

ЭКОЛОГИЯ

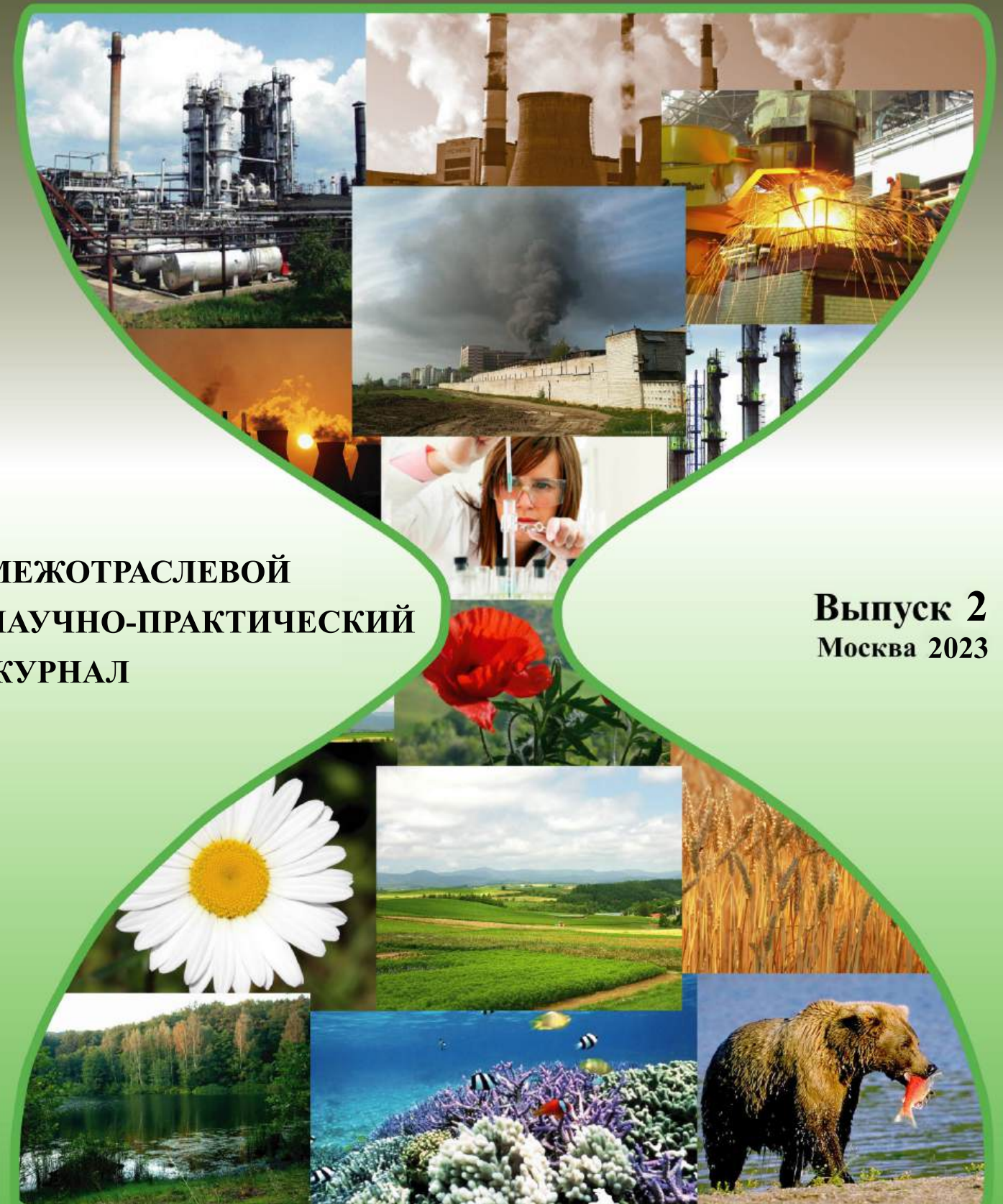
промышленного
производства

Индекс 80090



ЭКОЛОГИЯ

промышленного
производства



МЕЖОТРАСЛЕВОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

Выпуск 2
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 2 (122)

Издается с 1993 г.

