required fraction, the secondary production of new materials is simply impossible. The article shows an analytical review of crushing equipment for processing secondary materials and selected waste.

Keywords: solid waste, equipment, crushing, sorting, technical characteristics of the equipment.

Bibliography — 8 references.

Received November 25, 2022

УДК 678

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_1_19

EDN: NIOIXC

Влияние древесной золы и полимерных отходов на свойства теплоизоляционного композиционного материала

Е. С. ПИКАЛОВ, канд. техн. наук

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

Представлены результаты исследований зависимости основных физико-механических свойств теплоизоляционного композиционного материала от соотношения древесной золы и вторичного полимерного связующего в его составе. Исследуемый материал получают путем растворения отходов пенополистирола в метиленхлориде, холодном перемешивании раствора с древесной золой, холодном прессовании с последующей термообработкой для удаления растворителя. Установлено влияние соотношения наполнителя и связующего на формирование пористой структуры в материале и зависимость других свойств как от состава материала, так и от характера пористости. Выявлено количество наполнителя, приводящее к недостатку связующего. Обосновано применение полученного материала для внутренних работ в помещениях с невысокой влажностью, рекомендована его гидроизоляция при применении в других условиях.

Ключевые слова: древесная зола, полимерные отходы, утилизация отходов, полимерный композиционный материал, теплоизоляционный материал, растворение полимеров, метиленхлорид.

Применение отходов для получения вторичных сырьевых и энергетических ресурсов позволяет комплексно решать такие значимые для современного общества проблемы, как загрязнение окружающей среды отходами и ограниченность первичных ресурсов, что способствует рациональному природопользованию. Эти проблемы становятся всё более актуальными в условиях роста численности населения, повышения цен на природные ресурсы, увеличения объемов производства и потребления, которые, в свою очередь, являются причиной роста потребности в сырье, умножения количества образующихся отходов и усиливающейся антропогенной нагрузки на окружающую среду.

В процессах утилизации отходов наиболее перспективными задачами являются переработка крупнотоннажных и маловостребованных отходов, комплексное использование разнородных отходов, применение малостадийных процессов с низкими затратами, введение отходов в роли функциональных добавок для получения продукции высокого качества, возможность получения востребованной продукции [1—3].

В наибольшей степени все эти задачи находят решение при использовании отходов в производстве материалов и изделий строительного назначения.

С одной стороны, это связано с высокими объемами строительства и ремонта зданий и сооружений, а, с другой стороны, производство строительных материалов и изделий отличается сравнительной простотой технологии, большим ассортиментом продукции и позволяет в больших объемах использовать как возвратные отходы собственного производства, так и отходы из других источников. Еще одним преимуществом данного направления утилизации отходов является возможность получения качественной продукции полностью из отходов без использования первичных ресурсов, в том числе получение композиционных материалов, позволяющих сочетать в одном материале преимущества различных наполнителей и связующих [4—6].

Для эффективного применения отходов в качестве сырья и функциональных добавок при производстве строительных материалов и изделий необходимо проведение исследований по их влиянию на структуру и свойства получаемой продукции, определение оптимальных технологических параметров и составов сырьевых смесей при соблюдении нормативных требований по качеству и эксплуатационным характеристикам [7—9].

Автором данной работы ранее была изучена возможность получения композиционного материала теплоизоляционного назначения при использовании отходов изделий из пенополистирола и золы от сжигания древесных отходов. Полученный материал соответствовал требованиям, предъявляемым к полутвердым и мягким древесноволокнистым плитам, поэтому может являться их аналогом [10]. Для более полной оценки возможности применения данных от-

Пикалов Евгений Сергеевич, доцент кафедры "Химические технологии".

E-mail: evgeniy-pikalov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2022 г.

© Пикалов Е. С., 2023

ходов и получаемого на их основе материала требуются дополнительные исследования по формированию структуры и свойств материала при разных соотношениях наполнителя и связующего.

Цель данной работы — исследование влияния соотношения древесной золы и полимерных отходов на физико-механические характеристики и структуру получаемого на их основе теплоизоляционного композиционного материала.

Сырьевые материалы и методы исследования

Первым компонентом сырьевой смеси являлась зола от сжигания древесных отходов в процессах лесозаготовки, лесопиления и деревообработки, от очистной, санитарной и других видов рубки, а также от сжигания отходов потребления древесных материалов и изделий из них. Для получения наполнителя золу предварительно измельчали до фракции с размером частиц не более 0,63 мм, затем фракции древесной золы из разных источников перемешивали для усреднения состава и высушивали до постоянной массы при температуре 110 °С.

В качестве второго компонента сырьевой смеси применяли отработанные элементы упаковки для бытовой техники, оборудования и т. п. из пенополистирола, отобранные из общей массы отходов потребления. Полимерные отходы перед использованием измельчали до размера частиц не более 6 см, затем, как и в случае с золой, фракции из разных источников перемешивали для усреднения состава и высушивали до постоянной массы.

Для перемешивания с наполнителем отходы пенополистирола растворяли в метилена хлористом техническом первого сорта по ГОСТ 9968-86 с содержанием основного вещества не менее 98,8 масс. %. Растворитель вводили в состав сырьевой смеси сверх 100 масс. % при соотношении полимер : растворитель равном 1 : 2 [10]. В случае промышленного применения данной технологии для снижения расхода растворителя необходимо предусматривать герметизацию оборудования и конденсацию паров растворителя для повторного использования [6].

Для получения образцов исследуемого материала предварительно подготовленные отходы пенополистирола растворяли в метилхлориде до получения однородного раствора связующего, который затем перемешивали до однородной сырьевой массы с предварительно подготовленной древесной золой в количестве 55—85 масс. % [10]. Из данной сырьевой смеси одноступенчатым холодным прессованием при давлении 8,2 МПа, которое обеспечивает оптимальное уплотнение смеси с раствором полистирола [2], формовали образцы. Для ускорения удаления растворителя образцы в течение 45 мин подвергали термообработке при температуре 45—50 °С, которая превышает температуру кипения метилхлорида, равную 39,6 °С, но исключает вероятность термодеструкции полистирола, которая начинается при температурах около 200 °С [7]. Для определения свойств образцов на основе каждого из исследуемых составов сырьевой смеси изготавливали серии по пять образцов с последующим определением средних арифметических значений исследуемых показателей.

У серий образцов по стандартным для строительных материалов методикам определяли пористость (P , %), плотность (ρ , кг/м³), теплопроводность (λ , Вт/(м·°С)), водопоглощение (B , %), морозостойкость (M , циклы), разбухание по толщине за 48 ч (t_w , %), коэффициент водостойкости (K_w), прочность на сжатие и изгиб (σ , МПа).

Результаты экспериментов и их обсуждение

Свойства материала определяются его составом, структурой и технологическими параметрами. Оптимальные для композиционных материалов, подобных исследуемому, параметры были представлены в [2, 10], а влияние состава и структуры исследуем в данной работе. Структура материала во многом характеризуется размером пор и долей открытых пор от общей пористости. В результате эксперимента установлено, что повышение количества древесной золы в составе материала приводит к повышению общей и открытой пористости при снижении закрытой пористости (рис. 1).

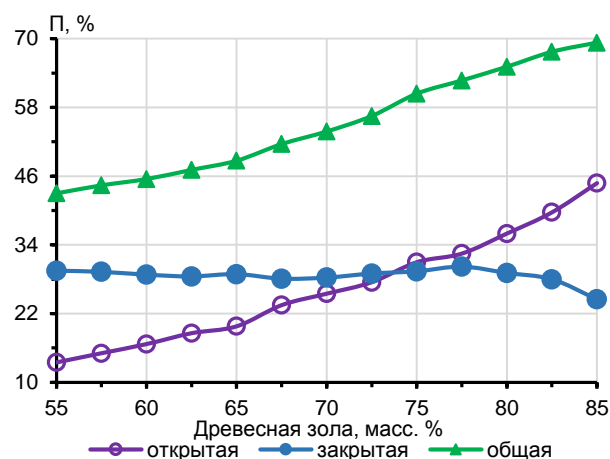


Рис. 1. Зависимость пористости исследуемого материала от соотношения наполнителя и связующего

С одной стороны, такой характер зависимости связан с высокой микропористостью частиц древесной золы и их неровной поверхностью, которая не идеально смачивается раствором связующего и приводит к формированию пор на границе раздела фаз наполнитель—связующее. С другой стороны, при увеличении количества наполнителя в материале снижается количество связующего, которое способно заполнять часть крупных пор и пустот, а также перекрывать часть открытых пор, превращая их в закрытые поры. Кроме того, связующее при объединении частиц древесной золы в единый каркас покрывает часть их поверхности слоем полимера, переводя микропоры частиц, сообщающиеся с поверхностью, в закрытые микропоры. Из полученных данных (рис. 1) видно, что при содержании древесной золы более 72,5 масс. % количество открытых пор начинает превышать количество закрытых пор, что является признаком недостатка связующего в объеме материала.

В свою очередь характер изменения пористой структуры от соотношения количеств наполнителя и

связующего проявляется в зависимостях других физико-механических свойств материала.

Рост пористости с увеличением количества древесной золы приводит к снижению плотности и теплопроводности, что важно для теплоизоляционного материала (рис. 2).

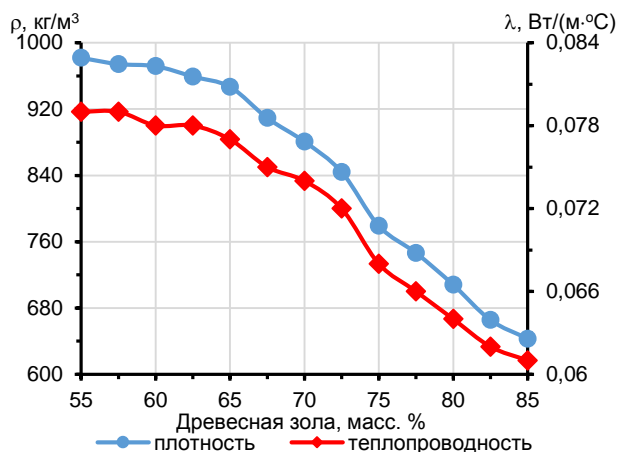


Рис. 2. Зависимость плотности и теплопроводности исследуемого материала от соотношения наполнителя и связующего

Из зависимостей, показанных на рис. 2 также видно, что при содержании золы более 65 масс. % происходит более интенсивное снижение данных свойств, которое становится еще более существенным при содержании золы более 72,5 масс. %. Это связано с более интенсивным ростом пористости при данных количествах наполнителя (см. рис. 1).

Важность соотношения между открытыми и закрытыми порами в материале проявляется во влиянии характера пор на водопоглощение, которое повышается с увеличением количества древесной золы в составе материала (рис. 3).

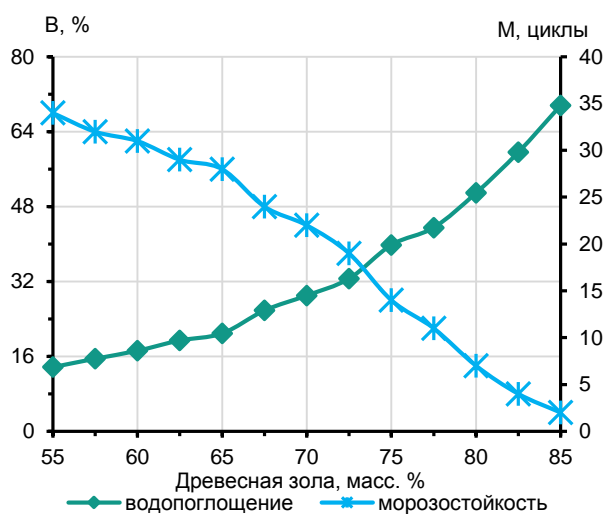


Рис. 3. Зависимость водопоглощения и морозостойкости исследуемого материала от соотношения наполнителя и связующего

Рост водопоглощения объясняется двумя причинами. В первую очередь, как было установлено, по-

вышение количества наполнителя увеличивает количество открытых пор, в которые проникает вода, и снижает количество закрытых пор, в которые вода проникнуть не может. В то же время немаловажным является тот факт, что при снижении количества связующего уменьшается толщина его слоев. В результате не только повышаются общая и открытая пористости, но и увеличивается размер пор, что облегчает проникновение воды в объем образца. Кроме того, из-за уменьшения площади покрытия частиц золы слоем полимера при уменьшении доли полистирола в составе материала повышается площадь поверхности частиц наполнителя, свободная для контакта с влагой. В результате микропоры древесной золы всё более активно участвуют в процессе водопоглощения.

Также стоит отметить, что высокое водопоглощение существенно ограничивает возможности использования материала для теплоизоляции. Это связано с тем, что теплопроводность воды (0,603 Вт/м·°C) значительно превосходит теплопроводность воздуха (0,0259 Вт/м·°C), поэтому, когда вода заполняет поры и вытесняет из них воздух, происходит резкое снижение теплоизоляционных характеристик. При этом для исследуемого материала теплопроводность воды существенно превосходит теплопроводность как наполнителя (около 0,15 Вт/м·°C для древесной золы), так и связующего (около 0,082 Вт/м·°C для полистирола), а значит высокое водопоглощение будет особенно негативно сказываться на его теплотехнических показателях.

Кроме того, водопоглощение существенно влияет на морозостойкость. Это объясняется тем, что при переходе к отрицательным температурам вода, находящаяся в порах материала, превращается в лед и создает внутренние напряжения, которые в конечном счете приводят к разрушению материала. Следовательно, чем больше воды проникает в материал в результате водопоглощения, тем меньше циклов замораживания—оттаивания он сможет выдержать.

Повышение водопоглощения при увеличении количества древесной золы также повышает разбухание по толщине и снижает водостойкость материала (рис. 4).

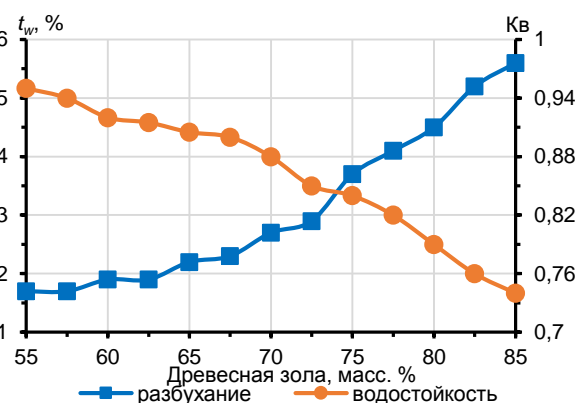


Рис. 4. Зависимость разбухания по толщине и водостойкости исследуемого материала от соотношения наполнителя и связующего

Кроме водопоглощения на рассматриваемые свойства влияет снижение площади покрытия частиц древесной золы слоем полимера, защищающим их от воздействия влаги, а также уменьшение прочности связи между частицами наполнителя при уменьшении толщины соединяющих их слоев связующего.

Уменьшение прочностных характеристик материала с увеличением доли наполнителя в объеме материала (рис. 5) связано с тремя причинами.

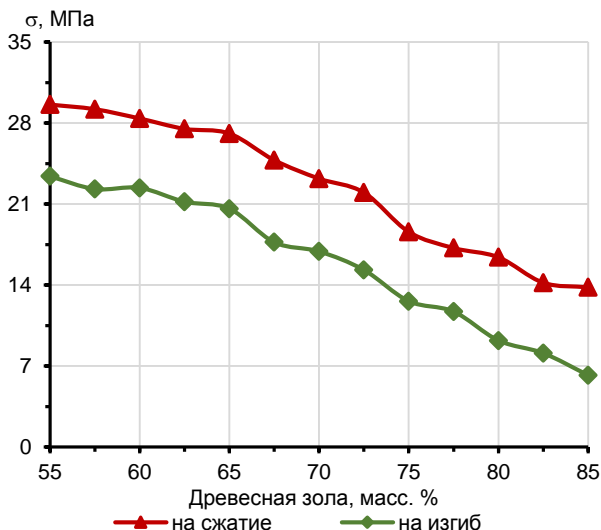


Рис. 5. Зависимость прочности исследуемого материала от соотношения наполнителя и связующего

Во-первых, чем меньше доля связующего в объеме материала, тем меньше площадь контакта между частицами наполнителя и связующим, что снижает прочность связи между ними. Во-вторых, при снижении доли связующего и уменьшении толщины его слоев в объеме материала происходит падение прочности перемычек из полимерного связующего между частицами наполнителя. В-третьих, нужно учесть, что поры являются концентраторами напряжений [11, 12] и способствуют разрушению материала при приложении нагрузки, поэтому происходящий с увеличением количества древесной золы рост пористости также снижает прочность материала.

Таким образом, из результатов данного исследования следует, что выбранное ранее количество древесной золы, равное 72,5 масс. % и позволяющее получать материал, соответствующий нормативным требованиям ГОСТ 4598-2018 для полутвердых и мягких волокнистых плит, соответствует пределу, выше которого в материале наблюдается недостаток связующего дополнительно снижает плотность и теплопроводность, но в то же время негативно сказывается на других физико-механических показателях, ограничивая возможность применения материала для строительной теплоизоляции. Показатели водопоглощения, морозостойкости и водостойкости материала при выбранном содержании наполнителя равны 32,6 %, 19 циклов и 0,85 соответственно. В связи с этим предпочтительней использовать исследуемый материал для внутренних работ в помещениях с невысокой влажностью или обеспечивать ему хорошую гидроизоляцию.

Заключение

В результате проведенных исследований было обосновано получение теплоизоляционного композиционного материала на основе древесной золы и полимерных отходов со степенью наполнения 72,5 масс. %. Установлено, что данное значение соответствует пределу, выше которого наблюдается недостаток связующего, приводящий к резкому повышению водопоглощения, снижению прочности, водостойкости и морозостойкости материала.

Выявлено, что влияние древесной золы на свойства исследуемого материала во многом определяется его влиянием на формирование пористой структуры. Повышение количества наполнителя повышает общую и открытую пористость, снижает закрытую пористость, а также повышает микропористость за счет структуры частиц древесной золы, характера их поверхности и неидеальной смачиваемости частиц наполнителя связующим.

Зависимость пористости от количества древесной золы по отношению к количеству вторичного полимерного связующего определяет зависимости для других физико-механических свойств материала и позволяет более точно установить не только эффективное количество наполнителя, но и более полно оценить возможность применения исследуемого материала. В частности, по значениям водопоглощения, морозостойкости и водостойкости материала при выбранном содержании наполнителя установлено, что исследуемый материал рекомендуется для внутренней теплоизоляции в помещениях с невысокой влажностью. В иных случаях его применение возможно только при наличии хорошей гидроизоляции.

Практическое применение разработанного материала позволит совместно утилизировать маловостребованные в промышленности отходы от сжигания древесины и отходы потребления изделий из пенополистирола, расширит сырьевую базу и ассортимент теплоизоляционных композиционных строительных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самуков А. Д. Комплексная переработка отходов щепочных производств // Экология и промышленность России. 2019. № 7. С. 15—19.
2. Колосова А. С., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Теплоизоляционный композиционный материал на основе древесных и полимерных отходов // Экология и промышленность России. 2020. № 2. С. 28—33.
3. Шабаров А. Н., Николаева Н. В. Комплексное использование отходов переработки теплоэлектростанций // Записки Горного института. 2016. Т. 220. С. 607—610.
4. Шевляков А. А., Панферов В. И., Шевляков С. А., Маркин А. П. Производство композиционных материалов с использованием вторичных отходов в качестве исходного сырья // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2011. № 5. С. 79—84.
5. Бурдонов А. Е., Барахтенко В. В., Зелинская Е. В., Сутурин Е. О., Бурдонова А. В., Головнина А. В. Физико-механические характеристики композиционных материалов на основе отходов производства с различными рецептурами // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 9. С. 14—22.
6. Виткалова И. А., Торлова А. С., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Разработка способа получения облицовочного композиционного материала на основе полимерных и стекольных отходов // Экология промышленного производства. 2018. № 3. С. 2—6.

7. Торлова А. С., Виткалова И. А., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Утилизация керамических и полимерных отходов в производстве облицовочных композиционных материалов // Экология и промышленность России. 2019. № 7. С. 36—41.
8. Манакова Н. К. Вспененные материалы на основе техногенных отходов // Вестник евразийской науки. 2020. № 4. С. 10.
9. Арискина Р. А., Михайлова Е. В., Суворкина А. В., Салахов А. М. Опыт применения техногенных отходов в производстве керамических материалов (Обзор за 2000—2017 гг.) // Вестник Технологического университета. 2017. № 15. С. 37—41.

10. Пикалов Е. С. Теплоизоляционный строительный материал на основе древесной золы и полимерных отходов // Экология промышленного производства. 2022. № 4. С. 2—7.
11. Лахно А. В., Новиков Е. В. Анализ влияния пористости на свойства композиционных материалов // Международный технико-экономический журнал. 2020. № 1. С. 73—80.
12. Гришин А. Н., Казанская Л. И., Абдуллин И. А. Влияние некоторых факторов на прочность при сжатии высоконаполненных полимеркомпозитных материалов // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 7. С. 400—406.

Impact of wood ash and polymer waste on the properties of thermal insulation composite material

E. S. PIKALOV

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

This article presents the results of studies of the dependence of the basic physical and mechanical properties of a heat-insulating composite material on the ratio of wood ash and a secondary polymer binder in its composition. The material under study is obtained by dissolving styrofoam waste in methylene chloride, cold mixing the solution with wood ash, cold pressing and subsequent heat treatment to remove the solvent. The influence of the ratio of filler and binder on the formation of a porous structure in the material and the dependence of other properties on both the composition of the material and the nature of porosity has been established. The amount of filler leading to a lack of binder was revealed. The use of the obtained material for interior work in rooms with low humidity is justified, its waterproofing is recommended when used in other conditions.

Keywords: wood ash, polymer waste, recycling of wastes, polymer composite material, thermal insulation material, polymer dissolution, methylene chloride.

Bibliography — 12 references.

Received December 16, 2022



Водоподготовка и водоочистка

УДК 628.27

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_1_24

EDN: NKCBIW

Техническое обслуживание и ремонт трубопроводов водоснабжения и водоотведения с использованием современной техники и на основе прогнозных показателей

А. А. ЕРХОВ, канд. техн. наук

Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе,
Москва, Россия

Е. А. КОРОЛЁВА, канд. техн. наук

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

Представлены методы обследования и технологические приёмы ведения строительных работ в подземных коммуникациях систем водоснабжения и водоотведения (ВиВ). Приведены обобщённые технические характеристики специализированных устройств. Дана оценка вероятности прогноза разрушения, и на основе натурных наблюдений предложена формула расчёта размеров разрушений.

Ключевые слова: материал трубы, разрушение трубопровода, внутренняя поверхность, толщина стенки, телеинспекционный робот, системы контроля, ультразвуковые измерения, ремонтно-строительные работы, прогноз состояния, вероятность утечек, размер дефекта.

Проблема технического обслуживания трубопроводов водопроводных и канализационных сетей остаётся актуальной и растёт в продолжении периода эксплуатации, поскольку основная причина аварий — изношенность труб (более 60 % трубопроводов РФ исчерпали нормативный срок службы, из них более 150 тыс. км требуют замены при протяженности водопроводных сетей, составляющих 434 тыс. км, и водоотводящих — 105,2). Под действием внешних факторов металлические трубопроводы корродируют по длине или разрушаются из-за деформаций в местах дефектов сварных швов стыков, пластиковые рассыпаются из-за некондиционного материала или некачественного монтажа (клейки/сварки); износ и

состояние оценивают основанными на известных физических явлениях способами, но главным является наблюдение, как научный метод, и простейшим — визуальный контроль.

Эксплуатационные мероприятия по распорядку работ являются рутинными, и средством снижения психической нагрузки на наблюдателя является частичная роботизация, кроме того, за счёт новых технических средств она расширяет функциональные возможности по сбору данных. Мобильные роботы полностью устраняют риск гибели рабочих и специалистов, а также снижают затраты на организационные мероприятия по охране труда. Робототехника предоставляет значительный ассортимент продукции для различных отраслей, и в сфере водоснабжения/водоотведения можно таким образом проводить реновацию ветхих и санацию рабочих магистралей, проводить приёмку новых и контролировать состояние действующих трубопроводов, составлять карты подземных коммуникаций, вести экологический мониторинг сетей и осуществлять ремонт. Телеинспекция (теледиагностика, видеодиагностика) более узка в своих возможностях и помимо приёмки проводится:

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

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

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2022 г.

© Ерхов А. А., Королёва Е. А., 2023

перед бестраншейной реновацией — капитальном ремонте с заменой или восстановлением трубы; для обнаружения участков с разрушенным верхним сводом или намечающимися провалами, расстыковки труб, мест формирования засоров и оценки качества прочистки; поиска предметов (например, люков смотровых колодцев, бордюрного камня, дорожной плитки); определения местоположения засыпанных или заасфальтированных смотровых колодцев; установления мест горизонтальных прогибов с измерением контруклонов; выявления участков с малым износом труб для исключения их из проекта ремонтных работ. При этом возможны и целесообразны сбор статистики, анализ информации для прогноза и составление кадастра видеоряда отснятых изображений для базы данных геоинформационных систем.

В связи с бессистемным разнообразием этого рода наблюдений уместно выделить главные классификационные признаки (организационно-технические):

- **предупреждающие** — направлены на изучение технического состояния для планового ремонта и других целей, (большинство телеинспекционных работ приходится на этот тип осмотра);
 - **оперативные** — проводят при авариях для определения объема ремонтных работ и прочистки, и проверки качества ремонта;
 - **целевые** — для проверки результатов расчёта эксплуатационно-технического состояния при выявлении проблемных участков;
 - **сопровождающие** позволяют контролировать ход работ и техническое состояние оборудования при прокладке труб по бестраншейной технологии.
- Мобильный робот для диагностики и ремонта труб является мехатронной системой, в которой синергически связаны механическая, электротехническая, электронная и компьютерная реализация движений с перспективой интеллектуализации технологических операций и управления, что может привести к полной автономности и повышению скорости и качества операций. Наиболее целесообразны следующие автономные реализации:
- расчёт траектории и скорости движения при вхождении в поворот на основе обработанных сигналов датчиков крена-дифферента и приводных модулей "мотор—колесо";

- обнаружение объектов системами локационных датчиков и технического зрения, и распознавание образов;

- ультразвуковые измерения стенки трубы;
- управление фрезерной головкой на основе данных о действующих на неё силах и моменте инерции.

Кроме визуальной реализации, роботы уже сейчас по командам оператора с пульта управления проводят измерительный контроль, а также способны делать простые операции согласно выбранной технологии ремонта и строительства; ежегодно 4 % трубопроводов требуют замены/восстановления путём капитального ремонта, однако успевают обновлять всего 2, из-за чего число аварий на трубопроводах ежегодно увеличивается в 1,7—2 раза (37,3 % техногенных аварий происходит по причинам ветхости сетей и 34,8 % — нарушение правил технической эксплуатации), при этом восстановленный трубопровод должен служить 50 лет, то есть к нему отношение как к новому, поэтому качество ремонта должно быть безупречным, чего без робота при промышленных темпах добиться невозможно, тем более, что средняя стоимость ликвидации одной аварии с раскопкой составляет около 100 тыс. руб.

Материалы и методы

Телевизионная диагностика технического состояния инженерных сетей ВнВ

Телеинспекция является разновидностью телевидения, как способа электросвязи, специализированного на удалённом видеоосвидетельствовании технических систем с получением цветной картинки высокой чёткости и возможностью её цифровой записи, — все возможности современного телевидения, в том числе по цифровой обработке изображения, доступны для реализации при техническом обслуживании трубопроводов. При этом возможна одновременная или последовательная визуализация данных измерений параметров различных объектов с выводом результата на тот же дисплей устройства управления (рис. 1). Главные ограничения — это условия передачи сигнала.

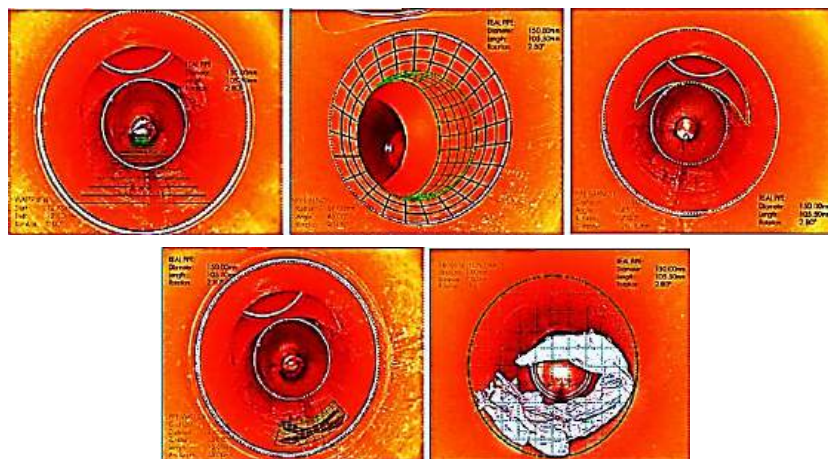


Рис. 1. Примеры измерений

Робототехнические самодвижущиеся системы

Обследование трубопроводов, в частности канализационных сетей, осуществляют краулерами — телеинспекционными роботами (рис. 2). С их помощью проводят визуальный осмотр стенок труб относительно большого диаметра, при этом герметичный корпус, заполненный азотом для устранения конденсации влаги и запотевания стекол видеокамеры, позволяет работать во влажной агрессивной среде, что является важнейшим в обеспечении надёжности; манометрическое давление сухого азота контролируется датчиками.

Для преодоления препятствий в виде песка и ила, крупных камней и мусора привод колёс имеет достаточную мощность, а сами колёса — пневматические шины большого диаметра с высоким рисунком протектора и грунтозацепами; для улучшения манёвренности в тесном пространстве труб тележку оснащают системой бортового поворота, подобно гусеничным

машинам, что позволяет вписываться в крутые повороты трассы и объезжать препятствия, при этом от опрокидывания имеется контроль наклона. Для увеличения проходимости разработаны модели и на гусеничном ходу, а для обследования частично заполненных водой коллекторов возможно применение плавающего модуля с инспекционным оборудованием, кроме того, при наличии свободных пространств возможно применение беспилотных летательных аппаратов (рис. 3).

Конструктивные особенности оборудования расширяют возможности использования техники.

- Размещение камеры или объектива на пантографе улучшает изображение видеосъёмки, чему ещё в большей мере способствует монтаж дополнительного оборудования — нескольких видеокамер, дополнительной подсветки (рис. 4). Видеокамеры имеют ручной и автофокус, и автоматический поворот — камера ориентирована датчиками.

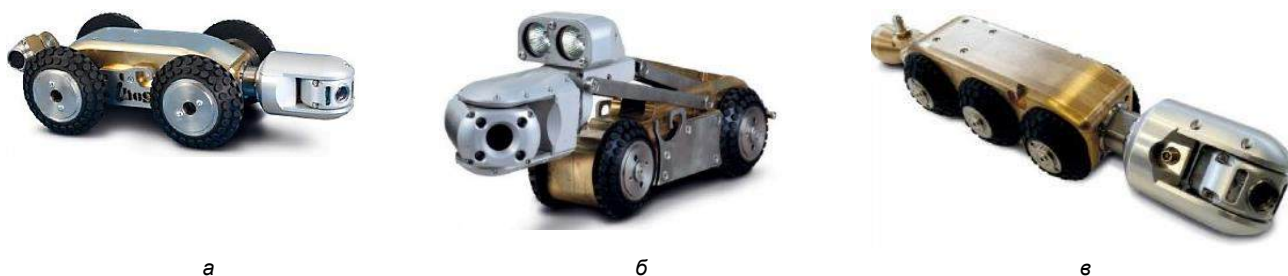


Рис. 2. Общий вид и главные особенности роботизированных систем телеинспекции:

а — тележка с двумя двигателями для труб \varnothing 100—300 мм (оснащена функцией автоматического выравнивания при движении и повороте);
 б — самоходная тележка и автоматическая катушка для труб \varnothing 150—800 мм (оснащён съёмной видеокамерой с системой поворота и вращения); в — колёсная формула 6×6 с приводом 2×20 W для труб \varnothing 100—300 мм (корпус латунный весом 10 кг; имеет дополнительный комплект колёс, датчик давления до 1 бар, крюк для спуска)



Рис. 3. Гусеничный движитель, плавающий модуль и дрон квадрокоптер



Рис. 4. Камера, позволяющая измерять ширину и состояние стыкового зазора (в % от длины окружности) нажатием клавиши, применяется в трубах радиального профиля \varnothing 200-1400 мм, а также с овальными и другими специальными профилями

- Применение сменного шасси позволяет изменять клиренс и проходной диаметр, но и без этого краулеры являются высокоманевренными, устойчивыми и проходимыми, что во многом обеспечивается системой автоматической самонивелировки, работа которой обеспечивается сенсорами пути, инклинометрами крена, дифферента (тангажа) и рыскания, необходимыми не только для управления движением, но и для трассировки трубопровода, определения координат места обнаружения, получения данных по профилю трубы, уклону (трёхосевой МЭМС-инклинометр позволяет определять положение робота в пространстве с погрешностью $\pm 0,1^\circ$, и на основе ориентации управлять движением и определять трассу трубопровода).

- Использование магнитных колёс-редукторов силой сцепления 600 Н при движении в трубе из ферромагнетика позволяет перемещаться под любым углом и зависать над поверхностью под углом 180° .

В комплект оборудования помимо самого краулера, состоящего из самоходной тележки с оборудованием, входит кейс с пультом управления и кабельный барабан с ручным управлением или электроприводом для обеспечения связи и управления, при этом кабель для прочности армирован, поскольку погружение и извлечение робота производят вручную за защитную изоляционную оболочку; длина кабеля до 200—300 м. Система может быть как мобильной, так и смонтированной на транспортном средстве (микроавтобусе) на подобию лаборатории (рис. 5).



Рис. 5. Транспортная реализация системы управления

Компьютерное программное обеспечение позволяет графически отображать на экране монитора (рис. 6) результаты обработки данных в виде индикаторов, шкал и диаграмм различных параметров — результатов измерений, сопровождая текстовыми/аудио комментариями; пользователь стоит перед широким выбором программного обеспечения, а технически АРМ может быть доукомплектован фотопринтером, DigiPress-системой и т. д.

Возможность разработки сложных технических компьютеризированных систем типа телеинспекционных роботов определяет уровень технологического развития экономики, и, например, в РФ производство краулеров было освоено с появлением идеологии дистанционного исследования. Современные образцы показаны на рис. 7.



Рис. 6. Пример интерфейса программы телеинспекции для визуализации, сбора, обработки и архивации результатов, — предлагает различные решения для анализа и интеграции в ГИС-системы

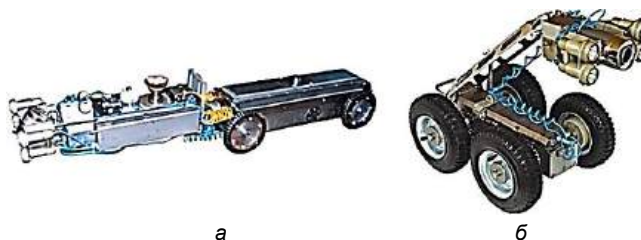


Рис. 7. Роботы:

а — диагностический;

б — осмотровый вездеход для труб $\varnothing 150$ —1200 мм

На рис. 7, б представлен осмотровый вездеход для труб $\varnothing 150$ —1200 мм. Он оснащён: поворотной камерой с устройством наведения, построенным на механизмах качания, ротации и подъёма; дистанционным приводом фокусировки; электромеханическим стеклоочистителем; блоками основного и дополнительного освещения; набором сменных колёс — мехатронных модулей типа "мотор—колёсо" на базе двигателей постоянного тока; управляется с пульта на базе компьютера в промышленном исполнении.

Годовой экономический эффект в два раза превышает стоимость роботов. Эта техника не является сложной и труднопроизводимой.

Проталкиваемые телеинспекционные системы

Роботизированные проталкиваемые системы, также разрабатываемые с учётом высокой функциональности и надёжности, предназначены для трубопроводов длиной до 100 м и $\varnothing 100$ —3000 мм (и более). Поворотно-наклонная камера управляется с многофункционального пульта, но проталкивается вручную оператором установки (усилия не столь ощутимы), толкаемо-толкающий кабель-стеклопруток достаточно гибок для прохода поворотов трассы трубы; помимо данной особенности (движения зонда силой рук) назначение и получение информации то же, что и у самодвижущихся систем — это оперативное выявление разрушений, расстыковок, засоров, получение фото/видео поверхности трубы в идеальном качестве и их запись, возможность получения разных данных в формате, доступ-

ном для дальнейшего анализа: расстояний, времени, наложенных текстовых и аудиокментариев. Главным же отличием и достоинством является возможность обследования труб малого диаметра, не доступных для диагностики краулерами.

Системы имеют широкие возможности и продуманные практичные детали, определяющие удобство работы, и могут быть использованы как в мобильном варианте, так и в автомобильном исполнении (рис. 8).



Рис. 8. Различные модели проталкиваемых систем

Системы телеинспекции колодцев и шахт

Системы телеинспекции применяют для быстрого обследования одним оператором смотровых колодцев систем водоотведения (рис. 9), вертикальных трубопроводов, резервуаров различного назначения, шахт (вентиляционных, лифтовых) на глубину до 100 м. Системы представляют собой комплекс оборудования: видеокамера высокого разрешения с зумом (увеличение: 36:1 — оптическое, 12:1 — цифровое) и галогенным освещением, пульт управления и опционально возможно подключение лазерных измерительных приборов: дальномеров, нивелиров, кросслайнеров или мультипризменных построителей, статических построителей осей, ротационных или многопризменных построителей.



Рис. 9. Системы внутреннего осмотра конструкций линейно вертикальных систем и сооружений

Системы измерения толщины и состояния стенки трубопроводов

Методов дефектоскопии, построенных на разных физических принципах, много, но по простоте, надёжности, стоимости предпочтителен ультразвук. Ультразвуковая дефектоскопия является обязательной для контроля качества ответственных изделий: деталей атомных реакторов, авиационных двигателей, критически важных узлов транспортных машин и коммуникаций, однако их применяют и службы эксплуатации инженерных систем ВиВ для оценки микротрещиноватости труб и сварных соединений, а также толщин — при помощи роботов, и не только.

Взяв шире, помимо акустического (в дополнение к рассматриваемому имеющему эхолокационное применение), на краулерах реализован радиочастотный принцип сканирования, лазерный, электрический, электромагнитный методы, гамма—гамма-регистрация на Cesium-137, инфракрасная термография (IRT) с вычислением тепловых градиентов по цветам, микропрогиб (MD) за счёт малого локального давления на стенке. Материал труб может быть различным — все методы позволяют изучить их структурную плотность для поиска пустот и дефектов.

Внутритрувные системы контроля

Данные роботы представляют собой колесные самоходные машины, способные работать на удалении до 300 м от точки входа, и для визуального контроля оснащенные цветной поворотной видеокамерой, — по сути это те же телеинспекционные системы, оборудованные контактными ультразвуковыми датчиками измерения состояния и толщины стенки трубы с собственным приводом линейного и ротационного перемещения по окружности и системой фиксации, обеспечивающей надёжный контакт с поверхностью; толщина характеризует износ, нали-

чие каверн на наружной и внутренней стенках и другие изменения. Система предназначена для измерения стальных, чугунных и иных трубопроводов $\varnothing 200\text{--}600\text{ мм}$.

Принцип работы: движущийся робот по команде оператора останавливается, производит выдвижение датчика-толщинометра до контакта со стенкой и делает измерение; при наличии отложений в виде высолов, дрейссены, накипи, ржавчины и прочего робот проводит зачистку фрезерной головкой и предварительно смачивает поверхность из специального устройства, если ультразвуковой датчик имеет сухой контакт, не требующий смачивания, иначе в ходе измерения возникают погрешности, компенсируемые решётчатой архитектурой сенсора из 32 элементов.

Система может дооснащаться любыми датчиками контроля, например, наличия метана или магнитного поля.

Роботы и приборы наружного контроля за состоянием труб

Наружное наблюдение расширяет технологические возможности роботизированных систем, принципиально их отличая и определяя достоинства:

- WiFi-связь — управление на расстоянии многих километров;

- LiFe и LiPoI батареи ёмкостью 200 Вт·ч — 8 часов автономной работы, что существенно для больших расстояний.

Для локальных единичных измерений удобны простые переносные ультразвуковые толщинометры, применяют приборы с диапазоном измерений 1—50 мм и точностью $\pm 0,001$, а низкая стоимость приборов способствовала выпуску широкого модельного ряда (рис. 10).

Ультразвуковая толщинометрия наиболее эффективный способ неразрушающего контроля, то есть недорогой и точный, также абсолютно безопасен.

Ультразвуковые дефектоскопы регистрируют в конструкционных и технологических материалах области с нарушенной сплошностью из-за неоднородности структуры или изменения химического состава, — эти приборы форматом посерьёзней (рис. 11).

Технологические операции ремонтных и строительных работ

Капитальный ремонт в отношении трубопроводов под влиянием западных технологий, подкреплённых материалами и оборудованием, называют *реновацией*, но в отечественной практике все виды ремонта чётко делят на *косметический* и *капитальный*, в СП 273.1325800.2016 — Водоснабжение и водоотведение [1] появляется понятие "санации" (рис. 12).



Рис. 10. Ультразвуковые толщинометры для измерения стенок труб, цистерн, сосудов, реакторов, парогенераторов, коллекторов, котельных барабанов и различных полуфабрикатов. Измеряют металлические и некоторые неметаллические (керамику, стекло) материалы



Рис. 11. Ультразвуковые дефектоскопы общего назначения



Рис. 12. Методы восстановления (релайнинга) трубопроводов

Важнейшим фактором, определяющим ремонт, является материал труб, но он определяет и характер повреждений: железобетонные — газовая коррозия с обнажением арматуры, сколы и трещины раструбного соединения, разрушение при сдавливании, расхождение раструбных соединений со смещением и инфильтрацией по стыкам, размывание грунта с образованием провала; керамические — трещины (круговые, винтообразные, продольные сквозные и несквозные), сколы и трещины раструбного соединения, разрушение при сдавливании, расхождение раструбных соединений со смещением и инфильтрацией по стыкам, расхождение раструбных соединений со смещением и с прорастанием корней, жировые отложения в шельге, неплотная стыковка раструбных соединений, строительный мусор и грунт в трубопроводе, раструбы навстречу течению (обратная стыковка); асбестоцементных труб — расхождение стыков под муфтами, пролом в шельге, кольцевые трещины; труб из полимерных материалов — незакрученные до конца стыки сегментов труб из полимерных материалов, сдавливание грунта; труб с покрытием из полимерного рукава — продольные и кольцевые складки, вздутие и отслоение полимерного защитного покрытия; чугунных труб — трещины (круговые, винтообразные, продольные сквозные и несквозные), сколы и трещины раструбного соединения, проломы при сдавливании, расхождение раструбных соединений со смещением и с инфильтрацией по стыкам, расхождение раструбных соединений со смещением и с прорастанием корней, жировые отложения в шельге, строительный мусор и грунт в трубопроводе, раструбы навстречу течению, неплотная стыковка раструбных соединений [2].

Косметический ремонт

Желательно перед ремонтом трубопровода провести механическую очистку очистным снарядом посредством компрессорно-насосной станции, нагнета-

ющей в трубу под высоким давлением воду и воздух, которые приводят снаряд в движение, и, двигаясь с высокой скоростью, он обдирает внутреннюю поверхность, на противоположном же конце трубы выходит осадок; результатом является чистый и ровный трубопровод.

Работы позволяют выполнять внутри трубы ряд строительных операций, и для этого комплектуются сменными инструментами для соответствующих рабочих органов — фрезерными и бандажными головками, то есть тем, что выполняет:

- срезку выступающих элементов;
- локальную заделку дефектов;
- зачистку;
- сверление;
- прорезки боковых отводов после санации трубы пластиком;
- установку кольцевого бандаж из ткани со специальной пропиткой.

Методы ремонта внутренней поверхности стенки трубы с помощью других специальных машин основаны на замене значительного слоя материала стенки:

- *цементно-песчаное покрытие* (рис. 13);
- *облицовка полимерными материалами* и различными методами (рис. 14) [3].