Москва 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ, УТИЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕРАБОТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ И БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Минигазимов Н. С., Хасанова Л. М., Азнагулов Д. Р. Методические особенности исследования морфологического состава твердых коммунальных отходов 2

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДООЧИСТКА

Ксенофонтов Б. С. Сравнительная эффективность комбинированной флотационной техники в технологиях очистки сточных вод 6

Спицов Д. В., Павелкова А. М. Особенности применения и эксплуатации установок ионного обмена 10

Федотов А. А., Руденко Е. Ю. Адсорбенты из подсолнечной лузги для очистки воды от ионов хрома (VI) 14

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Евграфова И. М., Евграфов А. В. Экологическое обоснование проектов снижения выбросов энергетических объектов в период неблагоприятных метеоусловий 20

Ганявин В. А., Попов А. Ю., Пронин А. Н., Медведевских С. В., Желтухин Д. В. Практическое внедрение систем автоматического контроля эмиссий загрязняющих веществ в химико-технологических процессах 25

Тетельмин В. В. Расчет темпа глобального потепления и роста уровня Мирового океана 32

Янников И. М., Галиакберов Р. А., Исаков В. Г. Методология прогнозирования и моделирования миграции загрязняющих веществ в системе комплексного экологического мониторинга химически опасных объектов 39

ВНЕДРЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Овчинников Е. В., Овчаренко А. С., Дмитриев К. С. Автоматизированная система повышения эффективности и экологических показателей гусеничных движителей 44

ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

Яковлев С. Ю., Шемякин А. С. Изменения в информационной технологии разработки паспортов безопасности потенциально опасных объектов 48

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Воробьевская Е. Л., Евсеев А. В., Седова Н. Б., Слипенчук М. В. Состояние природной среды в зоне влияния медно-никелевого комбината "Североникель" 53

Курбаков Д. Н., Кузнецов В. К., Сидорова Е. В., Новикова Н. В., Саруханов А. В., Дементьева Н. В. Содержание тяжелых металлов в почвах агроэкосистем зоны воздействия предприятий Липецкой промышленной агломерации 59

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»

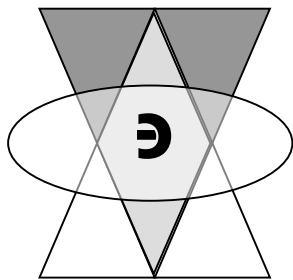
Редакционный совет:

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. Амиранов, канд. биол. наук, Федеральная служба по надзору в сфере природопользования; С. С. Бабкина, д-р хим. наук, проф., Институт тонких химических технологий им. М. В. Ломоносова РТУ МИРЭА; Я. И. Вайсман, д-р мед. наук, проф., Пермский национальный исследовательский политехнический университет; В. А. Девисиллов, д-р тех. наук, 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. Ф. Меньщиков, 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 экологических 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

© Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» (ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»), 2023



Обезвреживание, утилизация и переработка промышленных и бытовых отходов

УДК 504.064.47

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_2_2

EDN: BVDRTC

Методические особенности исследования морфологического состава твердых коммунальных отходов

Н. С. МИНИГАЗИМОВ, д-р техн. наук; **Л. М. ХАСАНОВА**, канд. техн. наук;
Д. Р. АЗНАГУЛОВ

ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет»,
Республика Башкортостан, г. Уфа, Россия

Показано, что результаты исследования морфологического состава твердых коммунальных отходов (ТКО), полученные разными авторами, зачастую сильно отличаются, даже при условии, что исследования проводились в одном населенном пункте на различных контейнерных площадках для накопления ТКО от населения. Данный факт объясняется несовершенством методики исследования. Обоснована приемлемая методика исследования морфологического состава ТКО, позволяющая получать достоверные данные о составе ТКО.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, морфологический состав, методика исследования.

Основная особенность отходов потребления — непостоянство их состава и свойств. В первую очередь эта проблема возникает при обращении с ТКО. О морфологическом составе ТКО пишется очень много, однако во многих регионах натурное определение морфологического состава проводится редко. Заказчиками таких работ, как правило, являются органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации (РФ), ответственные за обращение с ТКО, и операторы по обращению с ТКО. ТКО — это совокупность отходов потребления, образующихся в жилищах и подобных отходах, образующихся на предприятиях, учреждениях и организациях, в сфере образования и т. п. Совокупность различных компонентов в долях от общей массы ТКО называется морфологическим составом. Компонентный состав ТКО в различных населенных пунктах, даже в разных странах мало чем отличается, однако морфологический состав весьма разнообразен в зависимости от

различных факторов: географические и климатические факторы, уровень благосостояния населения, культура потребления, менталитет населения и др. Наблюдаются сезонные колебания [1].

Данные о морфологическом составе ТКО имеют решающее значение, наряду с нормативами образования ТКО у населения, при планировании (проектировании) систем сбора, транспорта, утилизации, переработки и захоронения отходов. Знания о морфологическом составе ТКО позволяют оценить ресурсный и энергетический потенциал отходов, оптимизировать систему раздельного сбора отходов, транспортировки, сортировки и переработки вторичных материальных ресурсов (ВМР), подобрать наиболее эффективные и экономически доступные технологии их переработки и утилизации.

Основным документом, определяющим методические основы исследования морфологического состава ТКО, является "ПНДФ16.3.55-08. Твердые бытовые отходы, определение морфологического состава гравиметрическим методом" [2]. Согласно этому документу отбор пробы для исследования проводится методом квартования, заключающимся в отборе пяти точечных проб отходов по схеме конверта, их усреднении путем перемешивания и формирования усредненной пробы массой не более 2 кг, которую далее разделяют на компоненты и взвешивают. После взвешивания компонентов определяют их

Минигазимов Наил Султанович, профессор.

E-mail: nail.minigazimov@mail.ru

Хасанова Луиза Маратовна, доцент.

E-mail: luizamaratovna@yandex.ru

Азнагулов Денис Раисович, соискатель.

E-mail: aznagulov.d.r@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 марта 2023 г.

© Минигазимов Н. С., Хасанова Л. М., Азнагулов Д. Р., 2023

процентное соотношение к общей массе пробы усредненного отхода.

Как показали исследования, проведенные авторами, отбор и изучение проб отходов массой не более 2 кг не позволяет получить достоверные данные о морфологическом составе ТКО, т. к. перемешать и выбрать усредненную пробу весом не более 2 кг не всегда возможно, потому что в составе отходов много достаточно крупных компонентов — это и крупная стеклянная посуда, отход пластмасс, металлолом, древесные отходы и др., которые не удастся перемешать для получения усредненной пробы массой не более 2 кг.

Новая методика, появившаяся в 2014 г., имеет практически те же недостатки, что и методика в 2008 г. [3].

В развитие методологии авторы исследовали усредненные пробы, заполняя точечными пробами отходов пластиковые мешки объемом от 50 до 100 дм³, но даже такие объемы усредненных проб не позволяют получать достоверные данные о морфологическом составе ТКО, что показали исследования параллельных усредненных проб отходов из одного и того же мусорного контейнера. Иначе, отбор и исследование морфологического состава усредненных проб в трех мешках из одного контейнера показали разницу в компонентном составе ТКО в диапазоне 15—30 %.

В качестве иллюстрации исследований морфологического состава ТКО методом отбора проб в пластиковые мешки авторами приведены исследования морфологического состава ТКО, образующихся в общежитиях Башкирского государственного аграрного университета (БГАУ) (табл. 1).

Как видно из табл. 1, результаты исследования показали существенное различие в морфологическом составе ТКО в контейнерах, хотя различий особых не должно быть, так как ТКО исследовали в одних и тех же условиях (территориальных, климатических), контингент студентов, условия их проживания одинаковы. Существенные отличия отмечаются в доле пищевых отходов (от 18,4 до 66 %), отходов металлов (0,6—7,8 %), отходов пластмасс (4,2—14 %).

Учитывая полученные данные, дальнейшие исследования морфологического состава ТКО проводили путем полного исследования состава ТКО в мусорных контейнерах.

Наиболее достоверные данные о морфологическом составе ТКО получаются при полном разборе ТКО из свежезаполненных стандартных контейнеров. Морфологический состав ТКО в разных мусорных контейнерах на одной контейнерной площадке отличается, как правило, не более чем на 10 %. Данные о морфологическом составе ТКО, полученные на одной контейнерной площадке, с хорошей воспроизводимостью характерны для всего населенного пункта.

В табл. 2 приведены усредненные данные о морфологическом составе ТКО в контейнерах на площадках многоквартирных домов (МКД) и индивидуальных домов в г. Стерлитамак Республики Башкортостан. Данные усреднены для трех параллельных опытов в идентичных условиях, при этом расхождение данных исследований в параллельных опытах не превышало 10 % по всем компонентам.

Таблица 1

Морфологический состав ТКО в общежитиях БГАУ, % вес

Компоненты ТКО (% вес.)	Общежития					Средние показатели
	№ 2+№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	
	Доля, % вес.					
Пищевые отходы	23,0	66,0	18,4	41,8	27,9	35,4
Отходы пластмасс	6,6	5,1	12,3	4,2	14,0	8,5
Макулатура (бумага, картон)	8,2	2,1	1,2	3,8	1,6	3,4
Отходы металлов (жестяные и алюминиевые банки)	0,0	2,1	0,6	3,1	7,8	2,7
Отходы стекла	8,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6
Несортируемые отходы	54.1	24.8	67.5	47.1	48.8	48.4