Рис. 13. Метод ЦПП

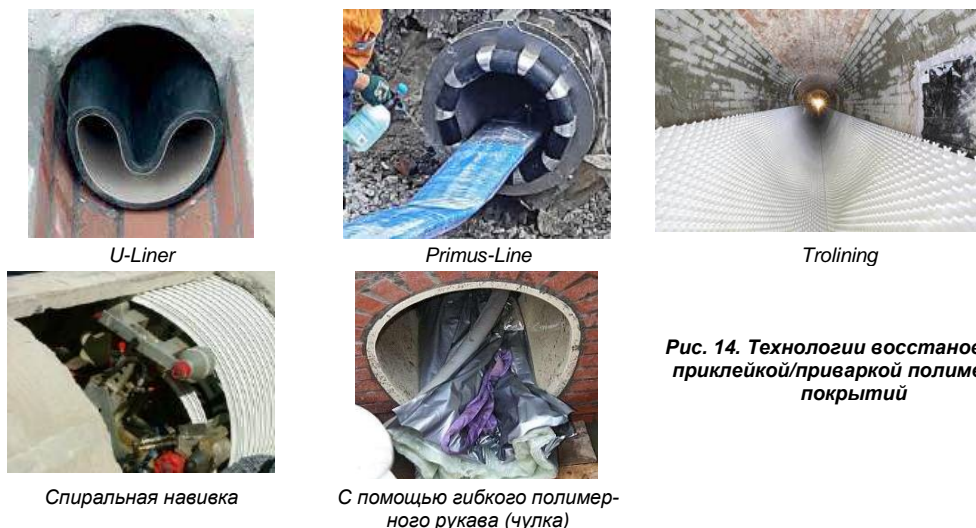


Рис. 14. Технологии восстановления приклеивкой/приваркой полимерных покрытий

Капитальный ремонт

Разрушающие методы — самые простые и экологически безопасные способы обновления трубопроводов, при которых старая труба разрушается с помощью режущего инструмента и выдавливается в окружающий грунт, а в образовавшееся при этом свободное пространство вдвигается новая труба [4]. В зависимости от типа грунта можно обновлять до 200 м/сут. За счёт большего размера разрушающего снаряда можно увеличивать диаметр трубопроводов. Метод подходит для труб от 65 до 800 мм.



Рис. 15. Проходка снарядом

Научно-методические и организационно-технологические основы диагностических мероприятий на трубопроводах

Нарушения в работе некондиционных ветхих сетей проявляются различным образом: падением давления в напорных сетях, подсосом грунтовых вод через коррозионные свищи и разгерметизированные стыки, подтоплением подземной инфраструктуры (в РФ в подтопленном состоянии из-за аварий инженерных коммуникаций находится около 800 тыс. га городских территорий — из 1092 подтопления случаются в 88 % городах, в том числе в Москве, Санкт-

Петербурге, Новосибирске, Омске, Ростове-на-Дону, Томске, Хабаровске, Казани), санитарно-гигиеническими последствиями утечек. Все эти и другие проявления нарушений связаны численно с возрастом и протяжённостью систем и требуют чётких действий, последовательность которых определяется методикой обследования и ремонта.

Возможность прогноза состояния труб

Результатом диагностики и восстановления является повышение экономической эффективности — обеспечение пропускной способности, минимизация утечек и улучшение санитарного качества и состояния. Регламентные работы производят с периодичностью, определяемой нормативами безотносительно к системе — централизованная/распределённая, — техническое освидетельствование при наружном осмотре проводят раз в полгода для труб диаметром от 600 мм для водоснабжения и от 800 мм — водоотведения, при меньших размерах — раз в год; раз в год производят и текущий ремонт, но капитальный ремонт или замену — по мере необходимости. Однако в этих директивно-установленных сроках не отражены и не учитываются факторы, определяющие внешние износ и нагрузку (химический состав грунта и инженерно-геологические условия) и внутренние (химическую реактивность жидкости и заиляющие/неразмывающие скорости), а несмотря на то, что материал труб различен (керамика, бетон, асбестоцемент, пластмасса, чугун и сталь), химические элементы и соединения, и прежде всего SO_4^{2-} , Cl^- , O_2 , H_2O , а также pH, влияют на эксплуатационные свойства всех материалов, хоть и по-разному. Поэтому химические реакции в сочетании с внешними нагрузками в виде проседания/набухания грунта из-за сезонных подвижек, давления грунтовых вод, колёс тяжёлого транспорта и вибраций механизмов мощных машин, блуждающих токов от железнодорожного транспорта, скачков давления внутри трубы и скорость потока являются физической характеристикой для прогнозирования временных изменений состояния трубопровода, то есть функцией прогнозирования является обоснование вероятного состояния сети, как и любого из её участков, на заданную пер-

спективу. Это говорит о безусловности научных методов при определении сроков осмотра и контроля, вопрос лишь в исходных данных.

Количественная оценка вероятности утечек

С учётом причин эксфильтрации/инфильтрации (расхождения стыков, осадки труб с растрескиванием и последующим разрушением, окислительного коррозионного износа, повышенной влажности грунта и даже прорастания корней растений) первое, на что обращают внимание — это направление течения, определяемое разностью давлений, если утечки из трубопроводов в грунт происходят в сухую погоду, то это ведёт к распространению патогенных микроорганизмов в грунтовых водах и подтоплению, если же инфильтрация из грунта в трубопровод происходит в сырую и при высоком уровне грунтовых вод, то инфильтрация постоянна, что увеличивает нагрузку на очистные сооружения, ведёт к переполнению канализации, то есть эксфильтрация приводит к загрязнению грунтовых вод, инфильтрация — к ухудшению гидравлических характеристик трубопроводных систем. Однако, несмотря на значимость проблемы, совершенных методик количественной оценки

эксфильтрации и инфильтрации не существует, а без оценки вероятности отказа невозможно дать прогноз по обследованию, ремонту и восстановлению. Вероятность (матожидание) отказа (безотказной работы сети) — это показатель статистической оценки времени безотказной работы $T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt$, при этом ве-

роятность отказа трудно оценить для отдельных участков труб, но реально для всей сети или водосбора. Предварительным источником информации о качестве труб являются данные видеонаблюдения, однако они дают качественные оценки, а чтоб получить количественные данные требуется формализация путём пространных допущений, обобщений, экстраполяции данных износа, то есть расчётная вероятность отказа требует огромной библиотеки видеозаписей известных проблем, а также данных о механических и химических свойствах грунта, рельефе, водоносном горизонте, что позволяет ранжировать системы по категориям и общим характеристикам, — и помимо указанных закономерностей, модели должны описывать материал и диаметр труб, уклон и расход, глубину и возраст, размер повреждений на отдельных участках трубы и в стыках (рис. 16).

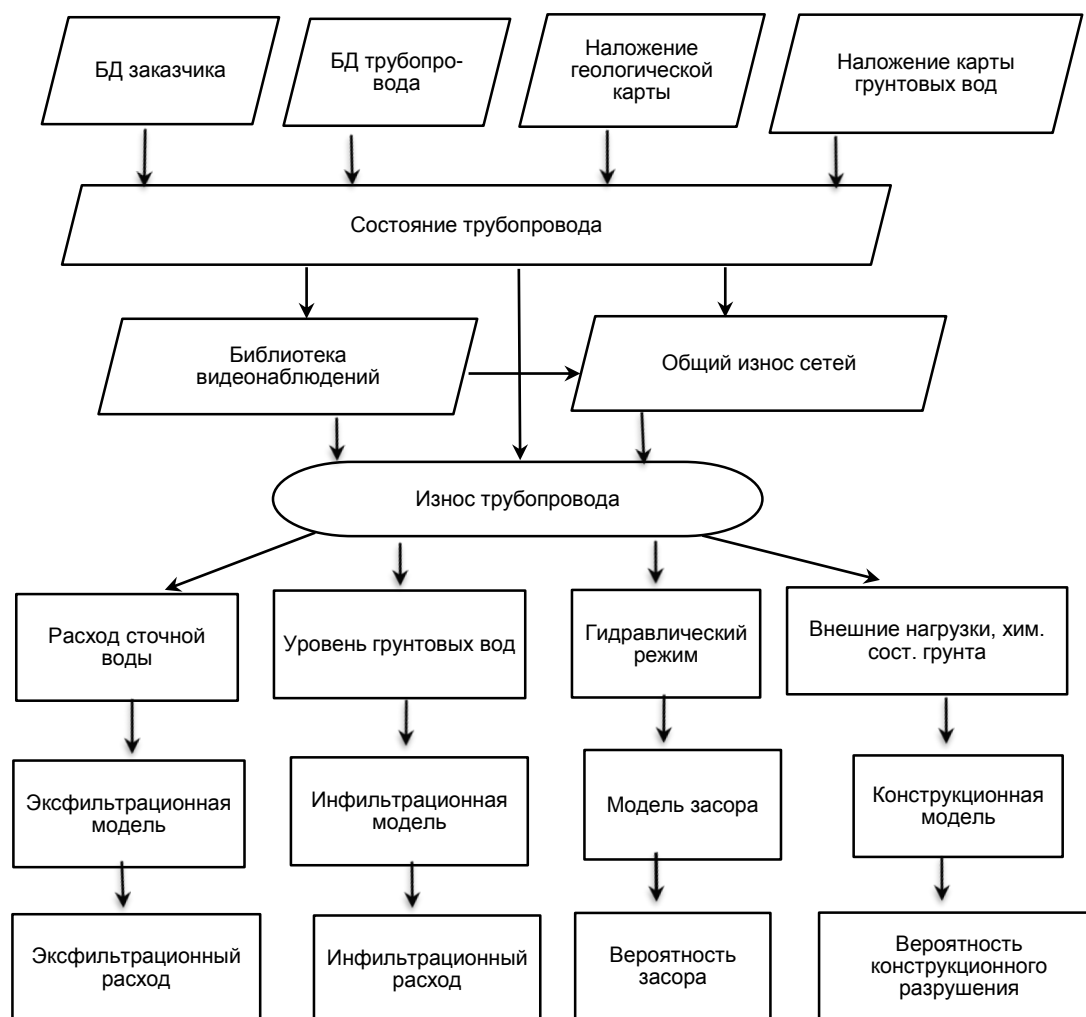


Рис. 16. Блок-схема алгоритма расчёта состояния трубопровода

Расчёт размера конструктивного разрушения

Статистические модели прогноза остаточной прочности вместе с физическими моделями позволяют оценить влияние отдельных факторов на разрушение и дадут принципиальную основу для формулировки механических законов процесса с аналитическими решениями. Например, если случайная по своей природе утечка связана с материалом трубы, полным напором внутри трубы и давлением грунтовых вод, то эксфильтрация через дефекты описывается (Раухом, Штегнером, Воллерценом, Якобсоном) формулой

$$Q = A \Delta H \frac{k_{\phi}}{\Delta L} \text{ (м}^3\text{/с)}, \quad (1)$$

где A — площадь утечки, то есть размер разрушения (м²);

ΔH — перепад высот (напор) трубопровода (м);

ΔL — толщина кольматационного слоя (м), принимаемая, как допущение, 10 мм, поскольку всё же зависит от грунта и типа дефекта;

k_{ϕ} — коэффициент фильтрации кольматационного слоя (м/с), принимаемый 2×10^{-6} м/с для отверстий и трещин, и $1,1 \times 10^{-6}$ — для открытых швов, инфильтрация (по тем же авторам) описывается формулой

$$Q = A \Delta H_{\text{гр}} \frac{k_{\phi}}{0,1} \text{ (м}^3\text{/с)}, \quad (2)$$

где $H_{\text{гр}}$ — гидростатическое давление в грунте,
0,1 — толщина кольматационного слоя, принимаемая 10 см.

Но размер разрушений определяется также возрастом и диаметром труб — чем они больше, тем крупнее повреждение. Для определения размера дефекта керамических труб в песчаном грунте предлагаем, на основе результатов многочисленных наблюдений разных авторов, эмпирическую формулу

$$A = 5,7 D^{0,15} \sqrt{T} \text{ мм}^2\text{/м}, \quad (3)$$

где D — диаметр трубы (мм);

T — время (годы).

Обобщая имеющийся опыт, удастся приблизиться к целостной модели расчёта состояния трубопроводов любого типа и назначения.

Необходимость совершенствования организационных мероприятий

Трубопроводные системы требуют постоянного осмотра и технического обслуживания, и риск аварий возрастает при ошибках в оценке состояния труб. Проблемы могут быть не только структурного характера — разрушение конструкций (нарушение структурной целостности трубы или дефект стенки), но и возникать в результате эксплуатационных недорабо-

ток (засоров, превышения расходов, гидроударов и проч.). Понятие *дефекта* трактуют широко — трещины, внутренняя и внешняя коррозия, прогибы трубы, несоосность и разрывы соединений, как и понятие *эксплуатационного отказа* — приходится классифицировать, но однозначно, последний не вызван и не приводит к нарушению конструктивной целостности трубы. Впрочем, эксплуатационный отказ может быть вызван не только мусором и отложениями в виде минеральных осадков или масляно-жировых наслоений, но и инфильтрацией с переполнением и превышением пропускной способности, проникновением корней, что без разрушения конструкций невероятно, с единственной оговоркой — инфильтрационный приток грунтовых и ливневых вод идёт через люки или штуцера.

Проблемам в обслуживании инженерных коммуникаций ВиВ не видно конца, и можно сослаться на недостаточный опыт эксплуатации трубопроводных систем, однако исследования в области прогнозирования состояния труб никогда не остановятся.

Заключение

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы.

Современность и будущее требуют разработки и внедрения новых методов обследования и технического обслуживания, что не может обойтись без соответствующих уровню запросов научных знаний, а также необходимых компетенций на этапе профессиональной подготовки специалистов.

Роботизация является инновационным направлением развития техники. Роботы играют перспективную роль в любой хозяйственной отрасли, и применение их в строительстве инженерных систем и сооружений, жилищно-коммунальном хозяйстве и промышленном водоснабжении не отстаёт от средних показателей по экономике.

Среди роботизированной техники приоритетными образцами являются автономные системы с элементами искусственного интеллекта, что особенно ярко проявилось в свете взрывного интереса к летательным дронам.

Высокотехнологичные системы измерения и ремонта, построенные на обработке информации по алгоритмам заданных моделей, позволяют дать существенный экономический эффект в условиях системного недофинансирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлинова И. И. Стандартизация и нормирование при строительстве и проектировании систем водоснабжения и водоотведения // Строительство, экономика и управление. 2021. № 2(42). С. 43—47.
2. Ерхов А. А., Глухова Т. А. Технологии восстановления подземных трубопроводов бестраншейным методом: VII Межд. науч. конф. "Молодые — наукам о Земле". 15—17 апреля 2014 г. — М.: РГГРУ. С. 260—262.
3. Ерхов А. А., Царевич Е. П. Метод создания композитной трубы при восстановлении коммунальных трубопроводов: VIII Межд. науч. конф. "Молодые — наукам о Земле". 5—7 апреля 2016 г. МГРИ-РГГРУ. — М.: 2016. С. 357—359.
4. Орлов В. А. Бестраншейные технологии и энергосбережение. — М., 2021. С. 124.

Maintenance and repair of water supply and drainage pipelines using modern equipment and based on forecast indicators

A. A. ERKHOV

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

E. A. KOROLEVA

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

Methods of examination and technological methods of construction work in underground water supply and water disposal systems are considered, generalized technical characteristics of specialized devices are given, probability of destruction prediction is estimated and on the basis of field observations, a formula for calculating the size of destruction is proposed.

Keywords: pipe material, pipeline destruction, internal surface, wall thickness, tele-inspection robot, control systems, ultrasonic changes, repair and construction works, state forecast, probability of leaks, defect size.

Bibliography — 4 references.

Received December 12, 2022

УДК 628.4.038; 504.064.2
DOI: 10.52190/2073-2589_2023_1_35
EDN: NPCUHW

Оценка степени опасности содержимого бывшего накопителя сточных вод ВОАО "Химпром" "Белое море"

А. А. МАСЛЕННИКОВ, д-р биол. наук; С. А. ДЕМИДОВА, канд. биол. наук;
Н. В. ХОДЫКИНА, канд. биол. наук; А. Я. ПОЧЕПЦОВ;
М. А. ГРИШИНА, канд. мед. наук; И. С. АЛЕКСЕЕВА; О. Н. НОВИКОВА, канд. мед. наук
ФГУП «Научно-исследовательский институт гигиены, токсикологии и профпатологии»
Федерального медико-биологического агентства, г. Волгоград, Россия

Выполнена оценка опасности проб поверхностных и глубоких слоев бывшего накопителя сточных вод ВОАО "Химпром" "Белое море" с использованием лабораторных биообъектов. Установлено негативное влияние ряда проб на гидробионты. При однократном внутрижелудочном поступлении водные вытяжки проб не вызывали гибели белых нелинейных крыс. Однако в условиях субхронического эксперимента выявлено токсическое воздействие наиболее опасной пробы на организм подопытных особей. В соответствии с СП 2.1.7.1386-03 исследованные пробы соответствуют 3-му классу опасности.

Ключевые слова: бывший накопитель сточных вод ВОАО "Химпром" "Белое море", лабораторные биообъекты, определение класса опасности отходов

Среди разнообразных форм антропогенного воздействия на среду обитания человека особо выделяет химический фактор [1].

Основными источниками загрязнения являются предприятия химической промышленности, в том числе отходы от их производственной деятельности. На территории РФ количество образующихся промышленных отходов постоянно растет, достигнув в 2021 г. рекордных 8,45 млрд. т [2]. Проблема безопасной утилизации отходов производства с последующей рекультивацией загрязненных земель является одной из наиболее приоритетных в РФ. Актуальность данной проблемы для территорий с

достаточно высокой плотностью населения и развитой промышленностью связана с присутствием промышленных отходов, депонируемых на многочисленных полигонах, включающих в себя шламонакопители, "белые моря", пруды-отстойники, пруды-накопители, осветлители и другие накопители [3, 4].

Одним из крупнейших предприятий отечественной химической промышленности в недалеком прошлом являлся ВОАО "Химпром", расположенный в черте г. Волгограда. Основными видами деятельности объединения было производство и реализация химической продукции технического назначения, в частности, неорганические, хлорорганические, фосфорорганические соединения, полимеры, пластификаторы, спецпродукция и др.

Бывший накопитель сточных вод "Белое море" (общая площадь 25 га и объем около 1 500 000 м³) расположен на примыкающей к промышленной площадке ВОАО "Химпром" территории в 200–400 м от правого берега реки Волги. Заполнение накопителя сточными водами закончено в конце 1980-х годов. В последующие годы в целях уменьшения вредного воздействия на окружающую среду содержимого "Белого моря" производилось укрытие накопителя "группой веществ" — смесью извести-пушонки, известково-карбонатного шлама, речного песка, грунта, строительных отходов.

С учетом высокого уровня химической опасности и потенциального вреда для экологии ликвидация данного шламонакопителя включена в приоритетный Федеральный проект "Оздоровление Волги" национального проекта "Экология" [5].

Исходя из изложенного, цель данных исследований заключалась в определении на лабораторных биообъектах класса опасности содержимого поверхностных и глубоких слоев бывшего накопителя сточных вод ВОАО "Химпром" "Белое море".

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

E-mail: maslennikov@rihtop.ru

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

E-mail: demidova@rihtop.ru

Ходыкина Нина Владимировна, ведущий научный сотрудник лаборатории "Лекарственная безопасность".

E-mail: niigtp@fmbamail.ru

Почепцов Александр Яковлевич, заведующий лабораторией "Патоморфология".

E-mail: niigtp@fmbamail.ru

Гришина Марина Анатольевна, заведующая лабораторией "Иммунология".

E-mail: niigtp@fmbamail.ru

Алексеева Ирина Сергеевна, младший научный сотрудник лаборатории "Экологическая токсикология".

E-mail: niigtp@fmbamail.ru

Новикова Ольга Николаевна, заместитель директора по научной работе.

E-mail: novikova@rihtop.ru

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2022 г.

© Масленников А. А., Демидова С. А., Ходыкина Н. В., Почепцов А. Я., Гришина М. А., Алексеева И. С., Новикова О. Н., 2023

Материалы и методы. Объектом исследований служили пробы поверхностных (до 2 метров) и глубоких (до 22 метров) слоёв "группы веществ" содержимого "Северной карты" бывшего накопителя сточных вод ВОО "Химпром" "Белое море".

При этом устанавливали способность водных вытяжек из проб оказывать негативное воздействие на инфузории — *Paramecium caudatum*. Данные опыты проводили в соответствии с утвержденной методикой [6] и СП 2.1.7.1386-03 [7].

В экспериментах на лабораторных животных определяли острую смертельную, а также подострую токсичность водных экстрактов проб при внутрижелудочном введении.

С этой целью использовали 170 половозрелых белых беспородных крыс-самцов. Содержание, питание, уход за животными и их умерщвление осуществляли в соответствии с учетом принципов гуманного обращения с экспериментальными грызунами [8].

В ходе определения кумулятивных свойств наиболее токсичной пробы в условиях субхронического эксперимента оценивали её общерезорбтивное действие по клинической картине отравления, а также с помощью комплекса необходимых тестов.

При характеристике функционального состояния организма животных определяли динамику массы тела, частоту дыхательных движений (визуально) и сердечных сокращений (электрокардиограф Medinova ECG-9801, КНР), порог реакции на тепловое воздействие ("Горячая/холодная плита", PE-34, "IITC Life Science", США), поведение (горизонтальная, вертикальная двигательная, эмоциональная, суммарная активность, а также "норковый" рефлекс и груминг) в установке "открытое поле" [9].

В периферической крови крыс-самцов на автоматическом гематологическом анализаторе "PCE-210" ("ERMA", Япония) регистрировали количество эритроцитов, лейкоцитов, лимфоцитов, гранулоцитов, моноцитов, тромбоцитов, а также содержание гемоглобина и гематокрита.

Сравнительному биохимическому анализу подвергали сыворотку крови подопытных и контрольных животных. При этом на автоматическом биохимическом анализаторе "Chem Well 2910" (США) устанавливали содержание общего белка, альбумина, глюкозы, триглицеридов, холестерина, мочевины, креатинина, молочной кислоты, общего билирубина, малонового диальдегида (МДА), активность аланиновой трансаминазы (АЛТ), лактатдегидрогеназы, аспарагиновой трансаминазы. Уровень пировиноградной кислоты (ПВК) определяли стандартным спектрофотометрическим методом [10].

Для гистологического исследования взяты образцы следующих органов и тканей: головной мозг, сердце, печень, легкие, почки, селезенка, тимус, надпочечники, желудок и тонкий кишечник. Препараты изучали с помощью микроскопа AxioScore.A1 (ZEISS, ФРГ).

В сыворотке крови крыс оценку активности системы комплемента, лизоцимную активность (с культурой клеток *Micrococcus lysodeikticus*), бактерицидную активность, уровень общих иммуноглобулинов (по реакции помутнения белков сыворотки с сульфатом цинка) регистрировали колориметрически на

планшетном фотометре Multiscan Ascent ("Thermo Scientific", Финляндия). Об уровне "естественных" антител к сальмонеллезному V-антигену в крови животных судили по интенсивности реакции гемагглютинации. Функциональную способность клеток гранулоцитарного ряда к фагоцитозу устанавливали по интенсивности спонтанной и индуцированной опсонизированным зимозаном хемилюминесценции на люминометре Luminoscan Ascent ("Thermo Scientific", Финляндия).

В течение всего периода воздействия проводили ежедневный осмотр крыс для выявления возможных признаков интоксикации. На 14-е и 28-е сутки опыта животных всех групп обследовали с применением вышеуказанных физиологических тестов и поведенческих реакций. Наряду с этим осуществляли забор крови для гематологических, биохимических и иммунологических исследований, после чего самцов умерщвляли методом декапитации для патоморфологической оценки внутренних органов и расчета их относительной массы.

Статистическую обработку экспериментальных данных осуществляли с помощью t-критерия Стьюдента, используя пакет Primer of Biostatistics 4.03 (различия считали достоверными при уровне вероятности $P \leq 0,05$) [11].

Результаты

В исследованиях на гидробионтах (с использованием прибора "Биотестер-2") установлено, что из 298 проанализированных проб 181 проба не оказывала какого-либо негативного влияния на инфузории. 114 проб вызывали умеренную степень токсичности у *Paramecium caudatum*, которая соответствовала 4-му классу опасности. Три пробы: Т 2г-2, Т 2г-16 и Т 7г-6 оказали более негативное влияние на гидробионты и отнесены к 3-му классу опасности — умеренно опасные отходы (табл. 1).

Таблица 1

Воздействие наиболее токсичных проб на инфузории *Paramecium caudatum*

№ пробы — глубина в м, (разведение пробы)	Среднее значение индекса токсичности, у. е.	Группа токсичности по ФР.1.39.2015. 19244 [6]	Класс опасности по СП 2.1.7.1386-03 [7]
Т 2г-2 (1 : 15)	0,75	III	3
Т 2г-2 (1 : 110)	0,58	II	3
Т 2г-16 (1 : 15)	0,73	III	3
г-16 (1 : 110)	0,53	II	3
Т 7г-6 (1 : 15)	0,72	III	3
Т 7г-6 (1 : 110)	0,49	II	3

При определении параметров острой смертельной токсичности использовали 24 образца проб, у которых при скрининговом тестировании на гидробионтах выявлен наибольший негативный эффект.

Исследования выполнены на 90 белых беспородных крысах-самцах (по 6 животных в группе) с исходной массой тела 250,0—280,0 г. Животным перорально дробно в течение рабочего дня вводили нативные водные экстракты проб в максимально достижимом объеме. Общий объем вводимой жидкости составил 24—25 мл для каждой особи [12].

Наблюдение за животными осуществляли в течение 14 дней.

В процессе эксперимента у подопытных особей отсутствовали видимые клинические признаки интоксикации. Гибели крыс не зафиксировано.

Основываясь на изложенном, сделан вывод о том, что однократное внутрижелудочное введение водных экстрактов проб не вызывало у животных проявлений острой интоксикации, что не позволило определить среднесмертельную величину.

При выполнении подострого эксперимента выбрана проба Т 2г-2, проявившая в скрининговых опытах на инфузориях наибольшую опасность.

В соответствии с требованиями СП 2.1.7.1386-03 [7] при проведении исследований экстракт тестируемой пробы разводили дистиллированной водой в 10, 100, 1000 и 10000 раз.

В опыте использовано 80 белых беспородных крыс-самцов с исходной массой тела 200,0—220,0 г (по 16 особей в группе). Животным опытных групп ежедневно, кроме выходных, в течение 28 суток внутрижелудочно вводили разведенный экстракт пробы из расчета 1,0 мл на 100,0 г массы тела животного. Контрольные особи получали адекватное количество дистиллированной воды. По завершении каждой недели экспериментов крыс взвешивали для оценки прироста массы тела и корректировки вводимых объемов разведений пробы.

Выполненные исследования позволили определить, что внутрижелудочное воздействие оцениваемой пробы не сопровождалось проявлением видимых признаков интоксикации у подопытных особей, которые на протяжении всего эксперимента имели удовлетворительный внешний вид и идентичный контрольному прирост массы тела.

В то же время по завершении периода воздействия у крыс, получавших растворы водного экстракта в двух наименьших разведениях, зарегистрировано существенное с выходом за пределы физиологических норм контроля снижение частоты сердечных сокращений (ЧСС). Помимо указанного в данный срок обследования у особей 1-й опытной группы зафиксировано повышение частоты дыхательных движений (ЧДД), а при увеличении разведения экстракта, вводимого крысам, в 10 раз, прослеживалась тенденция к достоверному однонаправленному изменению данного показателя. Кроме того, на 14-е и 28-е сутки эксперимента выявлено снижение чувствительности к тепловому воздействию у животных, получавших водную вытяжку пробы в разведении 1 : 10 (табл. 2).

При исследовании поведения в "открытом поле" у самцов не обнаружено достоверных межгрупповых отличий в проявлении горизонтальной и вертикальной двигательной активности, уровне норкового рефлекса, а также времени груминга. Однако при проведенном на 14-е сутки опыта обследовании крыс, получавших водный экстракт пробы в двух наименьших разведениях, зарегистрировано достоверное увеличение эмоционального статуса животных.

В ходе характеристики состояния периферической крови у грызунов первой группы через две недели после начала воздействия установлено увеличение количества тромбоцитов. По окончании опыта у крыс, подвергавшихся воздействию водной вытяжки тестируемой пробы в разведениях 1 : 10 и 1 : 100, зафиксирована моноцитопения. У самцов первой опытной группы в данный период обследования обнаружена

гранулоцитопения. Отмеченные изменения не выходили за пределы бисигмальных отклонений контрольных показателей (табл. 2).

Ежедневное поступление водной вытяжки тестируемой пробы в организм животных сопровождалось рядом метаболических сдвигов, зарегистрированных только после двух недель опыта у крыс первой и второй опытных групп. В частности, при поступлении в организм грызунов водного раствора пробы в разведениях 1 : 10 и 1 : 100 установлено достоверное повышение уровня креатинина, выходявшего у самцов второй группы за пределы допустимых границ физиологических колебаний контроля (табл. 2).

У крыс, получавших экстракт пробы в двух меньших разведениях, выявлена незначительная гипогликемия (около 10,0 %), выраженная практически в одинаковой степени по отношению к контролю. Помимо указанного у самцов первой группы зарегистрировано статистически значимое снижение мочевины и повышение холестерина; во второй — снижение активности аспарагиновой трансаминазы (АСТ).

Анализ относительной массы внутренних органов грызунов позволил выявить на 28-е сутки опыта достоверное увеличение массы печени у самцов первой и второй группы, при этом у крыс, получавших наименьшее разведение, изменение данного показателя выходило за пределы 2σ данных контрольных животных (табл. 2).

Проведенные патоморфологические исследования показали, что у особей 1-й и 2-й опытных групп в оба срока обследования в слизистой оболочке желудка отмечались слабо выраженные катаральные изменения. Кроме того, в просвете канальцев нефрона зафиксированы отложения бесструктурных оксифильных преципитатов, являющихся, предположительно, белковым компонентом, что свидетельствует о нарушении функционирования почечного фильтрационного барьера у самцов данных групп.

Помимо этого по завершении периода воздействия в печени рассматриваемых животных отмечено появление средних и мелких липидных капель в цитоплазме гепатоцитов как в периферических, так и в центральных отделах долек. Синусоиды расширены, полнокровны, в них, а также в центральных венах и более крупных сосудах, обнаружены застойные явления. В перипортальных отделах установлено скопление лимфогистиоцитарных элементов и тучных клеток.

Воздействие водной вытяжки пробы Т 2г-2 на протяжении субхронического эксперимента вызывало изменение показателей иммунологических тестов у экспериментальных животных. Так, у крыс 1-й группы через две недели после начала воздействия выявлено понижение концентрации лизоцима, бактерицидной активности сыворотки крови и изменение показателей фагоцитоза, приводящее к повышению возможностей нейтрофилов в поглощении и киллинге чужеродных объектов. Причем показатели индуцированной фагоцитарной активности выходили за пределы 2σ у самцов контрольной группы. После четырехнедельного воздействия выявлено уменьшение метаболической активности спонтанной хемилюминесценции нейтрофилов в 1-й и 2-й группах животных, что свидетельствует о срыве адаптации, повлекшей снижение этого показателя клеточного звена врожденного иммунитета (табл. 2).

Таблица 2

Комплексная оценка достоверных сдвигов, установленных в ходе субхронического эксперимента

Показатели и единицы измерений	Сроки обследования и степень разведения экстракта пробы					
	14-е сутки			28-е сутки		
	1 : 10	1 : 100	1 : 10000	контроль	1 : 100	1 : 10000
<i>Физиологические тесты</i>						
ЧСС в минуту	427,5 ± 14,1	420,0 ± 17,7	415,0 ± 18,0	447,5 ± 17,3	413,8 ± 5,0**	437,1 ± 17,1**
ЧДД в минуту	94,00 ± 4,72	97,50 ± 10,58	93,50 ± 8,38	91,00 ± 8,38	102,30 ± 5,91*	101,70 ± 8,72
Реакция на тепловое воздействие, °C	50,06 ± 0,31*	48,96 ± 0,16	49,65 ± 0,34	48,70 ± 0,31	50,01 ± 0,39*	48,77 ± 0,37
<i>Поведенческие реакции в условиях открытого поля</i>						
Эмоциональная активность, усл. ед.	2,00 ± 0,53*	1,88 ± 0,30*	1,25 ± 0,49	0,63 ± 0,38	0,38 ± 0,26	1,50 ± 0,60
<i>Гематологические показатели</i>						
Моноциты, ·10 ⁹ /л	0,41 ± 0,07	0,45 ± 0,12	0,49 ± 0,13	0,49 ± 0,08	0,42 ± 0,03*	0,37 ± 0,04*
Гранулоциты, ·10 ⁹ /л	3,01 ± 0,32	2,77 ± 0,27	4,04 ± 0,77	2,86 ± 0,24	1,99 ± 0,18*	2,53 ± 0,19
Тромбоциты, ·10 ⁹ /л	662,1 ± 54,9*	567,6 ± 23,4	630,6 ± 85,6	559,1 ± 18,3	514,4 ± 24,3	841,8 ± 70,1
<i>Биохимические показатели крови</i>						
Глюкоза, ммоль/л	4,972 ± 0,149*	4,950 ± 0,202*	5,000 ± 0,244	5,069 ± 0,234	5,550 ± 0,127	5,269 ± 0,139
Холестерин, ммоль/л	1,920 ± 0,071*	1,637 ± 0,100	1,495 ± 0,120	1,484 ± 0,057	1,561 ± 0,078	1,639 ± 0,096
АСТ, Е/л	193,0 ± 14,0	174,1 ± 14,7*	198,8 ± 18,6	198,7 ± 7,0	226,4 ± 13,8	199,1 ± 5,4
Мочевина, ммоль/л	4,097 ± 0,285*	5,223 ± 0,194	5,149 ± 0,357	5,435 ± 0,209	5,059 ± 0,222	3,621 ± 0,280
Креатинин, мкмоль/л	49,25 ± 1,92*	54,76 ± 1,95**	45,69 ± 2,94	48,23 ± 1,43	42,99 ± 1,98 (31,77 ÷ 54,21)	39,44 ± 1,62
<i>Относительная масса внутренних органов крыс</i>						
Печень, г/кг	46,98 ± 0,79	26,55 ± 0,97	28,33 ± 0,42	29,37 ± 1,12	27,88 ± 0,78	33,04 ± 0,95**
<i>Иммунологический статус</i>						
Интенсивность спонтанной фагоцитарной активности нейтрофилов, усл. ед.	92,06 ± 8,71	98,01 ± 7,62	83,71 ± 5,06	79,08 ± 3,78	82,43 ± 5,88	111,3 ± 4,3*
Интенсивность индуцированной фагоцитарной активности нейтрофилов, усл. ед.	582,6 ± 85,1**	419,8 ± 128,5	250,0 ± 24,5	243,9 ± 36,9	248,4 ± 27,7 (91,6 ÷ 405,2)	585,0 ± 61,7
Коэффициент позитивности	6,57 ± 0,35**	4,27 ± 0,56	3,21 ± 0,18	3,24 ± 0,29	3,19 ± 0,16 (1,11 ÷ 5,27)	5,46 ± 0,31
Концентрация лизоцима в сыворотке крови, мкг/мл	5,37 ± 0,32*	6,38 ± 0,47	6,68 ± 0,56	6,12 ± 0,54	6,91 ± 0,59	6,15 ± 0,32
Бактерицидная активность сыворотки крови, усл. ед.	36,64 ± 0,51*	40,47 ± 0,33	39,40 ± 0,61	38,59 ± 1,01	39,53 ± 0,51	20,09 ± 0,64
Количество достоверных изменений при $P \leq 0,05$	11	4	0	0	—	7
Количество изменений, выходящих за пределы значений ($M \pm 2\sigma$) контроля	2	1	0	0	—	2
					4	0
					1	0

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

Резюмируя результаты комплексного обследования животных в условиях подострого эксперимента, следует отметить, что месячное внутрижелудочное введение водных экстрактов пробы в разведениях 1:10, 1:100 вызывало у крыс развитие интоксикации, носившее дозо-эффективную зависимость. Наиболее многочисленные достоверные сдвиги показателей (18) зафиксированы у животных, получавших пробу в наименее разбавленном виде. Воздействие водной вытяжки пробы с большим разведением (1:100) вызывало уменьшение вредного действия (8 отклонений). Подтверждением токсичности пробы, наряду с установленной широтой выявленных изменений, может служить и их глубина, в частности, выход за пределы бисигмальных отклонений параллельного контроля ряда показателей: 4 в первой группе и 2 — во второй.

Выявленное количество негативных проявлений превалировало в первую половину эксперимента, что указывает на отсутствие у тестируемого образца способности проявлять кумулятивные свойства.

Месячное введение водных вытяжек тестируемой пробы в двух наименьших разведениях (1:1000 и 1:10000) не вызывало видимых изменений у подопытных особей, что соответствует 3-му классу опасности.

Заключение

Комплексное изучение токсического влияния содержимого поверхностных и глубоких слоев бывшего накопителя сточных вод ВОО "Химпром" "Белое море" свидетельствует о том, что тестируемые пробы оказывали негативное влияние на жизнеспособность гидробионтов, а также состояние лабораторных животных. При этом показатель опасности изученных отходов по воздействию на инфузорию (*Paramecium caudatum*) относится к 3-му классу, по воздействию на крыс в остром опыте — 4-му классу, а в подостром эксперименте — 3-му классу.

Полученные данные следует принимать во внимание при проведении работ, связанных с ликвидацией шламонакопителя "Белое море" ВОО "Химпром".

Вывод: По результатам проведенных экспериментальных исследований на гидробионтах и лабораторных млекопитающих содержимое "Северной карты" бывшего накопителя сточных вод ВОО "Химпром" "Белое море" в виде "группы веществ" соответствует 3 классу опасности по СП 2.1.7.1386-03.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демина Т. Я., Шаяхметова Л. Р. К проблеме утилизации отходов химических технологий на примере производства хлорорганических соединений // Вестник Оренбургского государственного университета: Естественные науки. 2005. Т. 2. № 10. С. 11—13.
2. Российские предприятия в 2021 году произвели рекордное количество отходов [Электронный ресурс]. URL: <https://news.ecoindustry.ru/2022/08/rossijskie-predpriyatiya-v-2021-godu-proizveli-rekordnoe-kolichestvo-othodov/?ysclid=laox7t7gdl83688190> (дата обращения: 20.11.2022).
3. Степанов Е. Г. и др. Проблемы размещения полигонов для утилизации промышленных отходов в индустриальном городе // Фундаментальные исследования. 2004. № 6. С. 88—92.
4. Прохоров Н. И., Дроздова Т. В. Гигиенические аспекты влияния полигона твердых бытовых отходов на среду обитания // Гигиена и санитария. 2004. № 3. С. 10—12.
5. Исследовать и уничтожить: как будут ликвидировать "белое море" в Волгограде [Электронный ресурс]. URL: <https://novostivolgograda.ru/news/2021-07-16/issledovat-i-unichtozhit-kak-budut-likvidirovat-beloe-more-v-volgograde-1554451?ysclid=laewdmocag215893422> (дата обращения: 20.11.2022).
6. ФР.1.39.2015.19244 (ПНД Ф Т 16.3.16-10 (изд. 2015 г.). Методика определения токсичности отходов производства и потребления экспресс-методом с применением прибора "Биотестер". — СПб.: "СПЕКТР-М". 2010. — 23 с.
7. СП 2.1.7.1386-03. Санитарные правила. Санитарные правила по определению класса опасности токсичных отходов производства и потребления (ред. от 31.03.2011) [Электронный ресурс] : утв. Гл. гос. сан. врачом Рос. Федерации 16.06.2003; введены в действие 30.06.2003; зарегистрированы в Минюсте РФ 19.06.2003, регистр. № 4755. — Доступ из справ.-правовой системы "Консультант-Плюс".
8. ГОСТ 33044—2014. Принципы надлежащей лабораторной практики. — М.: Стандартинформ, 2014. — 18 с.
9. МР № 2166-80. Методические рекомендации по использованию поведенческих реакций животных в токсикологических исследованиях для целей гигиенического нормирования / под общ. ред. Буркацкой Е. Н., Витер В. Ф., Тимофиевской Л. А. и др. — Киев, 1980. — 46 с.
10. Колб В. Г., Камышников В. С. Справочник по клинической биохимии. — Беларусь, Минск, 1982. С. 198.
11. Лакин Г. Ф. Биометрия. — М.: Высшая школа, 1990. — 352 с.
12. Гончарук Е. И., Сидоренко Г. И. Гигиеническое нормирование химических веществ в почве. Руководство. — М.: Медицина, 1986. — 132 с.

Assessment of the degree of danger of the contents of the former waste water storage facility of VOO "Khimprom" "White Sea"

A. A. MASLENNIKOV, S. A. DEMIDOVA, N. V. KHODYKINA, A. Ya. POCHETSOV,
M. A. GRISHINA, I. S. ALEKSEEVA, O. N. NOVIKOVA
FSUE "Research Institute of Hygiene, Toxicology and Occupational Pathology"
at Federal Medical and Biological Agency, Volgograd, Russia

An assessment of the hazard of samples of surface and deep layers of the former wastewater storage facility of VOO "Khimprom" "White Sea" using laboratory biological objects was carried out. The negative influence of a number of samples on hydrobionts has been established. With a single intragastric intake, aqueous extracts of samples did not cause the death of white nonlinear rats. However, under the conditions of a subchronic experiment, the toxic effect of the extract on the body of experimental individuals in dilutions of 1:10, 1:100 was revealed. In accordance with SP 2.1.7.1386-03, the samples studied correspond to hazard class 3.

Keywords: former waste water storage facility of VOO "Khimprom" "White Sea", laboratory biological objects, determination of the hazard class of waste.

Bibliography — 12 references.

Received December 9, 2022



Чрезвычайные ситуации, экологическая оценка и ликвидации их последствий

УДК 502.55

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_1_40

EDN: NQZSRI

Комплексная оценка загрязнения тяжелыми металлами прибрежной зоны Каспийского моря в районе пригорода Актау

Н. Ш. ДЖАНАЛИЕВА, А. К. СЕРИКБАЕВА, канд. техн. наук;
Б. С. СУЛЕЙМЕНОВА, канд. мед. наук; **Ф. К. НУРБАЕВА**, канд. техн. наук;
Ж. К. АЛТЫБАЕВА

Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова,
Мангистауская область, г. Актау, Казахстан

Исследованы морская и прибрежная части Каспийского моря Мангистауской области на содержание тяжелых металлов. На основе результатов было выявлено незначительное изменение данных. Показатели тяжелых металлов, таких, как никель, кадмий, мышьяк, были снижены в 2021 г. по сравнению с 2018 г., что связано с уменьшением антропогенной нагрузки на природную среду ввиду ограниченной деятельности во многих сферах в связи с пандемией.

Ключевые слова: морская часть, прибрежная зона, тяжелые металлы, мониторинг, почва.

Каспийское море является высокопродуктивным водоемом, что сочетается с относительной бедностью его биологического разнообразия. Значительное количество трудов, посвящено физическим, гидрохимическим и биологическим процессам и экологическому состоянию Каспийского моря [1].

Разведка и эксплуатация нефтяных месторождений являются важнейшей составляющей загрязнения. Проводятся масштабные геолого-разведочные работы, открыты новые нефтегазовые месторождения и повышается дебит старых. Неслучайно уровни нефтяного загрязнения в разных частях Каспия во много раз превосходят предельно допустимые нормы [2, 3].

Ввиду этого необходимо качественное проведение прогнозируемых работ на основе геоэкологического мониторинга в целях сохранения ресурсов Каспийского моря и прибрежной зоны. Данные методы дадут не только точечную оценку, но и пространственную картину экологического состояния территорий города Актау [4, 5].

Несмотря на многочисленные исследования Каспия, существуют районы моря, степень изученности и покрытия данными прямыми наблюдений которых крайне мала. В данных районах возникает целый ряд вопросов фундаментального и прикладного характера, требующих регионального подхода к изучению состояния почв в прибрежных зонах Каспийского моря. Вопрос состояния почв активно завоевал популярность за границей, в частности, в США и Германии. Именно эти страны первыми стали уделять внимание почвенному покрову и влиянию на него. В последние три десятилетия наблюдалось резкое сокращение числа научных исследований по этой проблеме. Одним из районов, требующих такого исследования, является восточное побережье Среднего Каспия, а именно акватория моря в районе областного центра Мангистауской области, г. Актау, и его пригородные территории. В этой связи исследования акватории Каспия и прибрежной зоны областного центра являются актуальными и своевременными.

Джаналиева Нургуль Шарипкалиевна, докторант.

E-mail: nurgul.janaliyeva@yu.edu.kz

Серикбаева Акмарал Кабылбековна, профессор.

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

Сулейменова Ботакоз Сулейменовна, доцент.

E-mail: botakoz.suleimenova@yu.edu.kz

Нурбаева Фарида Куантхановна, доцент.

E-mail: farida.nurbayeva@yu.edu.kz

Алтыбаева Жансауле Кыдыргалиевна, ассистент.

E-mail: zhansauale.altaybayeva@yu.edu.kz

Статья поступила в редакцию 24 ноября 2022 г.

© Джаналиева Н. Ш., Серикбаева А. К., Сулейменова Б. С.,
Нурбаева Ф. К., Алтыбаева Ж. К., 2023

На территории п. Акшукыр Мангистауской области исследование почвенного покрова на содержание тяжелых металлов ранее не проводилось. Данные исследования могут способствовать мероприятиям по управлению качеством окружающей среды.

Материалы и методы исследований

Проведены полевые исследования в прибрежной зоне в районе пос. С. Шапагатова. Исследования проведены перед началом V саммита глав Прикаспийских государств Казахстана, России, Азербайджана, Туркмении и Ирана, назначенного на 12 августа 2018 г. в г. Актау. Полевые исследования проведены маршрутным методом. Были заложены 4 исследовательские площадки (ИП), ИП-1, ИП-2, ИП-3 и ИП-4 (фоновая), для мониторинга состояния прибрежной зоны в районе пригородной территории г. Актау (рис. 1). В табл. 1 представлены координаты точек отбора проб почвы.