Таблица 2

Морфологический состав ТКО на контейнерных площадках г. Стерлитамак

Наименование компонентов	Контейнерная площадка МКД, кг	Доля, % вес	Контейнерная площадка индивидуальных домов, кг	Доля, % вес	Примечания
Бумага, картон (незагрязненные)	10,0	5,3	5,0	5,0	Загрязненная часть бумаги и картона остается в составе отсева
Стекло (без стеклобоя)	13,0	6,5	5,0	5,0	
Стеклобой	2,7	1,45	1,5	1,5	
Отходы пластмасс (незагрязненные 80—90 % ПЭТ — бутылки)	8,0	4,3	3,0	3,0	Загрязненные отходы в составе отсева
Металлические банки (алюминий, жесть)	1,3	0,7	0,8	0,8	Алюминиевые банки — 80%
Металлолом черный	1,5	0,8	2,3	2,3	Цветной металлолом в основном в составе лома бытовой техники и электроники
Металлолом цветной	—	—	—	—	
Тетрапак	0,2	0,1	0,3	0,3	
Отходы кожи и резины	4,5	2,4	2,2	2,2	90 % изношенная обувь
Текстильные отходы	3,2	1,7	1,5	1,5	
Древесные отходы	1,8	0,95	2,5	2,5	
Строительные (ремонтные) отходы	3,8	2,0	2,0	2,0	Старые обои, керамическая плитка и др.
Пищевые отходы	74,0	38,9	40,6	40,6	
Отсев (остаток после сортировки)	65,7	34,8	33,3	35,3	Не сортируемые, в том числе загрязненные отходы
Всего	190,0	100,0	100,0	100,0	

Отмечена небольшая разница в морфологическом составе ТКО в контейнерах МКД и индивидуальных домов, что было ожидаемо.

Необходимо отметить, что для получения достоверных данных о морфологическом составе ТКО недостаточно проведения единичного (разового) исследования; считаем, что с учетом сезонных изменений в составе ТКО, образуемого у населения, в первую очередь, необходимо проводить 3 параллельных исследования на одной контейнерной площадке. Наибольшие сезонные изменения происходят с долей пищевых отходов. В средней полосе России наибольшая масса пищевых отходов в составе ТКО у населения отмечается летом и осенью (июль—ноябрь), наименьшая — зимой и весной (январь—май). Для южных районов России сезонные изменения в составе ТКО будут отличаться от данных по населенным пунктам в средней полосе страны за счет более теплого климата, что необходимо учитывать при проведении повторных исследований морфологического состава.

Необходимо отметить, что сравнивать многочисленные результаты исследований морфологического состава ТКО нужно с осторожностью, т. к., во многих случаях авторы не поясняют методику исследований. Есть несколько вариантов: 1 — место (объект) исследований — это может быть мусорный контейнер, мусоровоз или масса выгруженных отходов из мусоровозов на полигоне или сортировочном узле; 2 — методика отбора проб ТКО — отбор нескольких точечных проб с дальнейшим их усреднением, разбор всех компонентов ТКО из мусорного контейнера или разбор массы выгруженного ТКО из мусоропровода.

Авторы считают предложенную ими методику исследования оптимальной — точечные пробы не позволяют получать полную информацию о составе ТКО; разбор (сортировка) ТКО, выгруженного из мусоровоза, слишком трудоемкий. Целесообразно разработать методику ПНДФ16.3.55-08.

Кроме того, нецелесообразно использовать данные о морфологическом составе ВМР в составе ТКО, полученные 10—15 лет назад, они явно устарели. И, наконец, последнее. Данные о морфологическом составе ТКО, полученные авторами данной работы и многими другими исследователями, характеризующие состав ТКО, попавшего в мусорные контейнеры или в мусоровозы, и не могут точно характеризовать состав ТКО на месте их образования. С каждым годом разница в результатах исследования морфологического состава ТКО на месте их образования и на контейнерных площадках будет расти в связи с внедрением раздельного накопления ТКО. Кроме того, часть населения регулярно отбирает из мусорных контейнеров наиболее дорогостоящие вторичные материальные ресурсы (ВМР), такие, как ПЭТ — бутылки, металлолом, алюминиевые банки, бумага, картон.

Кроме того, в мусорные контейнеры выносят свои отходы многочисленные торговые и другие предприятия, организации, расположенные на первом и цокольном этажах жилых и отдельных зданий, в зданиях непосредственной близости от жилых зданий. По этой причине морфологический состав ТКО на контейнерных площадках в жилых кварталах не пол-

ностью характеризует состав ТКО, образующийся у населения. Особенно важно учитывать данный факт при разработке нормативов образования ТКО у населения.

Что касается предлагаемого варианта изучения морфологического состава ТКО непосредственно на полигоне после выгрузки мусоровозов, подобный вариант неперспективен, особенно при внедрении раздельного накопления ТКО [4, 5]. Во-первых, основная масса свежего мусора с контейнерных площадок будет вывезена не на полигон, а на предприятия по сортировке ТКО, во-вторых, некоторые компоненты ТКО (бумага, картон, алюминиевые банки, отходы металлов, некоторые виды полимерных отходов) не доедут даже до сортировочных предприятий, так как их выберут из контейнеров сразу после их попадания туда граждане, сдающие данные отходы в приемные пункты самостоятельно. Значительную часть полимерных отходов уже в течении многих лет собирают в специальные сетчатые накопители, устанавливаемые на контейнерных площадках различными фирмами.