Рис. 1. Карта-схема исследовательских площадок ИП-суша 1, 2, 3, 4 для мониторинга состояния прибрежной зоны, выполненная в среде SAS Planet

Таблица 1

Местоположение, координаты, расстояние от береговой линии моря. Весна 2021 г.

Станция №	Местоположение	Широта	Долгота	Расстояние от берега, м
ИП-1	Район пос. Акшукыр	43°48'1"	51°1'59"	303,65
ИП-2	Район пос. Акшукыр	43°49'5"	51°2'14"	1635,1
ИП-3	Район пос. С. Шапагатова	43°49'0"	51°1'29"	2135
ИП-4	Район пос. С. Шапагатова	43°55'19"	51°2'0"	9578

- ИП-1 — на 20-м км от г. Актау в пос. Акшукыр на расстоянии 303,65 метров от береговой линии моря;
- ИП-2 — у автомагистрали, Актау-Ф-Шевченко, на расстоянии 1635,1 м от ИП-1 в районе открытого склада удобрений и склада дорожно-строительных материалов;
- ИП-3 — в районе частных построек на удалении 2135 м от ИП-2;
- ИП-4 (фоновая) — на удалении 9578 метров от ИП-3, где влияние вредных выбросов от строительных работ и производства практически не прослеживается.

Отбор почвенных проб. При исследовании почвы важный этап — это отбор проб, рекомендованный в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02.84. Данный стандарт необходим для контроля загрязнения почвы, как общего, так и локального в районах воздействия промышленных предприятий, сельскохозяйственных и транспортных источников загрязнения. Отбор проб и анализ почвы проводили по утвержденной методике "Отбор проб почвы для химического анализа" [6, 7] с глубины 5—20 см одноразово в течение светового дня на площадках из одного горизонта (вес грунтовой пробы 1 кг). Пробы почвы высушивали до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре, удаляя крупные комки и включения. Почву растирали в ступке, просеивали через сито ($d = 1$ мм). Распределив почву ровным слоем в 1 см, отбирали точечные пробы шпателем не менее чем из четырех мест, и путем их смешивания составляли объединенную пробу. Исследования были проведены с почвенной вытяжкой, которую готовили по стандартной методике. Пробы почв отбирали на пробных площадках ИП-1, 2, 3 и 4 (фоновая). Смешанный образец состоял из 5 почвенных проб, взятых конвертом из 5 точек. Отбирали средние образцы весом 300—400 грамм. В целом пробы представляют собой смешанные образцы с 20 точек, то есть по 5 точек на 4 ИП. Подготовку образцов пробы к определению тяжелых металлов проводили на базе лаборатории кафедры.

Определение гумуса в почве. Почвенные образцы исследовали следующими методами: цвет определяли по шкале Манселла, гумус определяли по Тюрину, гранулометрический состав — по Качинскому, валовый азот определяли по Кьедалу, подвижные соединения калия и фосфора — по Чирикову, подвижные соединения для карбонатных почв определяли по Мачигину. Также общепринятыми методами были определены: объемная масса, плотность твердой фазы, гидролитическая кислотность, сумма поглощенных оснований. Определение количества гумуса выполняли по методу Никитина с колориметрическим окончанием по Орлову—Гриндель, который основан на мокром озолении органических соединений почвы.

Определение тяжелых металлов в почве. Тяжелые металлы в почвенных образцах определялись методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием МГА-915М (Россия) в аккредитованной лаборатории Департамента экологии Мангистауской области, согласно методике (М-МВИ-80-80-2008) [8]. Ввиду того, что валовое содержание определяемых тяжелых металлов (ТМ) в почве было высоким, определяли подвижные формы следующих элементов: Pb, Ni, Cr, Hg, V, Cu, Fe, Zn [9]. Определенные концентрации тяжелых металлов (ТМ) сравнивали с имеющимися предельно допустимыми концентрациями (ПДК).

Методы геоинформационных технологий (ГИТ). Картографический материал района исследований был выполнен с использованием космоснимков и с применением программ ГИС (Google Maps, SAS Planet). Редактирование карт-схем, диаграммы и графики выполнены с использованием программ Corel Draw 11 и Paint.

Результаты исследований и обсуждение

Почвенный покров представляет собой сложный механизм, регулирующий взаимодействие между биосферой, гидросферой и атмосферой, но наряду с этим почва является не только объектом воздействия, но и источником загрязнения сопредельных сред и негативного влияния на здоровье человека. Интенсивность антропогенной нагрузки наиболее сильно прослеживается при исследовании почвы, верхние горизонты которого накапливают тяжелые металлы [10]. Именно почва выполняет важнейшую роль буфера и очистителя, принимая на себя отходы и выбросы. Она накапливает загрязняющие вещества: тяжелые металлы, углеводороды, пестициды, защищая воды и очищая от них атмосферу. Кроме того, в хорошо промываемых, песчаных почвах тяжелые металлы, легко просачиваясь в грунтовые воды, быстро разносятся ими.

Обычно в почвах металлы содержатся в виде металлосодержащих солей и комплексных металлоорганических соединений. Песчаные и супесчаные почвообразующие породы содержат небольшое количество тяжелых металлов [11, 12]. Песчаные породы характеризуются наиболее высокой фильтрационной способностью, что показывает низкие полученные значения анализированных проб. На подвижность металлов в почвах оказывают влияние их степени окисления, которые зависят от окислительно-восстановительных свойств почвы. В условиях окисления миграционная контрастность сильно подвижна, и очень слабая миграция в среде, где преобладают процессы восстановления.

Антропогенное поступление тяжелых металлов в почву связано с разнообразными источниками. Наиболее мощные потоки тяжелых металлов возникают вокруг предприятий химической и нефтеперерабатывающей, уранодобывающей промышленности [13–16]. Так около 95 % токсинов попадают в почвенный покров в виде техногенной пыли, большая часть в виде сухих осадков, 15–20 % с атмосферными осадками. В дополнение к антропогенным источникам тяжелых металлов, загрязняющих почву, относят удобрения (органические и минеральные), сточные воды, бытовой мусор [17–20].

По результатам мониторинга в табл. 2 приведены физико-химические свойства почв.

По дороге в аэропорт города на исследуемых площадках пос. Акшукыр в почвенных образцах преобладают бурые пустынные почвы, а по глубине залегания верхнего засоленного горизонта преимущественно солончаковые либо солончаковатые почвы. Из табл. 2 видно, что содержание гумуса в верхнем горизонте почвы колеблется от 1,19 до 2,63 %. Содержание биогенных элементов невысокое. Фосфор валовый в поверхностных горизонтах содержится в пределах от 473,4 до 2003,8 мг/кг. Содержание карбонатов колеблется в пределах от 1,78 до 3,13 %, а содержание общего азота изменяется в пределах 0,24–0,41 %. Известно, что чем тяжелее гранулометрический состав, тем выше емкость обмена. Величина емкости обмена колеблется от 9,65 до 32,19 мг-экв/100 г почвы. В почвенно-поглощающем комплексе наблюдается стабильное преобладание обменного магния (40–80 % от емкости обмена). Реакция водных суспензий в почвах слабощелочная или близка к нейтральной (рН 6,87–7,42). Почвы на обследованной территории отличаются низким содержанием органического вещества, щелочной реакцией почвенных растворов, засолением и слабой устойчивостью к антропогенным воздействиям.

Аккумуляция основной части загрязняющих веществ наблюдается преимущественно в гумусово-аккумулятивном почвенном горизонте, где они связываются алюмосиликатами, несиликатными минералами, органическими веществами за счет различных реакций взаимодействия. Состав и количество удерживаемых в почве элементов зависят от содержания и состава гумуса, кислотности-основности и окислительно-восстановительных условий, сорбционной способности, интенсивности биологического поглощения [21].

Исследование почвенного покрова на содержание тяжелых металлов имеет большое практическое значение. Так как тяжелые металлы могут носить негативный характер, то необходимо, чтобы их содержание входило в ПДК. Полученные данные могут стать основой для мониторинговых исследований и комплексной оценки почвенного покрова. Также результаты исследований могут послужить основой и для плана работ по снижению концентрации тяжелых металлов [22].

Таблица 2

Физико-химические свойств почв исследуемых площадок

Физико-химические характеристики почв	Исследовательские площадки (мониторинг состояния почв)			
	ИП-1 2021	ИП-2 2021	ИП-3 2021	ИП-4(фон) 2021
Гумус, %	1,19	1,41	1,48	2,63
Азот общий, %	0,24	0,36	0,41	0,28
Фосфор (валовый), мг/кг	1662	473,4	516,15	2003,8
Карбонаты, %	3,13	1,78	1,84	2,77
Емкость обмена, мг-экв/100 г. почвы	9,65	22,89	24,89	32,19
Обменный кальций, мг-экв/100 г. почвы	1,7	4,2	5,2	1,4
Обменный магний, мг-экв/100 г. почвы	7,12	17,2	18,5	11,8
Обменный натрий, мг-экв/100 г. почвы	0,63	0,95	0,98	16,29
Сумма солей	0,59	1,07	1,33	0,24
рН	7,42	7,52	7,63	6,87

Главными источниками загрязнения на территории поселка являются: автотранспорт, хвостохранилище Кошкар-Ата и промышленные объекты на территории промышленной зоны. В табл. 3 представлен сравнительный анализ почв на тяжелые металлы.

В ходе эксперимента получена оценка нижнего предела обнаружения данных тяжелых металлов: меди — 0,2 мг/кг; свинца — 0,07 мг/кг и хрома — 1,98 мг/кг при исходной навеске 5 г, объеме рабочего раствора 50 мл (по данным собственных исследований в пос. Акшукыр). Во всех пробах почвы содержание высокой концентрации тяжелых металлов не обнаружено. Основной массив значений по содержанию меди в почвах города находится в диапазоне от 2 до 3,2 мг/кг по анализам 2022 г. Концентрации хрома на всей исследуемой территории намного ниже относительно ПДК (Cr — 6). Небольшое превышение ПДК свинца (до 6,17 мг/кг) выявлено лишь на од-

ной пробной площади ИП-2, заложенной на территории автодорог расположенный в зоне постоянного воздействия автомобильных выбросов, — обочина дороги на окраине поселка.

На рис. 2 можно наглядно увидеть, как изменились данные показатели содержания по сравнению с 2018 годом. Видно, что содержание таких металлов как кадмий, никель и свинец значительно завышено на пробной площади ИП-2.

А также заметна тенденция спада количества тяжелых металлов, по годам видимо, из-за пандемии уменьшилось поступление тяжелых металлов на почвенный покров. Суммарный индекс загрязнения почвенного покрова тяжелыми (Zc) менее 1,0, что свидетельствует о незагрязненности почвы. Следует отметить, что величина содержания обнаруженных в почвенных пробах тяжелых металлов значительно ниже существующих пределов допустимой концентрации.

Таблица 3

Содержание тяжелых металлов в почвах площадок исследования, мг/кг

Вещество	Площадки исследований (2018, 2021 гг.) в районе мониторинга почв								ПДК, мг/кг
	ИП-1 (n = 4) 2018	ИП-1 (n = 4) 2021	ИП-2 (n = 4) 2018	ИП-2 (n = 4) 2021	ИП-3 (n = 4) 2018	ИП-3 (n = 4) 2021	ИП-4 (Фоновая) 2018	ИП-4 (Фоновая) 2021	
Cu	3,2	2,1	4,7	2,0	3,6	3,2	2,1	2,8	3,0
Ni	3,6	1,45	5,3	1,5	3,8	1,85	2,5	1,46	4,0
As	2,9	0,54	4,9	0,57	4,2	0,53	7,3	0,59	2,0
Cd	3,6	0,012	9,4	0,018	4,1	0,022	3,7	0,02	5,0
Cr	4,3	2,0	5,3	1,98	3,5	3,1	2,8	2,65	6,0
Pb	5,9	0,23	6,17	0,29	4,1	0,31	6,3	0,071	32,0

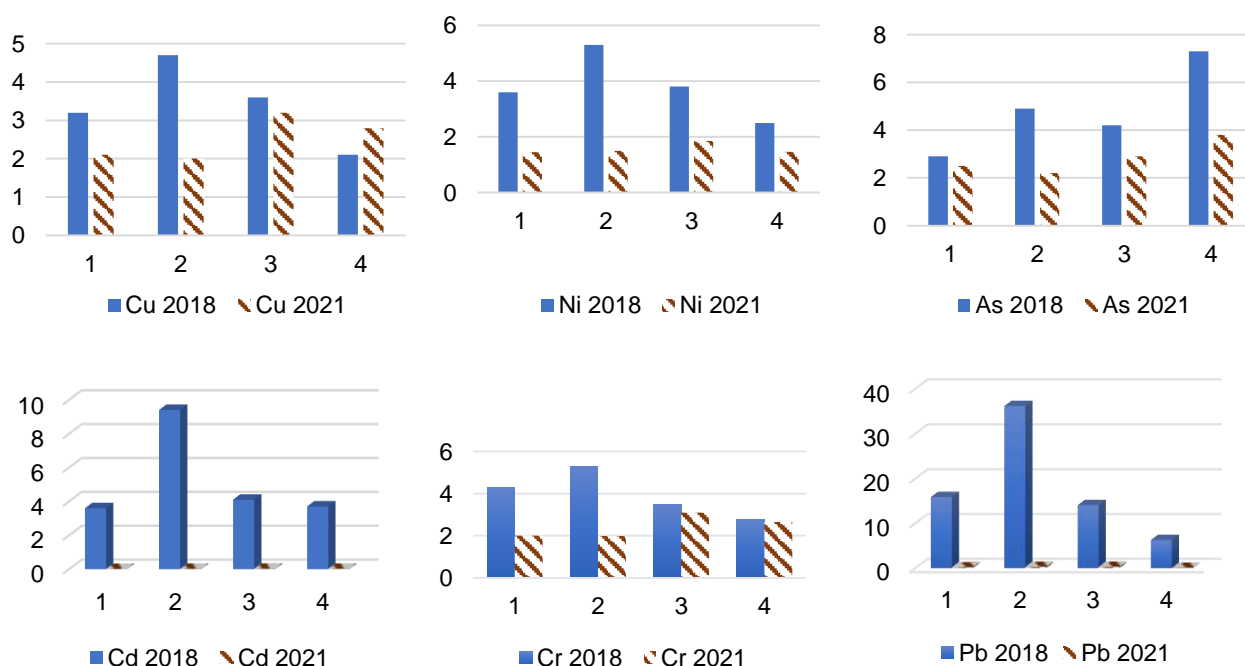


Рис. 2. Диаграммы концентраций ТМ в почвах в районе пос. Акшукыр (пригород г. Актау) на ИП-1, 2, 3 и 4 (фон), в зависимости от расстояния до города

В результате сравнения было выявлено, что данные изменились. Показатели содержания кадмия, мышьяка и никеля также уменьшились в 2021 г. Кадмий имеет примерно те же значения во всех пробах, а показатели мышьяка значительно уменьшены. Это свидетельствует о том, что содержание в почве тяжелых металлов с каждым годом уменьшается по мере снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду из-за ограничения деятельности во всех сферах во время пандемии.

Выхлопные газы имеют прямое влияние на накопление тяжелых металлов, в особенности свинца [22], так как хвостохранилище "Кошкар-Ата" находится неподалеку от населенного пункта пос. Акшукыр и является источником многих химических элементов, в том числе тяжелых металлов.

В ГОСТ 17.4.02.-83 введено классификационное деление тяжелых металлов на 3 класса опасности:

1-й класс (особо токсичные) — мышьяк, кадмий, ртуть, селен, свинец, цинк;

2-й класс (токсичные) — бор, кобальт, никель, молибден, сурьма, хром, медь;

3-й класс (малотоксичные) — барий, ванадий, вольфрам, марганец, стронций.

Авторами обнаружено шесть тяжелых металлов (кадмий, никель, хром, свинец, медь и мышьяк), три из них относятся к 1-му классу опасности и являются особо токсичными — это мышьяк, кадмий, свинец. Остальные относятся ко 2-му классу опасности и являются токсичными — это никель, хром и медь. Малотоксичных тяжелых металлов 3-го класса опасности обнаружено не было.

Выводы

В результате исследований можно сделать вывод, что содержание тяжелых металлов не превышает уровня ПДК. Проведенное в специализированной лаборатории исследование определило содержание тяжелых металлов в почвенных образцах (As, Cd, Cu, Ni, Cr, Pb). Установлено увеличение в почве валового содержания тяжелых металлов в 2018 г. Их присутствие в почвенном покрове опытного поля пос. Акшукыр свидетельствует о том, что вблизи располагаются объекты, оказывающие негативное воздействие. По шкале степени загрязнения почвы тяжелыми металлами опытное поле можно отнести к среднему уровню загрязнения.

Из рассматриваемых металлов по степени накопления в почвенном покрове преобладает свинец (немного превышает ПДК). Суммарный индекс загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами (Zс) менее 1,0, что свидетельствует о незагрязненности почвы.

Содержание гумуса в верхнем горизонте почвы колеблется от 1,19 до 2,63 %. Фосфор валовый в поверхностных горизонтах содержится в пределах от 473,4 до 2003,8 мг/кг. Содержание карбонатов колеблется в пределах от 1,78 до 3,13 %, а содержание общего азота изменяется в пределах 0,24—0,41 %. Известно, что чем тяжелее гранулометрический состав, тем выше емкость обмена.

Почвы на обследованной территории отличаются низким содержанием органического вещества, ще-

лочной реакцией почвенных растворов, засолением и слабой устойчивостью к антропогенным воздействиям. По сравнению с 2018 г. наблюдается снижение меди в почвах, его превышение на 0,2 ПДК отмечено на ИП-3, этому свидетельствует снижение выбросов от автотранспорта во время пандемии. Проведенные исследования показали, что содержание меди, никеля, цинка, мышьяка, кадмия, хрома и свинца на ИП-3 было повышено по сравнению с другими исследовательскими площадками за счёт частных построек, в связи с влиянием вредных выбросов от строительных работ и производства. Наблюдается снижение хрома и меди почти в 2,5 раза на ИП-2, что может свидетельствовать о приостановлении складирования новых дорожных строительных материалов во время пандемии. Значительно сократилось содержание тяжелых металлов в почвенных образцах: кадмия, мышьяка и никеля, что также является последствием пандемии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зонн И. С., Костяной А. Г., Косарев А. Н., Жильцов С. С. Каспийское море. Энциклопедия. — М.: "Восточная книга", 2013. — 558 с.
2. Тужилкин В. С. Сезонная и многолетняя изменчивость термохалинной структуры вод Черного и Каспийского морей и процессы ее формирования: автореферат дисс. ... д-ра геол. наук — М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2008.
3. Косарев А. Н., Архипкин В. С. Водные массы // Гидрометеорология и гидрохимия морей. Сер. "Каспийское море". Т. 6. — Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1992. С. 117—124.
4. Syrlbekkyzy S., Kenzhetaev G. Zh., Dzhumasheva K. A., Koibakova S. E. Method of desalination of sea water in a hot climate: International Scientific and Practical Conference "Financial, economic and legal aspects of international cooperation of the Caspian States". November 29, 2018. P. 99—103.
5. Kenzhetaev G. Zh., Serikbayeva A. K., Syrlbekkyzy S., Koibakova S. E., Zhidibaeva A. E. Patent "Method and device for desalination of seawater" of the Ministry of Justice of the Republic of Kazakhstan, National Institute of Intellectual Property. № 2018/0409.1. 09/19/2019. Oil pollution in the Mediterranean Sea. Pt. 1. The international context: The Handbook of Environmental Chemistry (2017a) / eds. Carpenter A., Kostianoy A. G. Springer, 2017.
6. ГОСТ 17.4.4.02-84 Отбор проб почвы для химического анализа.
7. Хантурина Г. Р., Сембаев Ж. Х., Сейткасымова Г. Ж., Федорова И. А. Современные методы определения химических веществ в окружающей среде: Междун. науч.-практ. конф. "Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности". — Тамбов, 2014. Ч. 9. С. 147—149.
8. Vieira L. R., Morgadoc F., Nogueira A. J. A., Soares A. M. V. M., Guilhermino A. L. Integrated multivariate approach of ecological and ecotoxicological parameters in coastal environmental monitoring studies // Ecological Indicators. 2018. V. 95. P. 1128—1142.
9. Xiaohu Wen, Jian Lu, Jun Wu, Yichen Lin, Yongming Luo. Influence of coastal groundwater salinization on the distribution and risks of heavy metals // Science of the Tot. Environ. 2019. V. 652. P. 267—277.
10. Тяжелые металлы в окружающей среде. — М.: Изд-во МГУ, 1980. — 250 с.
11. Ильин В. Б. Тяжелые металлы в системе почва—растение. — Новосибирск: Наука, 1991. — 140 с.
12. Ковда В. А. Биогеохимия почвенного покрова. — М.: Наука, 1985. — 230 с.
13. Курамшина Н. Г., Курамшин Э. М., Лапиков В. В. Комплексный экологический мониторинг водных экосистем в условиях техногенеза // Экологические системы и приборы. 2004. № 8. С. 9—11.
14. Ефимова И. В., Безогодов И. В., Бичев С. С., Донских И. В., Гребенщикова В. И. Медико-экологические проблемы длительного техногенного загрязнения почвы в Иркутской области // Гигиена и санитария. 2012. № 5. С. 42—44.
15. Алибеков Л. А., Алибекова С. Л. Социально-экономические последствия процесса опустынивания в Центральной Азии // Вестник Российской Академии наук. 2007. Т. 77. С. 420—425.

16. Каганов Ю. Т. Козволюция биосферы и техносферы: проблемы и решения // Синергетическая парадигма. Нелинейное мышление в науке и искусстве. — М.: Прогресс-Традиция, 2002. — 447 с.

17. Кулманов М. Е., Амрин К. Р., Кенесарив У. И., Сакбаев О. О. Гигиенические и экономические проблемы гидросферы и здоровья населения в зоне Казахстанской части Приаралья // Здоровоохранение Казахстана. 1993. № 3. С. 17—22.

18. Омарова Т. А., Казангапова Н. Б. Уровень пестицидного загрязнения реки Сырдарьи и малого моря // Медицинские, социальные и экологические проблемы Приаралья — Алматы. 1992. С. 126—127.

19. Пинский Д. Л., Орешкин В. Н. Тяжелые металлы в окружающей среде // Экспериментальная экология. — М.: Наука, 1991. С. 201—212.

20. Давыдова С. Л., Тагасов В. И. Тяжелые металлы как супертоксианты 21 века: учеб. пособие. — М., 2002. — 204 с.

21. Джувеликян Х. А., Щеглов Д. И., Горбунова Н. С. Загрязнение почв тяжелыми металлами. Способы контроля и нормирования загрязненных почв: учеб.-метод. пособие для вузов. — Воронеж: Изд-во ВГУ, 2009. — 22 с.