Считаем, что приведенные факты обязательно нужно учитывать при проектировании предприятий по сортировке ТКО, да и вообще при исследовании морфологического состава ТКО, и при оценке ВМР в составе ТКО за рубежом.

Некоторые авторы [6—9] предлагают при изучении морфологического состава ТКО выделять более 50 компонентов. К примеру, предлагается полимерные отходы разделять на 20 и более компонентов (пленка из разных полимеров, в т. ч. по цветам, ПЭТ — бутылки 4 цветов и т. д.), отходы стекла 4 видов цветов; макулатура 7 видов. По мнению авторов, такие подробные, достаточно трудоемкие, дорогостоящие исследования нужны при проектировании предприятий по сортировке ТКО. Для получения общих сведений о морфологическом составе ТКО от населения, предприятий, учреждений в масштабе города или района достаточно выделять 12 компонентов:

- пищевые и растительные отходы;
- бумага и картон;
- полимерные отходы двух видов (ПЭТ — бутылки и все остальные);
- отходы стекла без разделения по цветам;
- текстильные отходы;
- отходы кожи и резины;
- древесные отходы;
- отходы металлов (черный и цветной);
- композиционные (комбинированные) отходы — тетрапак, отдельные детали и узлы бытовой электроники и др.;
- опасные отходы (батарейки, аккумуляторы, медицинские отходы, бытовые, садовые ядохимикаты, тара от красок, растворители);
- отсев;
- крупногабаритные отходы (КГО).

Такого же объема исследований достаточно для обоснования инвестиций (технико-экономического обоснования) предприятий на предпроектном этапе строительства предприятий по сортировке и переработке ТКО.

В ряде работ предлагается при исследовании морфологического состава ТКО одновременно исследовать и фракционный состав отходов [4]. Исследования фракционного состава ТКО необходимы, в основном, при проектировании предприятий по сортировке и утилизации ТКО, в остальных случаях проведение таких исследований приведет к росту издержек, тем более, что фракционный состав ТКО в разных городах и районах существенно не отличается.

Существует еще один фактор, который необходимо учитывать при исследовании морфологического состава ТКО, он особенно важен при оценке ресурсного потенциала компонентов — это загрязненность отходов. В первую очередь, это загрязнение компонентов отходов пищевыми отходами, жирами, маслами, красками, растворителями. Многие виды отходов при загрязнении теряют свою ценность, как BMP — это бумага, картон, текстильные отходы, некоторые виды полимерных отходов. Единственное направление загрязненных компонентов использования в качестве BMP — включение их в процесс изготовления RDF-топлива. При полном внедрении раздельного накопления ТКО, особенно при раздельном сборе пищевых отходов, вероятность загрязнения ими других компонентов ТКО в значительной мере снизится, но, тем не менее, целесообразно производить разделение загрязненных отходов при изучении морфологического состава ТКО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцев В. А., Тарасова Н. П., Сотнезов А. В. Морфологический состав твердых коммунальных отходов // Безопасность в техносфере. 2015. Т. 4, № 4. С. 10—15.
2. ПНДФ 16.3.55-08. Твердые бытовые отходы. Определение морфологического состава гравиметрическим методом.
3. Методика определения морфологического состава твердых производства и потребления гравиметрическим методом (взамен ПНДФ 16.3.55-8) Москва, 2014.
4. Ильиных Г. В., Слюсарь Н. Н., Коротаев В. Н. Методическое обеспечение экспериментальных исследований морфологического состава ТБО // Экология и промышленность России. 2011. № 5. С. 52—55.
5. Ильиных Г. В., Коротаев В. Н., Слюсарь Н. Н. Современные методические подходы к анализу морфологического состава ТБО с целью оценки их ресурсного потенциала // Экология и промышленность России. 2012. № 7. С. 40—45.
6. Ильиных Г. В., Слюсарь Н. Н., Коротаев В. Н. Морфологический состав отходов: основные тенденции изменения // Твердые бытовые отходы. 2011. № 8(62). С. 38—41.
7. SWA-Tool. Methodology for the Analysis of Solid Waste (European Commission, 2004).
8. Уланова О. В., Салхофер С. П., Вюнш К. Комплексное устойчивое управление отходами. Жилищно-коммунальное хозяйство: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений / под общей ред. Улановой О. В. — М.: Издательский Дом "Академия Естествознания", 2016. — 520 с.
9. Слюсарь Н. Н., Загорская Ю. М., Ильиных Г. В. Изучение фракционного и морфологического состава отходов старых свалок и полигонов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2014. № 3(15). С. 77—85.