22. Алексеенко В. А., Суворинев А. В., Власова Е. В. Металлы в окружающей среде: оценка эколого-геохимических изменений: сборник задач / под ред. Алексеенко В. А. — М.: Логос, 2011. — 216 с.

Comprehensive assessment of heavy metal pollution of the coastal zone of the Caspian Sea in the area of Aktau suburb

N. Sh. JANALIYEVA, A. K. SERIKBAYEVA, B. S. SULEIMENOVA,
F. K. NURBAYEVA, Zh. K. ALTYBAYEVA

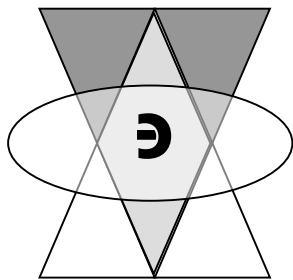
Caspian University of Technology and Engineering named after Sh. Yesenova,
Mangystau region, Aktau, Kazakhstan

A study of the marine and coastal parts of the Caspian Sea in the Mangistau region for the content of heavy metals was carried out. Based on the results, a slight change in the data was identified. The indicators of heavy metals such as nickel, cadmium, arsenic were reduced in 2021 compared to 2018, which is associated with a decrease in the anthropogenic load on the environment due to limited activities in many areas due to the pandemic.

Keywords: marine part, coastal zone, heavy metals, monitoring, soil.

Bibliography — 22 references.

Received November 24, 2022



Экологический контроль, прогнозирование

УДК 556.11

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_1_46

EDN: NVGYRP

Разведочный анализ состава и свойств речной воды с использованием нейросетевой методики

О. М. РОЗЕНТАЛЬ, д-р техн. наук

Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия

В. Х. ФЕДОТОВ, канд. хим. наук

Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Выполнен разведочный анализ гидрологических и гидрохимических характеристик потоков речной воды с использованием нейросетевых методик исследования. Контролировали временные ряды показателей состава и свойств воды реки Исеть в зоне г. Екатеринбурга. Получены результаты, свидетельствующие о существенной нейросетевой корреляции между значениями концентрации отдельных загрязняющих веществ, достигающей 0,9 и связывающей расход воды с показателями ее качества, достигающей 0,4. Высокие веса нейросвязей исследованных данных и обнаруженные корреляции указывают на необходимость пересмотра устоявшихся представлений о поведении загрязняющих веществ речного потока как о пассивном компоненте, увлекаемом течением, и свидетельствуют о протекающих здесь процессах микроструктурной самоорганизации. Полученная информация, помимо своего прямого назначения в части познания природы и свойств водных ресурсов, является необходимым условием эффективного управления их качеством и устойчивой водохозяйственной деятельности.

Ключевые слова: качество и контроль состава воды, производственные сбросы, водный след, гидрохимический створ, искусственные нейронные сети, нейросетевой анализ.

Исследование изменчивости характеристик состава и свойств пресных природных вод представляет собой плохо формализованную задачу вследствие случайной природы искомых показателей. Закономерности их динамики, необходимые для достижения водохозяйственных целей, обычно неизвестны [1], вследствие чего системы водоподготовки работают в условиях неопределенности. Нарастающие требования к водно-экологической безопасности и доступности к чистой воде все острее ставят вопрос об учете вышеуказанных закономерностей, поиск которых

из чисто познавательной задачи превращается в одну из наиболее актуальных народно-хозяйственных целей. Однако обнаружить требуемые закономерности непросто, что видно на примере исследуемой задачи, опирающейся на данные Уральского управления Росгидромета для качества воды реки Исеть на территории Свердловской области в окрестности Екатеринбурга, одного из крупнейших промышленных регионов. При этом, с учетом трудностей получения корректной водно-экологической информации, предлагается перед решением практических задач осуществлять так называемый разведочный анализ данных (РАД) — Exploratory Data Analysis (EDA) [2] путем проверки основных гипотез и предварительного описания водно-экологических характеристик с использованием искусственной нейронной сети (ИНС).

Анализировались результаты ежемесячного мониторинга гидродинамических и гидрохимических

Розенталь Олег Моисеевич, главный научный сотрудник.

E-mail: omro3@yandex.ru

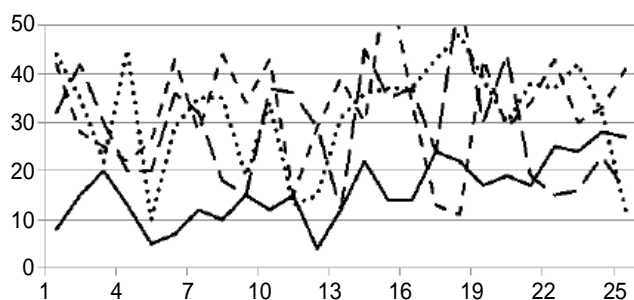
Федотов Владислав Харитонович, доцент.

E-mail: fvh@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 20 января 2023 г.

© Розенталь О. М., Федотов В. Х., 2023

показателей реки Исеть в 1990—2010 гг. на постах (см. рисунок): на 5,2 км выше Екатеринбурга (пост 1), в черте города (2), на 7 км ниже (3), на 19,1 км ниже (4). Хаотичность временных рядов, свой вклад в которую вносят сбросы сточных вод многочисленных предприятий данного высокоразвитого промышленного региона, приводит к тому, что трудно судить о закономерностях изменения контролируемых показателей. Например, вариации концентрации отдельных показателей представляются хаотичными.



Результаты мониторинга меди, мг/дм³, в окрестности Екатеринбурга на гидрохимических постах 1 (сплошная линия), 2 (длинные штрихи), 3 (короткие штрихи), 4 (точечная) в 2007—2008 гг.

Единственный вывод, который можно сделать из рисунка, заключается в том, что на всех постах рассматриваемого промышленного региона концентрация соединений меди превышает предельно допустимое значение в разы или даже в десятки раз. Еще сложнее уловить какие-либо закономерности при рассмотрении более основательных массивов данных для совокупности загрязняющих воду веществ за продолжительные отрезки времени.

Тем не менее, в [3] выдвинуто предположение, что такие закономерности существуют и определяются структурно-кинетическими характеристиками водной матрицы, а также показателями гидратации "втопленных" в нее примесей. Известно, например, что упругость сетки водородных мостиков воды способствует выталкиванию частиц примеси к местам дефектов, приводит к микроструктурной самоорганизации и микрорасслаиванию водного раствора [4, 5]. На перераспределение примесных частиц в водной матрице могут влиять также факторы гидродинамической природы [6].

Для решения задач, подобных поставленной, с учетом трудоемкости традиционных вычислений или их физической неадекватности целесообразно использовать РАД на основе методов искусственного интеллекта. Основу этих методов составляют искусственные нейронные сети (ИНС), способные обучаться на примерах (обучение с учителем) и улавливать скрытые зависимости в экспериментальных данных [7].

В данной работе перед обучением нейросети все множество исходных данных (образцов) разбивали на три подмножества: основное обучающее (*Training*) 50—70 %, проверочное (*Verifcation*) 20—30 %, и тестовое (*Test*) 10—20 %; затем производили разделение показателей на типы — входные (*Input*) и выходные (*Output*). Для обучения ИНС использовали только обучающие и проверочные образцы. Процесс

обучения состоял в численной оценке влияния входных показателей на выходные и осуществлялся с помощью линейных и нелинейных методов оптимизации (обратного распространения ошибки, псевдо-обратных) и др. Обобщающими показателями, позволяющими судить о качестве обучения ИНС, являлись коэффициенты корреляции и значения ее весовых коэффициентов. Эти показатели рассчитанные численно по критерию минимальной невязки (расхождения) между исходными и расчетными данными, и характеризовали уровень влияния входных показателей на выходные.

Методы ИНС с применением пакета программ *Statistica Neural Networks (SNN)* [8] были использованы для анализа влияния расхода воды ($\text{м}^3/\text{с}$), ее температуры ($^{\circ}\text{C}$) и концентрации взвесей ($\text{мг}/\text{дм}^3$) на концентрацию соединений железа ($\text{мг}/\text{дм}^3$) и ряда цветных металлов (все в $\text{мг}/\text{дм}^3$). Анализировали веса связей нейросетей и статистику нейрорегрессий (характеристики их точности и множественные коэффициенты корреляции Пирсона) с учетом влияющих факторов на концентрацию загрязняющих воду металлов. По каждому створу исследовали более 100 архитектур сетей — линейные (*Linear*) и нелинейные (*MLP* — многослойный персептрон и *RBF* — радиально-базисная функция). Число нейронов на входе и в промежуточном слое сети варьировалось, а на выходе — было постоянным (*Output* = 4). Параметры обучения принимались стандартными (по умолчанию). Для детального исследования выбирались "лучшие сети" (с минимальными ошибками обучения и проверки). Пример таких сетей, выбранных для анализа данных на отдельных постах, приведен в табл. 1.

По имеющимся экспериментальным данным, для каждого гидрохимического поста были получены следующие результаты:

Пост 1

- линейные и нелинейные нейросети при использовании различных алгоритмов обучения (табл. 1) примерно с одинаковой точностью улавливали возможные взаимосвязи между элементами сети;

- влияние расхода и температуры воды на концентрацию металлов оказалось невысоким (коэффициент множественной нейрокорреляции не превышал 0,2), что противоречит представлениям в [3], и обусловлено размыванием этой взаимозависимости сбросами сточных вод многочисленных предприятий промышленного региона;

- преобладающее и заметное влияние на концентрации всех металлов оказывали концентрации взвешенных частиц;

- наибольший вес связей нейросети наблюдался при оценке влияния концентраций взвешенных частиц на концентрацию железа (около 0,3);

- заметная парная линейная корреляция наблюдалась только в системе цинк-медь (порядка 0,5).

Пост 2

- линейные и нелинейные нейросети показывали примерно одинаковую точность при использовании различных алгоритмов обучения (см. табл. 1);

- влияние расхода и температуры воды на концентрацию металлов оставалось невысоким (коэф-

фициент множественной нейрокорреляции не превышал 0,25);

- преобладающее и заметное влияние на концентрации всех металлов оказывала концентрация взвешенных частиц;

- наибольший вес связей нейросети наблюдали при оценке влияния концентрации взвешенных частиц на концентрацию железа (до 0,3);

- коэффициент парной линейной корреляции в системе никель—железо превышал 0,5.

Пост 3

- линейные и нелинейные нейросети показывали примерно одинаковую точность при использовании различных алгоритмов обучения (табл.1);

- влияние расхода и температуры воды на концентрацию металлов колебалась на уровне 0,2—0,4;
- веса связей нейросети не превышали 0,2.

Пост 4

- нелинейные нейросети показывали большую по сравнению с линейными сетями точность при использовании различных алгоритмов обучения (табл. 1);

- влияние расхода и температуры воды на концентрацию металлов оставалось в среднем на уровне 0,3;

- резко и значительно повысились множественные коэффициенты нейрокорреляции между концентрациями взвешенных частиц и концентрациями всех металлов (табл. 2).

Таблица 1

Часть списка исследованных нейросетей

Створ	Type	Inputs	Hidden	Output	TErr	VErr	TErr	Training
1	Linear	3	—	4	1,033422	1,080025	1,242427	PI
1	Linear	2	—	4	1,043754	1,06573	1,247798	PI
1	Linear	1	—	4	1,046941	1,057752	1,25703	PI
1	MLP	1	13	4	1,058977	1,054971	1,254215	BP16b
1	RBF	3	5	4	0,657084	0,7416236	0,8232111	KM, KN, PI
2	Linear	1	—	4	2,170084	3,50496	2,144955	PI
2	Linear	2	—	4	2,164562	3,491677	2,139263	PI
2	Linear	3	—	4	2,159047	3,484257	2,149154	PI
2	MLP	1	58	4	2,2098	3,537591	2,143944	BP50,CG2b
2	RBF	2	2	4	1,06484	1,118505	0,8913545	KM, KN, PI
2	RBF	2	3	4	1,035794	1,026758	0,8836356	KM, KN, PI
2	RBF	2	4	4	1,016657	1,024487	0,9575305	KM, KN, PI
3	Linear	1	—	4	2,39331	1,615052	1,646507	PI
3	Linear	3	—	4	2,353616	1,612008	1,652067	PI
3	MLP	1	13	4	5,433685	4,641151	4,526982	BP0b
3	MLP	3	8	4	8,235396	7,866413	7,882506	BP0b
3	RBF	1	5	4	1,311406	0,9540401	0,9852231	KM, KN, PI
3	RBF	1	8	4	1,286999	0,9168051	1,034537	KM, KN, PI
4	Linear	3	—	4	18,2339	131,5821	42,29873	PI
4	RBF	3	5	4	7,972219	8,609732	7,46811	KM, KN, PI
4	RBF	3	11	4	2,099957	5,479589	3,541808	KM, KN, PI
4	RBF	3	13	4	1,94434	5,369001	2,664187	KM, KN, PI

Обозначения колонок табл. 1. Type — тип архитектуры сети (Linear — линейная, MLP — многослойный перцептрон и RBF — радиальная); Inputs — число нейронов на входе сети; Hidden — число нейронов в промежуточном (Hidden — скрытом) слое сети; Output — число нейронов на выходе сети; TErr — ошибка на обучающем множестве; VErr — ошибка на проверочном множестве; TErr — ошибка на тестовом множестве (ошибка прогнозирования); Training — примененные алгоритмы обучения (PI — Pseudo Invert, BP — Back Propagation, KN — Nuto и т. д.

Краткое обозначение сетей. Например, "MLP 1-13-4" означает, что эта сеть архитектуры многослойный (трехслойный) перцептрон, включающая 1 входной нейрон (Расход), 13 скрытых нейронов (не имеют точного физического смысла) и 4 выходных нейрона.

Таблица 2

Статистика нейрорегрессии для сети "RBF 3-13-4" на створе 4

Показатель	Tr. FE	Ve. FE	Te. FE	Tr. CU	Ve. CU	Te. Cu	Tr. Zn	Ve. Zn	Te. Zn	Tr. Ni	Ve. Ni	Te. Ni
Data Mean	1,286	1,102	0,708	53,14	72,66	43,72	95,11	196,96	181,06	18,67	18,91	18,95
Data S.D.	7,126	4,679	0,842	132,70	293,72	32,85	126,89	962,12	283,10	42,12	70,17	15,68
Error Mean	0	0,153	0,163	0	-18,73	2,962	0	-103,91	-85,74	0	-0,45	-1,03
Error S.D.	0,828	0,680	1,049	30,34	207,89	40,56	110,42	928,46	288,43	17,63	45,45	16,99
Abs E. Mean	0,532	0,479	0,765	22,52	46,81	30,47	64,98	187,07	151,53	10,56	13,89	12,12
S.D. Ratio	0,116	0,145	1,245	0,228	0,707	1,23	0,870	0,965	1,018	0,418	0,647	1,084
Correlation	0,993	0,989	0,024	0,973	0,986	-0,179	0,492	0,757	-0,184	0,908	0,970	0,073

Примечание. Data Mean — среднее значение концентрации на створе. Data Standard Deviation (S.D.) — стандартное отклонение (от среднего значения Data Mean) концентрации на створе. Error Mean — средняя ошибка (средняя остаточная разность между измеренными и расчетными (по нейросети) концентрациями на створе. Error S.D. — стандартное отклонение исходных данных от расчетных по нейросети. Abs E. Mean — абсолютная средняя ошибка (среднее арифметическое модулей разностей между исходным и расчетным значениями на створе). S.D. Ratio = Error S. D. / Data S. D — относительная ошибка нейрорегрессии. Correlation — коэффициент множественной корреляции.

В табл. 2 показатель Error Mean близок к нулю, т. е. нейросеть, обученная на результатах предварительных замеров, практически без ошибок воспроизводит исходные данные на этих створах. При этом разброс расчетных значений Error S. D. даже несколько меньше разброса исходных значений. Видно также, что Abs E. Mean больше Error Mean, т. е. знаки разностей измеренных и расчетных значений примерно равномерно чередуются и при вычислении Error Mean взаимно погашаются. Общая относительная ошибка нейрорегрессии S. D. Ratio для обучающего и проверочного множеств меньше единицы (особенно по Fe и Cu), т. е. стандартные отклонения по этим двум металлам существенно меньше стандартных отклонений в исходных данных. Следовательно, по этим металлам нейрорегрессия достаточно точна. О повышенной корреляции концентраций взвешенных частиц и металлов свидетельствуют также веса нейронных сетей, дополняющих и уточняющих регрессионную статистику (табл. 3).

Таблица 3

Веса связей линейной нейросети "Linear 3—4" на створе 4

Показатель	Fe	Cu	Zn	Ni
Threshold	-0,0022	-0,0206	-0,0891	-0,0283
Расход	-0,0436	-0,0492	-0,0218	-0,0493
Температура	0,0013	0,006713	0,03504	0,01035
Концентрация взвешенных частиц	0,9175	0,8965	0,6612	0,8929

Примечание: Threshold — веса невязных связей, соединяющих "пороговые" нейроны с соответствующим выходным нейроном, отражающие влияние неучтенных факторов на створе.

Из табл. 3 видно, что значения Threshold малы, что указывает на незначительность влияния неучтенных факторов. При этом отчетливо проявляется сильная взаимосвязь концентрации взвеси и металлов, что согласуется с данными табл. 2 и свидетельствует о том, что на гидрохимическом посту 4 отчетливо проявляются эффекты взаимодействия молекулярных и взвешенных частиц, регулируемые механизмами упругости сетки водородных мостиков воды, диффузии и сорбции. Одновременно фиксируется слабая, снижающаяся из-за сбросов сточных вод промышленного региона, но достоверная корреляция гидрологических и гидрохимических факторов (потока воды и концентрации примесей).

Заключение

Разведочный анализ данных с использованием методов ИНС позволил обнаружить взаимную корреляцию гидродинамических и гидрохимических характеристик водных потоков, а также взаимосвязанность в них концентрации примесей, свидетельствующую о самоорганизации изученных систем и возможности прогнозирования ее свойств.

Динамика течений жидкостей описывается системой уравнений переноса вещества, плотности, импульса и полной энергии — аналогов законов сохранения для замкнутых систем [9]. Анализ этой системы допускает формирование тонкой структуры таких слабо диссипативных систем, как многокомпонентный речной поток с растворенными в нем загрязняющими веществами [3]. Важным фактором формирования водно-экологических свойств подобной системы является упругость сетки водородных связей, ее стремление к сохранению первоначальной (гексагонально-тетраэдрической) конфигурации, способности выталкивать примеси к местам дефектов сетки и объединять их вместе, обуславливая микро-расслаивание в жидкости.

Полученные результаты позволили расширить понимание природы мелкомасштабных внутренних движений в стратифицированных водных русловых потоках, где ионно-молекулярный перенос импульса противостоит самопроизвольному выравниванию концентрации примесей [3, 6]. При этом связь между исследованными в работе показателями может быть, как слабой, так и очень высокой (коэффициент корреляции Пирсона достигает значений 0,4—0,9), что имеет существенное значение для оценки и прогноза ресурсно-хозяйственных свойств природной воды.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБУН Института водных проблем РАН (тема № FMWZ-2022-0003).

ЛИТЕРАТУРА

1. Gossweiler B., Wesström I., Messing I., Romero A. M., Joel A. Spatial and temporal variations in water quality and land use in a semi-arid catchment in Bolivia // *Water*. 2019. V. 11. № 11. P. 2227.
2. Тьюки Дж. Анализ результатов наблюдений: Разведочный анализ. — М.: Мир, 1981. — 691 с.
3. Chashechkin Yu. D., Rosental O. M. River Flow Structure and its Effect on Pollutant Distribution // *Water Resources*. 2019. V. 46(6). P. 910—918.
4. Danilov-Danilyan V. I., Rosental O. M. The properties of natural waters determined by their microstructural self-organization // *Water Resources*. 2021. V. 48(2). P. 254—262.
5. Родникова Н. Об упругости пространственной сетки водородных связей в жидкостях и растворах: сб. "Структурная самоорганизация в растворах и на границе фаз". — М.: Изд-во ЛКИ, 2008. С. 151—198.
6. Chashechkin Yu. D. Differential fluid mechanics — harmonization of analytical, numerical and laboratory models of flows // *Mathematical Modeling and Optimization of Complex Structures*. Springer Series "Computational Methods in Applied Sciences". 2016. V. 40. P. 61—91.
7. Anthony M., Bartlett P. Neural Network Learning: Theoretical Foundations. — Cambridge, New York, Cambridge University Press, 2002. — 504 p.
8. Боровиков В. П. Нейронные сети Statistica Neural Networks: Методология и технология современного анализа данных. — М.: StatSoft, 2015. — 354 с.
9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. Теоретическая физика. Т. VI. Изд. 3-е, перераб. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 736 с.

Exploratory analysis of the composition and properties of river water using neural network techniques

O. M. ROSENTHAL

Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

V. Kh. FEDOTOV

I. N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia

Exploratory analysis of hydrological and hydrochemical characteristics of water in streams using neural network research techniques were performed. For this purpose, time series of hydrochemical indicators of the water quality of the Iset River in the Yekaterinburg area were monitored. The results obtained indicate a neural network correlation linking the concentration of individual impurities in water reaching 0.9, and linking water consumption with its quality indicators reaching 0.4. The high weights of the neural connections of the studied systems and the correlations found indicate the expediency of revising the well-established ideas about the behavior of pollutants of the water stream as a passive component carried away by the current, indicate the processes of microstructural self-organization occurring here and the possibility of predicting the composition of the properties of river water by neural network methods. The information received, in addition to its direct purpose in terms of knowledge of the nature and properties of water resources, is a necessary condition for effective management of their quality and sustainable water management.

Keywords: quality, control of water composition, industrial discharges, water footprint, hydrochemical gate, artificial neural networks, neural network analysis.

Bibliography — 9 references.

Received January 20, 2023

УДК 551.52

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_1_51

EDN: NZZOAA

Энергетические особенности и пределы глобального потепления

В. В. ТЕТЕЛЬМИН, д-р техн. наук

Общественный совет при Минэнерго РФ, Москва, Россия

Приведена сводная таблица энергетических показателей глобального потепления, рассчитанных с использованием накопленных мировой наукой с 1970 г. натурных данных. Анализ показывает, что в каждом последующем десятилетии по сравнению с предыдущим увеличивается вклад положительных обратных связей в глобальное потепление. Каждый киловатт-час производимой человечеством энергии нагревает планету через антропогенный парниковый эффект на 17 кВт·ч. Предлагается рассмотреть функции зависимости мощности поглощения парниковой энергии, а также количества накопленной тепловой энергии в климатической системе от массы антропогенных парниковых газов в атмосфере. На основе предположения о квазистационарном состоянии климатической системы Земли в последней фазе ледникового периода предлагаются функции зависимости радиационно-равновесной температуры от содержания в атмосфере трех основных парниковых газов, а также от содержания диоксида углерода. Получены значения предельной температуры и содержания антропогенных парниковых газов, при котором наступает "парниковое насыщение" атмосферы, когда климатическая система перестает откликаться на их дальнейшие выбросы.