Methodological features of the study of the morphological composition of municipal solid waste

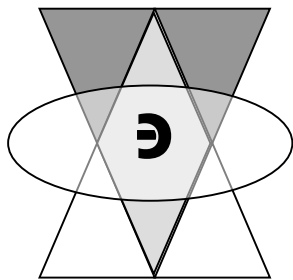
N. S. MINIGAZIMOV, L. M. KHASANOVA, D. R. AZNAGULOV
Bashkir State Agrarian University, Republic of Bashkortostan, Ufa, Russia

It is shown that the results of a study of the morphological composition of municipal solid waste (MSW), obtained by different authors, often differ greatly, although the studies were carried out in the same locality at different container sites for the accumulation of MSW from the population. This fact is explained by the imperfection of the research methodology. An acceptable method for studying the morphological composition of MSW is substantiated, which allows obtaining reliable data on the composition of municipal solid waste.

Keywords: solid municipal waste, morphological composition, research methodology.

Bibliography — 9 references.

Received March 20, 2023



Водоподготовка и водоочистка

УДК 628.54
DOI: 10.52190/2073-2589_2023_2_6
EDN: BXFMZH

Сравнительная эффективность комбинированной флотационной техники в технологиях очистки сточных вод

Б. С. КСЕНОФОНТОВ, д-р техн. наук

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

Рассмотрены вопросы очистки сточных вод с использованием нового вида оборудования в виде комбинированной флотационной техники, в том числе экомбайнов. Показано, что такие комбинированные установки, как экомбайны, позволяют получать высокие показатели качества очищенной воды, а также одновременно получать образующийся осадок в транспортабельном виде. Установлено, что эффективность процессов очистки воды и сгущения осадков, осуществляемых в экомбайне, повышается при соблюдении технологических режимов согласно применению моделей многостадийной и обобщенной моделей флотации и сопутствующих процессов.

Ключевые слова: очистка сточных вод, комбинированная флотационная техника, экомбайны, сгущение осадков, многостадийная и обобщенная модели флотации.

Разработка новой техники для очистки воды, воздуха и переработки отходов обусловлена как необходимостью повышения эффективности очистки, так и снижения удельных материало- и энергозатрат. В этой связи идет постоянное совершенствование существующей и разработка новой техники [1—22].

Проведенные исследования [1—3] определили возможность аппаратного оформления этого способа с использованием комбинированной установки, названной автором флотокомбайном. Автором разработаны и другие способы, и аппараты флотационной очистки сточных вод с учетом их конкретного состава.

Установки комбинированного типа разработаны и для очистки газовоздушных выбросов, а также для переработки отходов различных производств. Такую технику автор предлагает называть экомбайны, отличительной особенностью которой является осу-

ществление нескольких технологических операций в едином корпусе, причем режимы технологических операций согласованы в гидродинамическом отношении, что приводит к повышению эффекта очистки.

Для очистки сточных вод используется флотационная техника преимущественно напорного типа. Хотя процесс флотации известен давно, однако принципиально новых технических решений в этой области относительно мало. В качестве примера приведем разработанный автором в 1989—1992 гг. способ напорной флотации с двумя рабочими жидкостями [16], из которых одна — это рабочая жидкость с труднорастворимым газом (воздухом), а другая — с легкорастворимым газом, например, с углекислым газом. Этот способ был испытан и использован автором впервые в отечественной практике на биотехнологических предприятиях.

Другой пример — это направление, связанное с развитием использования комбинированных установок, осуществленное под руководством автора, начиная с 1995 г. на подмосковных машиностроительных предприятиях [1—3].

Развиваемое автором направление флотационной очистки с использованием многостадийной и

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

Статья поступила в редакцию 27 января 2023 г.

© Ксенофонов Б. С., 2023

обобщенной моделей с применением разработанных автором флотокомбайнов находится на стадии активного внедрения, начиная с 90-х г. XX в. Нынешняя стадия развития указанного направления связана с расширением внедрения разновидностей флотокомбайнов вплоть до экомбайнов и многофункциональных аппаратов с полным циклом экологических процессов, например, в виде циклокомбайнов. (рис. 1).