Ключевые слова: глобальное потепление, климатическая система, парниковые газы, тепловая энергия, радиационно-равновесная температура.

В последние десятилетия обнаружилось, что человек, в погоне за производством возрастающего количества энергии, опасно нагревает все земное пространство. Тысячи дымовых труб и выхлопы миллиарда автомобилей расшатывают климатическую систему (КС) Земли, основными составляющими которой являются Мировой океан (МО), атмосфера и суша. Годовые выбросы мировой экономикой основных парниковых газов (ПГ) примерно следующие: CO₂ — около 38 млрд т.; CH₄ — 330 млн т.; N₂O — 8,2 млн т. Более 80 % диоксида углерода выбрасывается сжиганием ископаемого топлива, 15 % — в сфере землепользования и 4 % — при производстве цемента. Гипертрофированная зависимость мировой энергетики от ископаемого топлива привела за индустриальный период к общему выбросу в атмосферу более 2,4 трлн т. основного парникового газа CO₂, из которых около половины усваивается мировой растительностью и Мировым океаном, а вторая половина антропогенных выбросов аккумулируется атмосферой.

Современная наука предсказывает поджидающие человечество опасности и призывает промышленность постепенно отходить от использования ископаемого топлива с переходом на использование возоб-

новляемой гидравлической, ветровой и солнечной энергии. Парижское соглашение к Рамочной Конвенции ООН об изменении климата направлено на ограничение к 2050 г. роста глобальной температуры максимальным значением 2 °C сверх доиндустриального уровня. Для достижения этой цели предлагается в ближайшие 30 лет в два раза сократить выбросы ПГ. Однако при современных рассогласованных действиях мирового сообщества достичь "углеродной нейтральности" к 2050 г., по всей видимости, не удастся.

Для прогноза глобального потепления и определения радиационно-равновесной температуры T_{\max} строятся математические модели энергетического баланса (ЕВМ), учитывающие соотношение между физическими свойствами составляющих КС Земли: Мирового океана, суши и атмосферы. Главным начальным условием в этих моделях является назначаемое дополнительное тепловое излучение ПГ от 2,6 до 8,5 Вт/м², воспринимаемое земной поверхностью. Полученные решения дают большой разброс результатов. Например, из результатов расчетов семи климатических сценариев следует, что при содержании в атмосфере антропогенных выбросов $K = 550$ ppm-eq оценка значений соответствующей T_{\max} составляет от 2 до 4,5 °C, а при $K = 800$ ppm-eq еще больше — от 3 до 7 °C [1]. Не случайно многие авторы [2] замечают, что "сценарные прогнозы МГЭИК очень условны и неясно какой из них будет ближе к реальности".

Тетельмин Владимир Владимирович, профессор.

E-mail: v-tetelmin@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2022 г.

© Тетельмин В. В., 2023

Принимая во внимание сказанное, автор предпринял попытку получить аналитическое решение задачи глобального потепления, опираясь на многочисленные натурные данные, накопленные мировой наукой. В настоящей статье проведены энергетический анализ особенностей глобального потепления как первый этап на подходе к получению аналитического решения по определению темпа, продолжительности и пределов глобального потепления.

Методы и материалы

Автор использует эмпирический подход к расчету и определению закономерностей теплообмена между ПГ и климатической системой Земли, основанный на анализе накопленных мировой наукой натурных данных и публикациях.

Основными показателями происходящих изменений в климатической системе являются: выбросы парниковых газов [3, 4], сопутствующие производству антропогенной энергии [5, 6]; повышение средней глобальной температуры атмосферы, заметный рост которой начался с 1910 г. [7]; увеличение накопленной в климатической системе Земли тепловой энергии [8]; данные изменений климата в ледниковые периоды [9, 10]; увеличение частоты природных стихийных бедствий [11, 12].

В докладе Межправительственной группы экспертов ООН по изменению климата приводится кривая роста накопленной парниковой тепловой энергии с 1970 по 2010 гг. [8], свидетельствующая о том, что за эти 40 лет КС накопила тепловую энергию в количестве $265 \cdot 10^{21}$ Дж ($73,6 \cdot 10^{15}$ кВт·ч). Это результаты регулярных исследований температуры различных слоев воды во всех частях Мирового океана, а также температуры атмосферы и суши. С использованием систематизированных автором и обработанных натурных данных выполнены расчеты основных энергетических характеристик процесса глобального потепления, представленные в виде таблиц и рисунков. Выявлены основные особенности и закономерности энергообмена между парниковыми газами атмосферы и климатической системой Земли за период 1970—2020 гг. Выявленные закономерности представлены в виде графиков и аналитических функций, экстраполяция которых позволяет рассчитывать темпы и пределы будущего глобального потепления при различных сценариях антропогенных выбросов ПГ.

Результаты

Основные процессы, последовательно участвующие в изменении глобального климата Земли на протяжении последних полутора веков человеческой истории, представлены в табл. 1. Здесь и далее массовое и объемное содержание трех основных ПГ в атмосфере (CO_2 , CH_4 , N_2O) приведены в единицах, эквивалентных потенциалу глобального потепления диоксида углерода GWP (т-eq и ppm-eq). Приведенные процессы характеризуются тесными причинно-следственными связями, когда каждый последующий процесс обусловлен действием предыдущего.

Таблица 1

Основные результаты энергетического воздействия современной цивилизации на климатическую систему Земли, накопленные к 2020 г.

Параметры процессов	Значения
Накопленное за индустриальный период мировое производство антропогенной энергии	$8,3 \cdot 10^{15}$ кВт·ч
Накопленные в атмосфере антропогенные выбросы трех основных парниковых газов	$1,36 \cdot 10^{12}$ т-eq / 182 ppm-eq
Накопленная в КС/и в атмосфере тепловая энергия ИК-излучения антропогенных парниковых газов	$140 \cdot 10^{15}$ кВт·ч / $1,8 \cdot 10^{15}$ кВт·ч
Количество отмеченных с 1970 г. случаев учащающихся спровоцированных глобальным потеплением гидрометеорологических стихийных бедствий (СГМ-событий)	10060

Замкнутый энерго-климатический цикл процессов производства энергии, выбросов ПГ и их разрушительных последствий можно схематично представить в виде "красного квадрата", в вершинах которого расположены четыре приведенных энергетических процесса (рис. 1) [13]. Неотложная задача человечества состоит в том, чтобы разорвать этот цикл следующих друг за другом опасных глобальных процессов, провоцирующих возникновение гидрометеорологических и других стихийных бедствий и катастроф.

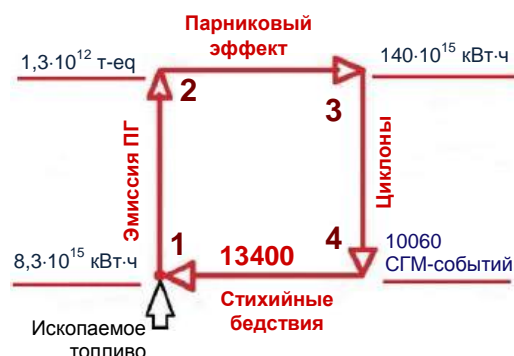


Рис. 1. Замкнутый энерго-климатический цикл процессов производства энергии с использованием ископаемого топлива и последствий глобального потепления:

1 — производство энергии с использованием ископаемого топлива; 2 — накопление в атмосфере парниковых газов; 3 — накопление в климатической системе Земли тепловой энергии; 4 — отмеченные с 1970 г. спровоцированные глобальным потеплением гидрометеорологические (СГМ-события) и другие стихийные бедствия и катастрофы

Мировое производство глобальной энергии приближается к $180 \cdot 10^{12}$ кВт·ч/год, а суммарное количество антропогенной энергии произведенное за последние полтора века достигло $8,3 \cdot 10^{15}$ кВт·ч (вершина 1 квадрата, рис. 1). Около 83 % глобальной энергии производится с использованием ископаемого топлива в количестве 11 млрд т нефтяного эквивалента в год, в результате к 2020 г. в атмосфере накоплено около $1360 \cdot 10^9$ т-eq (182 ppm-eq) антропогенных парниковых газов (вершина 2 квадрата, рис. 2). По мнению автора наиболее вероятным сценарием планируемого сокращения глобальных выбросов представляется следующий: содержание антропогенных ПГ в атмосфере удастся стабилизировать к 2060 г. на уровне около $1750 \cdot 10^9$ т-eq (233 ppm-eq).

Результатом выбросов антропогенных ПГ в атмосферу явилась накопившаяся в КС Земли парниковая тепловая энергия в количестве около $140 \cdot 10^{15}$ кВт·ч (вершина 3 квадрата, рис. 1). Можно сказать, что "энерго-климатическая цена" использования человеком ископаемого топлива оказалась очень высокой: каждый киловатт-час произведенной энергии ускоренно нагревает нашу планету, обеспечивая накопление в климатической системе Земли более 17 кВт·ч парниковой тепловой энергии. Главным аккумулятором накопленной тепловой энергии является Мировой океан — около 94 %, на сушу приходится около 5 %, на атмосферу — около 1,0 % энергии.

По мере роста глобальной температуры активизируются спровоцированные потеплением опасные гидрометеорологические (СГМ-события) и другие природные стихийные бедствия (вершина 4 квадрата, рис. 1). По силе воздействия на экономику СГМ-события выходят на первое место: на тропические циклоны и приносимые ими осадки и наводнения приходится 32 %; на землетрясения — 12 %, на засухи — 10 % природных катастроф. Только в период 2000—2010 гг. отмечено 1260 метеорологических, 1944 гидрологических, 349 геофизических и 283 климатических стихийных бедствий [14]. Средняя энергия типичного тропического циклона составляет около $0,3 \cdot 10^{12}$ кВт·ч, что соответствует энергии взрыва 250 мегатонных бомб в тротиловом эквиваленте. Кинетическая энергия ураганов, штормов, тайфунов ежегодно увеличивается как за счет увеличения скорости ветра, так и за счет увеличения продолжительности их жизни. Можно предположить, что в будущем, по мере роста накопленной в КС Земли тепловой энергии, отдельные долгоживущие тропические циклоны будут плавно переходить один в другой и формировать постоянно действующие циклоны, как это наблюдается, например, на горячей Венере.

На рис. 2 приведена кривая роста накопленной КС Земли тепловой энергии парниковых газов, построенная с использованием соответствующего графика из доклада МГЭИК, полученного на основе инструментального и спутникового мониторинга температуры в разных средах в период 1970—2010 гг. [8]. С использованием графика рис. 2 выполнены

расчеты и сведены в табл. 2 основные энергетические характеристики процесса глобального потепления, накопленные мировой наукой в течение последних 50 лет наблюдений за КС Земли. Приведенные энергетические параметры глобального потепления и график роста аккумулированной КС тепловой энергии являются результатом радиационной и нерадиационной передачи парниковой тепловой энергии климатической системе Земли, включая все виды положительных и отрицательных обратных связей.

Из рис. 2 и табл. 2 следует, что в каждом последующем десятилетии КС Земли накапливала все возрастающее количество тепловой энергии, при этом эффективность поглощения тепла единицей содержания ПГ в атмосфере увеличивалась. В относительных показателях рост накопленного КС тепла опережал рост накопленных выбросов ПГ. Например, в период 2010—2020 гг. накопленная масса ПГ в атмосфере по сравнению с 1970—1980 гг. увеличилась почти в два раза (117 %), а накопленная КС тепловая энергия при этом увеличилась более чем в три раза (216 %).

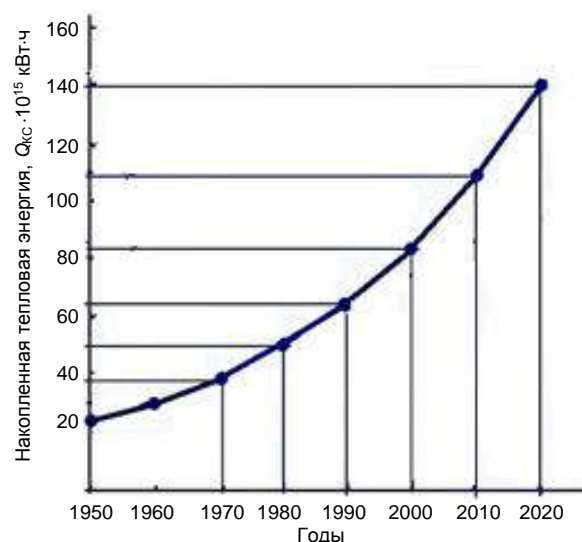


Рис. 2. Увеличение количества парниковой тепловой энергии, аккумулированной климатической системой Земли за период времени 1950—2020 гг.

Таблица 2

Накопленные выбросы антропогенных парниковых газов в атмосфере и энергетические характеристики процесса глобального потепления за последние 50 лет наблюдений за климатической системой (КС) Земли

Годы	Рост содержания выбросов антропогенных ПГ в атмосфере, $M \cdot 10^9$ т-экв/К ppm-eq	Рост содержания тепла в КС, $\Delta Q_{КС} \cdot 10^{15}$ кВт·ч/10 лет	Рост температуры атмосферы, ΔT град/10 лет	Эффективность поглощения тепла КС, $q \cdot 10^{12}$ кВт·ч/год ppm-eq	Поглощаемая КС мощность тепловой парниковой энергии, i Вт/м ²	Вклад положительных обратных связей в накопление тепла в КС относительно 1970—1980 гг., $\times 10^{15}$ кВт·ч/10 лет
1970—1980	581/77,5	10,6	0,165	13,7	0,23	0
1980—1990	760/101,4 (31 %)	14,6 (38 %)	0,170	14,4	0,31	0,71 (4,9 %)
1990—2000	907/121,0 (56 %)	19,6 (85 %)	0,175	16,2	0,42	3,03 (15,5 %)
2000—2010	1057/141,4 (87 %)	26,0 (143 %)	0,180	18,4	0,58	6,69 (25,7 %)
2010—2020	1267/168,6 (117 %)	33,5 (216 %)	0,185	19,9	0,75	10,8 (32 %)

Наблюдаемый рост "парниковой эффективности" каждой единицы содержания ПГ объясняется улучшением условий передачи тепловой энергии Мировому океану (МО) и КС в целом за счет увеличения вклада в глобальное потепление всех видов усиливающих положительных обратных связей. Например, в период 2000—2010 гг. вклад положительных обратных связей в общее потепление составил $6,69 \cdot 10^{15}$ кВт·ч (25,7 %), а в следующий период 2010—2020 гг. этот вклад увеличился до $10,8 \cdot 10^{15}$ кВт·ч (32 %). Видимо, не случайно десятилетие 2011—2020 гг. было самым теплым за всю историю наблюдений [15].

Наиболее значимыми факторами проявления положительных обратных связей помимо снижения альбедо являются: усиление циклонической деятельности и конвективного переноса тепла из тропиков в высокие широты [11]; деградация криолитозоны арктического шельфа и тундры с выбросом метана из газогидратных кластеров [16]; увеличение абсолютной влажности сухого арктического воздуха, сопровождающееся увеличением регионального парникового эффекта [17].

В отличие от большинства ПГ водяной пар неравномерно распределен по земной поверхности, его средняя концентрация в атмосфере составляет 0,4 %. Чем ниже температура воздуха, тем меньше он способен удерживать влагу. Например, в вертикальном столбе атмосферы тропического пояса может содержаться до 60 кг/м^2 влаги, а в столбе холодной арктической атмосферы обычно содержится влаги в 5—6 раз меньше [18]. При 20°C максимальная абсолютная влажность воздуха достигает $17,2 \text{ г/м}^3$, а при 0°C — всего $4,8 \text{ г/м}^3$, поэтому в Арктическом поясе водяной пар из-за его низкого содержания в атмосфере не в полной мере реализует свой парниковый потенциал. Привнесение сюда из тропиков внешнего тепла и осадков повышает влагонасыщение атмосферы, усиливает парниковый эффект в этом регионе, ограничивает отправку ИК-излучения в Космос и тем самым обеспечивает "арктическое усиление". По этой причине с 1991 г. средняя температура в Арктической зоне повысилась на $2,64^\circ\text{C}$ [15]. Арктическое усиление является одним из наиболее сильных факторов опережающего потепления, наблюдаемого на территории России ($0,45^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$) и в Арктической зоне ($0,75^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$).

По данным табл. 2 построены графики зависимости энергии $\Delta Q_{\text{КС}}$, полученной КС за каждый 10-летний период наблюдений, и мощности поглощения КС парниковой энергии от концентрации антропогенных ПГ в атмосфере (рис. 3). Все полученные точки ложатся на прямые линии. Аналитическое выражение графика 1 представляется следующей функцией:

$$\Delta Q_{\text{КС}} = q(K - 55)\Delta t, \text{ кВт·ч} \quad (1)$$

где $q = 29,8 \cdot 10^{12}$ кВт·ч/(ppm·eq)·год — удельная интенсивность поглощения КС парниковой тепловой энергии; K (ppm·eq) — среднее значение концентрации антропогенных ПГ в атмосфере в расчетном периоде времени Δt .

Функция (1), определяющая количество полученной КС Земли тепловой энергии за время Δt , спра-

ведлива при изменении аргументов в следующих пределах: $80 \text{ ppm·eq} \leq K$; $1 \text{ год} \leq \Delta t \leq 10 \text{ лет}$.

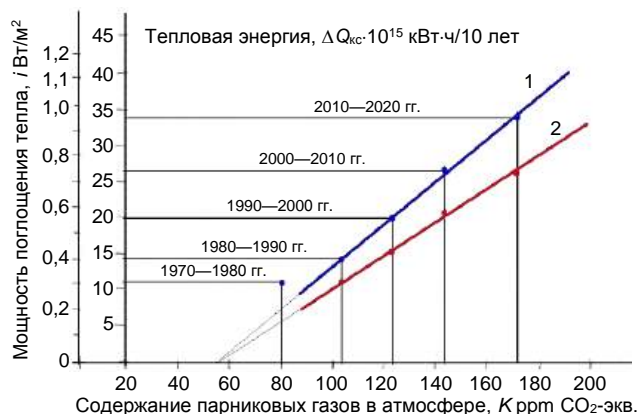


Рис. 3. Изменение количества накопленной тепловой энергии в КС Земли в каждом последующем 10-летии (1) и мощности поглощения тепла (2) в зависимости от содержания в атмосфере антропогенных ПГ

Физический смысл коэффициента q заключается в том, что он является тепловой энергией, получаемой КС Земли от единицы концентрации ПГ в атмосфере в течение одного года. Ценность этого показателя в том, что он определяет реальную интенсивность передачи парниковой тепловой энергии Мировому океану и КС в целом с учетом всех происходивших на Земле в период 1970—2020 гг. обменных энергетических процессов, включая положительные и отрицательные обратные связи.

Из табл. 2 следует, что в наблюдаемый период 1970—2020 гг. реальная мощность поглощения тепловой энергии ПГ климатической системой Земли увеличилась от $i = 0,23$ до $0,75 \text{ Вт/м}^2$ при увеличении среднего значения концентрации ПГ в атмосфере от 77,5 до 168,6 ppm·eq. Содержание выбросов в этот период времени увеличилось примерно в 2 раза, а мощность нагревания КС увеличилась более чем в три раза, что также свидетельствует об усилении с течением времени эффективности действия парникового эффекта в климатической системе Земли. Как уже отмечено выше, за счет опережающего роста положительных обратных связей нагревание КС в каждое последующее десятилетие происходило быстрее, чем происходило накопление выбросов ПГ. Зависимость мощности i реального поглощения КС парниковой тепловой энергии от концентрации антропогенных ПГ в атмосфере (рис. 3) описывается следующей линейной функцией:

$$i = k(K - 55), \text{ Вт/м}^2 \quad (2)$$

где коэффициент $k = 6,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ppm·eq)}$ — мощность поглощения Мировым океаном и КС в целом тепловой энергии, формируемая единицей содержания антропогенных ПГ в атмосфере.

С помощью выражений (1) и (2) можно найти прямую связь между мощностью i реального поглощения тепловой энергии ПГ и количеством аккумулированного КС тепла:

$$\Delta Q_{\text{КС}} = 4,5 \cdot 10^{15} i, \text{ кВт·ч/год.} \quad (3)$$

Если к 2060 г. масса антропогенных ПГ в атмосфере достигнет вероятного уровня $1,75 \cdot 10^{12}$ т-eq (233 ppm-eq), то в соответствии с (2) мощность поглощения КС парниковой тепловой энергии в 2060 г. составит $i = 1,17$ Вт/м², а в соответствии с (1) количество тепловой энергии, которую получит КС в 2060 г., составит $5,3 \cdot 10^{15}$ кВт·ч/год. Всего за период с 1970 по 2060 гг. к моменту предполагаемого достижения "углеродной нейтральности" КС получит около 318×10^{15} кВт·ч парниковой тепловой энергии, которая приведет к дополнительному изменению глобального климата.

После достижения "углеродной нейтральности" к 2060 г. и при дальнейшем постоянном содержании ПГ в атмосфере климатическая система Земли будет в течение продолжительного времени приближаться к некоторому предельному значению температуры T_{\max} , соответствующей радиационно-равновесному состоянию системы "Земля—Космос". Сила воздействия единицы массы ПГ на глобальное потепление зависит от их содержания в атмосфере. Спектры поглощения отдельных ПГ частично пересекаются, поэтому поглощение отраженного земной поверхностью ИК-излучения смесью ПГ не обладает свойством аддитивности. Поступающая в атмосферу дополнительная масса ПГ поглощает только ту часть ИК-излучения, которая не была поглощена уже присутствующим в атмосфере этим газом. Например, добавление новых порций CO₂ оказывает меньшее воздействие на потепление, потому что им приходится конкурировать с ранее поступившим в атмосферу этим газом за излучение в диапазонах длин волн 4,0—4,5 мкм и 14—19 мкм, а также конкурировать с N₂O в области спектра от 4,0—4,5 мкм и с N₂O и CH₄ в районе длин волн 3 мкм.

Приемлемые для прикладных расчетов значения радиационно-равновесной температуры T_{\max} можно получить, используя свойство тесной корреляции между средней глобальной температурой и объемным содержанием парниковых газов в квазистационарном состоянии КС Земли в последней фазе ледникового периода. На рис. 4 приведены графики изменения глобальной температуры и концентрации диоксида углерода в последний ледниковый период [19]. При этом независимо от того, что было в тот период первичным — изменение глобальной температуры, вслед за которым изменялась концентрация ПГ в атмосфере, или наоборот, осредненные значения температуры и концентрации ПГ изменялись согласованно.