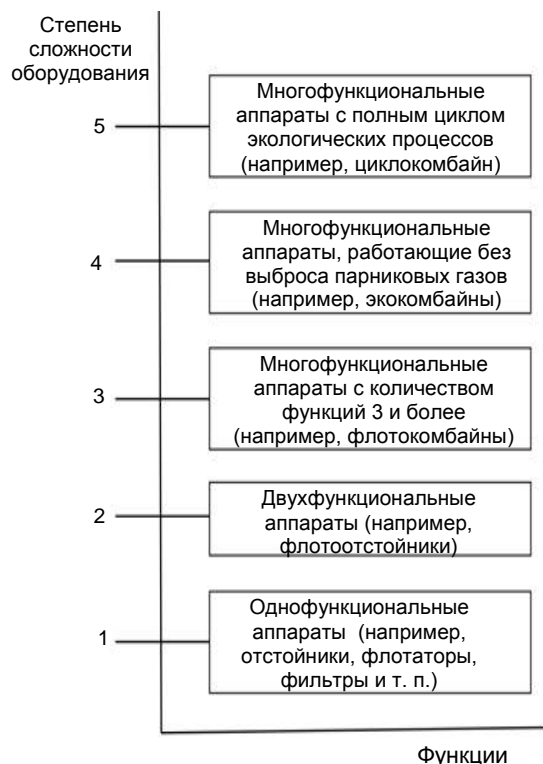


Рис. 1. Классификация многофункциональных аппаратов

Хорошо известно, что в обычной практике чаще всего применяются однофункциональные аппараты и гораздо в меньшей степени двухфункциональные и еще реже трехфункциональные. В виде опытно-промышленных образцов начинают использовать экомбайны и в виде опытных аппаратов — многофункциональные аппараты с полным циклом экологических процессов, например в виде локальных очистных сооружений типа циклокомбайнов.

Приведенные сведения (рис. 1) указывают на разнообразие многофункциональных аппаратов, начиная с однофункциональных и кончая аппаратами с полным циклом экологических процессов, например в виде циклокомбайнов. И при этом следует отметить, что чем выше степень сложности многофункционального оборудования, то, как правило, использование более ограничено по сравнению с однофункциональными аппаратами.

Пример реализации достаточно простого аппаратного варианта представлен на рис. 2 в виде флотоотстойника. Основные стадии процессов, происходящих в рабочем пространстве такого флотоотстойника, связаны с использованием отстаивания, флотации и фильтрации.

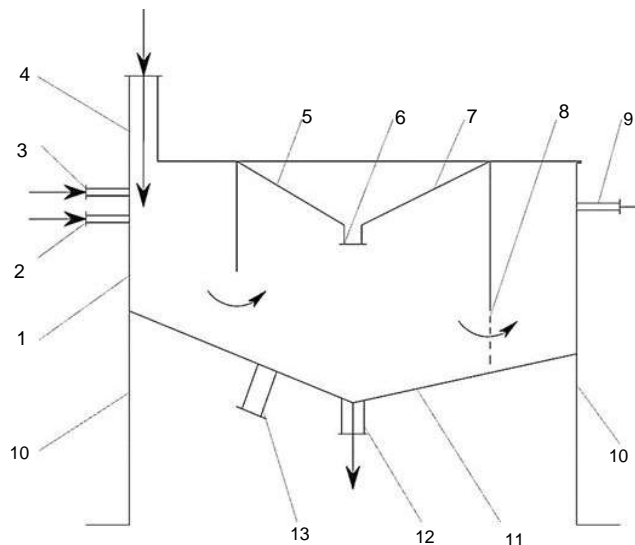


Рис. 2. Схема флотоотстойника:

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

Для сравнения различных вариантов флотокомбайнов рассмотрим схему флотокомбайна, представленного на рис. 3.

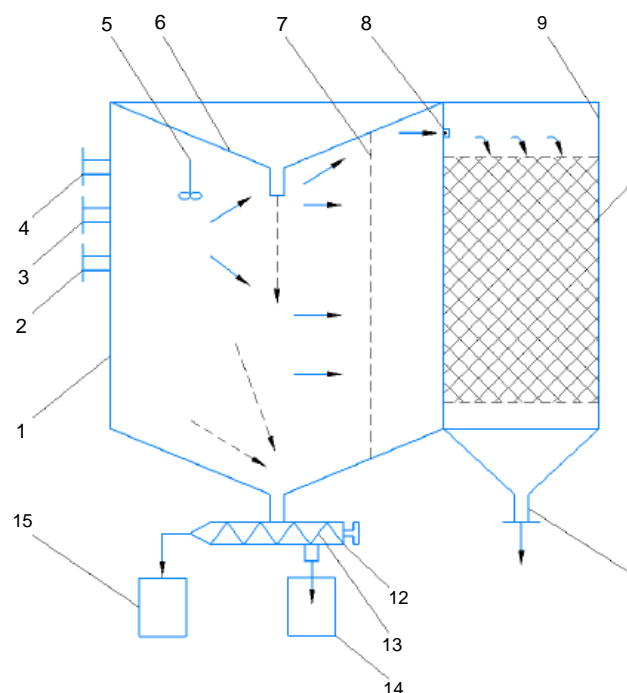


Рис. 3. Схема флотокомбайна (разработка автора)

Использование многостадийной и обобщенной моделей процесса указывает на целесообразность применения во флотокомбайне большего количества элементов, и в частности разделяющих перегородок, регулирующих скорости водного потока внутри аппарата, фильтрующей сетки и других, а также блока сгущения осадка.