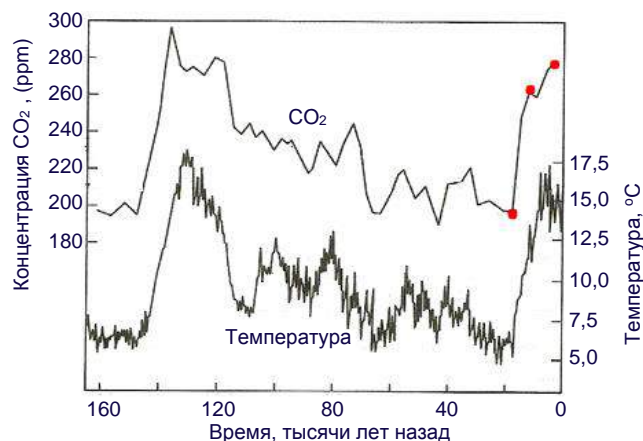


Рис. 4. Ход изменения глобальной температуры и концентрации диоксида углерода в атмосфере за последние 160 тыс. лет и три расчетные точки, соответствующие трем квазистационарным состояниям климатической системы Земли

В последний ледниковый период глобальная температура земной атмосферы изменялась в диапазоне 5,8—16,4 °C; концентрация диоксида углерода CO₂ в диапазоне 190—290 ppm; метана CH₄ в диапазоне 0,35—0,70 ppm; закиси азота N₂O — в диапазоне 0,20—0,27 [9].

В доиндустриальный период средняя концентрация каждого из этих ПГ в атмосфере составляла: CO₂ — 280 ppm, CH₄ — 0,7 ppm, N₂O — 0,27 ppm. В 2020 г. содержание этих газов в атмосфере повысилось до значений: CO₂ — 415 ppm, CH₄ — 1,88 ppm, N₂O — 0,335 ppm. Во всех трех приведенных случаях соотношение содержания CO₂ и общего содержания трех основных ПГ в атмосфере в CO₂-зкв. (eq) оставалось практически постоянным и составляло в среднем 75 %. В дальнейших рассуждениях и расчетах будем принимать во внимание следующие соотношения [3]:

- в доиндустриальном периоде объемное содержание трех ПГ в атмосфере составляло $K_{\Sigma} = 370$ ppm-eq; соответствующее массовое содержание $M_{\Sigma} = 2,86 \cdot 10^{12}$ т-eq; соответствующая доля в формировании радиационно-равновесной температуры 9,4 из 33,4 °C;

- в доиндустриальном периоде объемное содержание диоксида углерода составляло $K = 280$ ppm; соответствующее массовое содержание $M = 2,24 \cdot 10^{12}$ т; соответствующая доля в формировании радиационно-равновесной температуры 7,2 из 33,4 °C.

Таблица 3

Натурные данные средней глобальной температуры палеоатмосферы для трех моментов времени в предположении квазистационарного состояния климатической системы Земли при разном содержании в атмосфере основных парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O)

Период, тыс. лет назад	Содержание CO ₂ в атмосфере, K ppm	Содержание трех ПГ в атмосфере, K ppm-eq	Содержание трех ПГ в атмосфере M, 10 ¹² т-eq	Нагрев атмосферы всеми ПГ, град	Доля нагрева тремя ПГ, T _{max} град	Доля нагрева одним CO ₂ , T _{max} град
20—18	193	261	2,04	24,8	7,0	5,35
12—10	262	346	2,71	32,0	8,80	6,90
8—0	280	369	2,89	33,4	9,40	7,20

Планета Земля в период своей истории 20—8 тыс. лет назад медленно выходила из ледникового периода после возвращения орбиты от эксцентриситета 0,042 и значения солнечной постоянной 1300 Вт/м² к современным значениям эксцентриситета орбиты 0,017 и солнечной постоянной 1368 Вт/м² [20]. Скорость естественного потепления планеты на стадии её продолжительного выхода из ледникового периода была в 22 раза меньше современного глобального потепления. По причине малой скорости этого процесса, длившегося 12 тыс. лет, можно считать, что в этот период КС Земли последовательно проходила через ряд квазистационарных термодинамических состояний [10]. В таком случае можно принять, что на каждый момент времени соотношение средней глобальной температуры и концентрации ПГ в атмосфере примерно отвечало состоянию радиационного баланса КС. Подобное допущение позволяет получить соотношения радиационно-равновесной температуры T_{\max} и соответствующей концентрации K для трех отмеченных на рис. 4 квазистационарных состояний КС. Рассчитанные значения радиационно-равновесной температуры атмосферы при трёх разных концентрациях ПГ приведены в табл. 3.

Полученные результаты подтверждают известную закономерность, что по мере насыщения атмосферы ПГ радиационная эффективность единицы их содержания в атмосфере (T_{\max}/K) снижается. Данные табл. 3 позволяют получить квадратичные аналитические зависимости параболического типа между радиационно-равновесной температурой атмосферы T_{\max} и содержанием в ней парниковых газов.

Функция зависимости радиационно-равновесной температуры от общего объемного содержания ПГ в атмосфере имеет следующий вид:

$$T_{\max} = (30 \cdot 10^{-3} - 12,3 \cdot 10^{-6} \cdot K_{\Sigma}) K_{\Sigma}, \text{ град.} \quad (4)$$

Здесь $K_{\Sigma} = (K + 370)$ ppm-eq — общее содержание ПГ в атмосфере, как сумма объемного содержания антропогенных выбросов K ppm-eq и доиндустриального содержания трех основных ПГ.

В начале индустриального периода, когда антропогенные выбросы отсутствовали, ($K = 0$), из (4) получаем известный вклад трех основных ПГ — 9,4 °C в общую радиационно-равновесную температуру $T_{\max} = 33,4$ °C, которая наблюдалась в доиндустриальную эпоху в естественном состоянии КС Земли [3]. Исследуя функцию (4) на экстремум, получаем значение общего содержания ПГ, при котором возможно наступление "парникового насыщения" атмосферы: $K_{\text{НАС}} = 1220$ ppm-eq. Этому значению соответствует максимальная температура глобального потепления (температура насыщения) от действия трех основных ПГ $T_{\text{НАС}} = 18,3$ °C.

Вклад выбросов антропогенных ПГ в приведенные насыщающие значения концентрации и температуры атмосферы соответственно следующий: $K_{\text{АН НАС}} = 850$ ppm-eq; $T_{\text{АН НАС}} = 8,9$ °C. При более высоких значениях содержания ПГ атмосфера потеряет "парниковую чувствительность" и перестанет откликаться

повышением температуры на дальнейшие выбросы.

При современных параметрах орбиты Земли, когда планета находится в комфортном для жизни состоянии межледникового периода, из функции (4) для общего содержания ПГ получаем функции зависимости радиационно-равновесной температуры атмосферы от содержания антропогенных выбросов ПГ.

Для антропогенных выбросов трех основных ПГ из (4) получаем:

$$T_{\max} = (20,9 \cdot 10^{-3} - K - 12,3 \cdot 10^{-6} \cdot K^2), \text{ град} \quad (5)$$

где K (ppm-eq) — объемное содержание в атмосфере антропогенных выбросов ПГ.

Выражение (5) можно представить как функцию зависимости радиационно-равновесной температуры атмосферы от содержащейся в атмосфере массы выбросов ПГ:

$$T_{\max} = (2,79 \cdot 10^{-12} - M - 0,22 \cdot 10^{-24} \cdot M^2), \text{ град} \quad (6)$$

где M т-eq — массовое содержание в CO₂-экв. в атмосфере выбросов ПГ.

Функции (5) и (6) позволяют определять:

- предельную температуру глобального потепления, которая установится на Земле в будущем при сохранении сегодняшней концентрации ($K = \text{Const}$) или сегодняшней массы ($M = \text{Const}$) ПГ в атмосфере;
- содержание концентрации или массы ПГ в атмосфере в прошлом, которые способны обеспечить нагревание КС до сегодняшней текущей температуры, соответствующей радиационно-равновесной температуре для некоторых значений M или K в прошлом. Любая сегодняшняя текущая неравновесная температура одновременно является радиационно-равновесной для некоторого содержания ПГ в прошлом.

Каждая выброшенная в атмосферу масса ПГ обеспечивает радиационное усиление — определенную порцию перехвата отраженной земной поверхностью тепловой энергии ИК-излучения. В рассматриваемом периоде 1970—2020 гг. каждому более высокому содержанию антропогенных ПГ соответствовала более высокая радиационно-равновесная температура T_{\max} (5) и (6), а также более высокая мощность энергии радиационного усиления J_{\max} . С помощью выражения (5) и уравнения Стефана-Больцмана [21] получаем функцию зависимости мощности радиационного усиления J_{\max} от содержания антропогенных ПГ в атмосфере:

$$J_{\max} = (9,87 \cdot 10^{-2} K + 1,5), \text{ Вт/м}^2. \quad (7)$$

Часть мощности тепловой энергии радиационного усиления J_{\max} , циркулирующей между барьером из ПГ в атмосфере и земной поверхностью, поглощается КС Земли, обеспечивая реальное глобальное потепление. Из уравнений (2) и (7) находим долю i мощности радиационного усиления, которую поглощала КС в рассматриваемый период времени:

$$i = 67 \cdot 10^{-3} (J_{\max} - 7), \text{ Вт/м}^2. \quad (8)$$

На рис. 5 приводятся графики функций (7) и (8), из которых, например, следует, что по мере роста содержания антропогенных ПГ радиационное усиление J_{max} в период 1980—2020 гг. увеличилось с 10,6 до 19,5 Вт/м², а соответствующая интенсивность реального поглощения КС тепла — с 0,24 до 0,83 Вт/м², что составляет 2,7—4,1 % от потока энергии радиационного усиления.

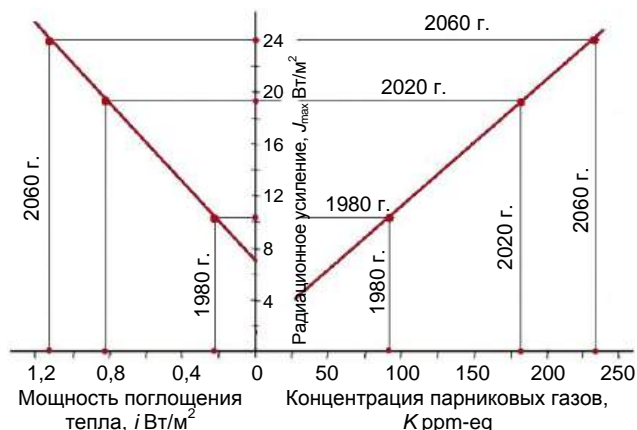


Рис. 5. Зависимость энергии радиационного усиления (1) от концентрации антропогенных ПГ в атмосфере, а также мощности поглощения тепловой энергии парниковой тепловой энергии от радиационного усиления (2)

По данным табл. 3 получаем следующую квадратичную функцию влияния **общего** содержания CO_2 в атмосфере на радиационно-равновесную температуру:

$$T_{\text{max}} = (32 \cdot 10^{-3} - 23 \cdot 10^{-6} \cdot K_{\Sigma}) K_{\Sigma}, \text{ град.} \quad (9)$$

Здесь $K_{\Sigma} = (K + 280 \text{ ppm})$ — общее содержание CO_2 в атмосфере как сумма его антропогенных выбросов K и его доиндустриального содержания.

Для антропогенных выбросов диоксида углерода из функции (9) получаем:

$$T_{\text{max}} = (19,2 \cdot 10^{-3} - K - 23 \cdot 10^{-6} \cdot K^2), \text{ град} \quad (10)$$

где K ppm — объемное содержание в атмосфере антропогенных выбросов диоксида углерода.

В начале индустриального периода, когда антропогенных выбросов ещё не было ($K_{\Sigma} = 280 \text{ ppm}$), из (9) получаем известный температурный вклад CO_2 — 7,2 °C в общую радиационно-равновесную температуру $T_{\text{max}} = 33,4$ °C, которая наблюдалась в доиндустриальную эпоху. Исследуя функцию (9) на экстремум, получаем значение общего содержания CO_2 в смеси ПГ, при котором может наступить "парниковое насыщение" атмосферы: $K_{\text{HAC}} = 698 \text{ ppm}$. Этому абсолютному значению концентрации соответствует общий вклад CO_2 в максимальную температуру глобального потепления $T_{\text{HAC}} = 11,2$ °C.

Вклад выбросов антропогенного CO_2 в насыщающее значение концентрации ПГ и соответствующую температуру атмосферы соответственно следующий: $K_{\text{АН HAC}} = 418 \text{ ppm}$; $T_{\text{АН HAC}} = 4$ °C (рис. 6). При более высоком содержании CO_2 атмосфера потеряет "парниковую чувствительность" к этому газу и перестанет

откликаться повышением температуры на его дальнейшие выбросы.

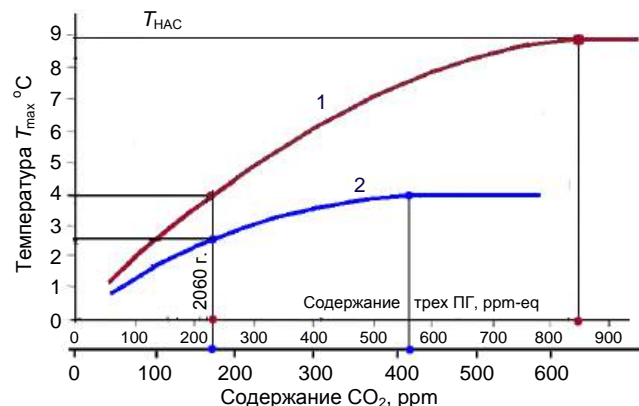


Рис. 6. График зависимости радиационно-равновесной температуры атмосферы от содержания в ней антропогенных выбросов ПГ:

1 — для выбросов трех основных парниковых газов;
2 — для выбросов диоксида углерода

На рис. 6 приведены графики функций (5) и (10), ход которых качественно отвечает ходу соответствующих графиков, приведенных в работе [4], в которой отмечается, что "увеличение концентрации CO_2 будет иметь все меньшее значение в аспекте усиления парникового эффекта". Если к 2060 г. человечеству удастся зафиксировать массу трех основных антропогенных ПГ в атмосфере на постоянном уровне $1750 \cdot 10^9 \text{ т-eq}$ (233 ppm-eq), то с течением времени средняя глобальная температура выйдет на уровень T_{max} , отвечающий состоянию радиационного баланса. Эффект глобального потепления от антропогенных выбросов ПГ является отложенным во времени. Аналогично любое снижение содержания ПГ в атмосфере не вызовет мгновенного падения глобальной температуры. В соответствии с выражением (5) глобальное потепление будет прогрессировать до достижения предельной температуры $T_{\text{max}} = 4,2$ °C, из которой на долю CO_2 будет приходиться около 2,6 °C (рис. 6). На тот момент общий нагревательный потенциал смеси основных ПГ (CO_2 , CH_4 , N_2O) будет использован на 74 %, а нагревательный потенциал диоксида углерода на 87 %. Таким образом, следование обозначенной Парижским соглашением "климатической повестке" и фиксация к 2060 г. содержания антропогенных ПГ в атмосфере на уровне $1750 \cdot 10^9 \text{ т-eq}$ предотвратят в будущем возможное дополнительное нагревание атмосферы примерно на 4,7 °C, из которых на долю диоксида углерода будет приходиться нереализованных около 1,4 °C.

Выводы

Энерго-климатическая цена использования человечеством ископаемого топлива и выбросов ПГ очень высокая: каждый киловатт-час произведенной за последние 150 лет глобальной энергии нагревает планету Земля на 17 кВт·ч.

Рост накопленной климатической системой тепловой энергии парниковых газов примерно в 1,5 раза опережает рост накопленных в атмосфере их выбро-

сов, что объясняется увеличением вклада в глобальное потепление положительных обратных связей: усиление циклонической деятельности; деградация криолитозоны с выбросом метана; "арктическое усиление" и др.

В период с 1970 по 2060 гг. к моменту предполагаемого достижения "углеродной нейтральности" планета Земля получит около $318 \cdot 10^{15}$ кВт·ч парниковой тепловой энергии, которая приведет к существенному изменению глобального климата.

По мере роста глобальной температуры активизируются спровоцированные глобальным потеплением опасные гидрометеорологические (СГМ-события) и другие стихийные бедствия, которые по силе воздействия на мировую экономику выходят на первое место.

Количественный анализ параметров квазистационарного состояния климатической системы Земли в последней фазе последнего ледникового периода позволил получить приемлемые для прикладных расчетов функциональные зависимости радиационно-равновесной температуры от содержания в атмосфере антропогенных парниковых газов.

Предлагаются следующие расчетные эмпирические функции:

- зависимость мощности поглощения и количества аккумулированной климатической системой тепловой энергии парниковых газов от их содержания в атмосфере;
- зависимость мощности радиационного усиления от содержания антропогенных парниковых газов в атмосфере.

Если человечество достигнет к 2060 г. "углеродной нейтральности" и зафиксирует содержание антропогенных парниковых газов на уровне $1750 \cdot 10^9$ т-eq (233 ppm-eq), то в соответствии с этим сценарием глобальное потепление будет прогрессировать до достижения радиационно-равновесной температуры 4,2 °С. Достижение к 2060 г. целей Парижского соглашения предотвратит в будущем возможность дополнительного нагревания атмосферы примерно на 4,7 °С.

Предлагаемые аналитические зависимости позволяют при любом сценарии выбросов парниковых газов выстроить алгоритм расчета темпа и продолжительности глобального потепления до достижения климатической системой состояния радиационного равновесия с космическим пространством.

Человечество отдает себе отчет в том, что намечаемое и проводимое ограничение глобальных выбросов парниковых газов является экономически затратным процессом и его осуществление возможно только за счет снижения мирового экономического роста. В данном случае необходимо сопоставить экономическую цену предпринимаемых человеческим усилием по достижению "углеродной нейтраль-

ности" и сдерживанию опасного глобального потепления с последствиями неограниченных выбросов парниковых газов и неконтролируемого роста частоты и силы спровоцированных стихийных бедствий и катастроф.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Силвер Дж.** Глобальное потепление без тайн / Пер. с англ. — М.: ЛЕНАНД, 2009. — 480 с.
2. **Федоров В. М., Алтуни И. В., Фролов Д. М.** Влияние диоксида углерода антропогенного генезиса на термический режим атмосферы и его изменения // Жизнь Земли. 2022. Т. 44(4). С. 402—414.
3. **Бакин Н. Б.** Метан в окружающей среде. — Новосибирск: СО РАН, 2010. — 56 с.
4. **Семенов С. М., Попов И. О.** Сравнительная оценка влияния изменения концентрации диоксида углерода, метана, закиси азота и водяного пара на радиационно-равновесную температуру земной поверхности // Метеорология и гидрология. 2011. № 8. С. 34—43.
5. **Фортис В. Е., Поппель О. С.** Энергетика в современном мире. — М.: Интеллект, 2011. — 168 с.
6. **Тетельмин В. В., Василенко А. Б.** Современная энергетика и энергетика будущего. — М.: Ленанд, 2018. — 240 с.
7. МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Обобщенный доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в пятый оценочный доклад МГЭИК [основная группа авторов Р.Пачаури и Л. Мейер]. МГЭИК. Женева. Швейцария, С. 44.
8. IPCC. 2014 b. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken. Cambridge University Press, Cambridge.
9. **Бялко А. В.** Палеоклимат: дополнение к теории Миланковича // Природа. 2009. № 12. С. 18—28.
10. **Мельников В. П., Смольский В. И.** Астрономическая теория ледниковых периодов: Новые приближения. Решенные и нерешенные проблемы. — Новосибирск: Изд. ГЕО, 2009. — 98 с.
11. EM-DAT, CRED/UC Louvain, Brussels, Belgium, www.emdat.be (D. Guha-Sapir) Version: 2020-06-15, The International Disaster Database (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), University of Louvain.
12. **Миркин Я. С.** Будущее общество и место России // Россия в глобальной политике. 2020. № 6. С. 26—34.
13. **Тетельмин В. В.** Планета Земля и Человек. Единая экосистема. — М.: ЛЕНАНД, 2022. — 480 с.
14. **Бондур В. Г.** Что болит у Земли // В мире науки. 2022. № 1/2. С. 5—12.
15. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории России. Общее резюме. — СПб.: Научные технологии, 2022. — 144 с.
16. **Осипов В. И.** Природные катастрофы: анализ развития и пути минимизации последствий / Проблемы анализа риска. — М.: Деловой экспресс, 2015. Т. 12. С. 84—93.
17. **Латонин М. М., Башмачников И. Л., Бобылев Л. П.** Явление арктического усиления и его механизмы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13. № 3. С. 3—19.
18. **Френсис Д.** Паровые бури // В мире науки. 2022. № 1/2. С. 5—12.
19. **Джирард Дж. Е.** Основы химии окружающей среды. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 640 с.
20. **Тетельмин В. В.** Формула максимального глобального потепления // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. "Экология и безопасность жизнедеятельности". 2022. Т. 30. № 1. С. 45—57.
21. **Тетельмин В. В., Пимашков П. И.** Биосфера и человек. Глобальное потепление. — М.: Либликом, 2021. — 336 с.

Energy patterns and limits of global warming

V. V. TETELMIN

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

The summary table of global warming energy patterns calculated using accumulated natural data accumulated by the world science is presented. The analysis shows that in each successive decade the contribution of positive feedbacks to global warming increases by about 9 % relative to the preceding decade. Each kilowatt hour of energy produced and used by humanity warms our planet through the anthropogenic greenhouse effect by 17 kW·h. We propose the functions of dependence of greenhouse energy absorption capacity as well as the amount of accumulated heat energy in the climatic system on the mass of anthropogenic greenhouse gases in the atmosphere. Based on the assumption of a quasi-stationary state of the Earth's climatic system during the last phase of the ice age, we propose the functions of dependence of the radiation equilibrium temperature on the concentration in the atmosphere of the mixture of the three main greenhouse gases, as well as on the concentration of carbon dioxide. The values of the volume concentration of anthropogenic greenhouse gas emissions of 850 ppm and the global warming limit temperature of 8.9 °C, at which the atmosphere reaches "greenhouse saturation" and the climate system no longer responds to further warming, are obtained.

Keywords: global warming, climate system, greenhouse gases, thermal energy, radiation equilibrium temperature.

Bibliography — 21 references.

Received December 25, 2022

Экология промышленного производства: Межотр. науч.-практ. журнал / ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2023. Вып. 1. С. 1—60.

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

Подписано в печать 22.02.2023.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 7,0. Уч.-изд. л. 7,2.

Тираж 250 экз. Заказ 2010.

Свободная цена.

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

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».

<http://ntckompas.ru>

Отпечатано: 101000, Москва,

Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, помещ. IX, ком. 15, 16

ООО «Спиди-Принт.ру»

Индекс 80090.