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

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

Вариант эффективного экомбайна предложен автором в новом техническом решении (рис. 4).

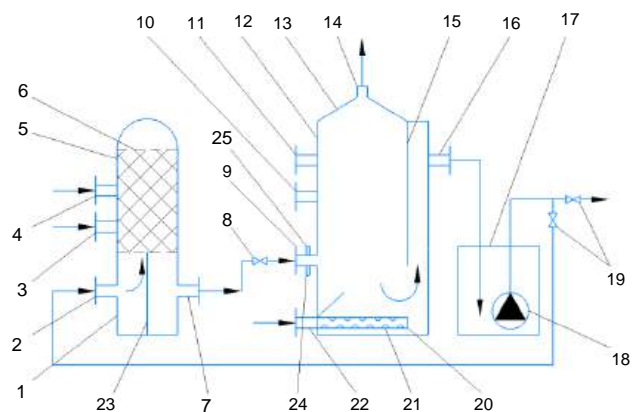


Рис. 4. Схема экомбайна:

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

Анализ этого технического решения указывает на эффективность предложенного технического решения.

На рис. 5 представлена схема комбинированного аппарата для очистки сточных вод [22].

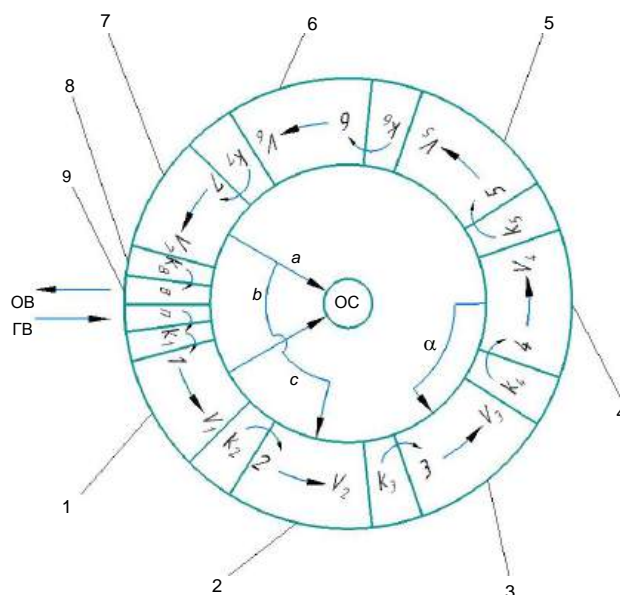


Рис. 5. Схема комбинированного аппарата для очистки сточных вод

Комбинированный аппарат для очистки сточных вод (рис. 5) имеет торoidalный корпус 9 с приемной (П), выходной (В) и технологическими K_1 — K_8 камерами, а также секциями V_1 — V_7 . При этом все секции имеют различные объемы, причем объем первой секции V_1 составляет от 0,3 до 0,7 объема второй секции V_2 , а объем каждой из последующих составляет от 0,2 до 0,8 объема последней секции V_7 , и при этом объемы камер составляют от 0,05 до 0,25 объемов последующих секций, причем вторая и предпоследняя секции, а также третья и четвертая секции соединены соответственно контурами циркуляции b и a , а осадок собирается из последней секции V_7 по трубопроводу a и из первой секции V_1 по трубопроводу c в резервуар ОС, размещенный внутри торoidalного корпуса, и при этом количество секций составляет от 6 до 10, причем половина из них являются аэрируемыми с чередованием аэрации через одну секцию.

Принцип работы комбинированного аппарата для биологической очистки сточных вод заключается в следующем. Поток грязной воды ГВ поступает в приемную камеру П, далее в камеру K_1 и секцию V_1 и затем последовательно в дальнейшие камеры K (2—8) и секции V (2—7) и выводится из аппарата через выходную камеру В. При этом окисление загрязнений происходит как в аэрируемых, так и не аэрируемых секциях аппарата.

В результате очистки сточных вод от нефтепродуктов в предлагаемом комбинированном аппарате эффективность очистки выше, чем в известном.

Сравнительная эффективность очистки сточных вод от нефтепродуктов при использовании различных комбинированных аппаратов приведена на рис. 6. По приведенным данным видно, что эффективность очистки наибольшая в циклокомбайне.

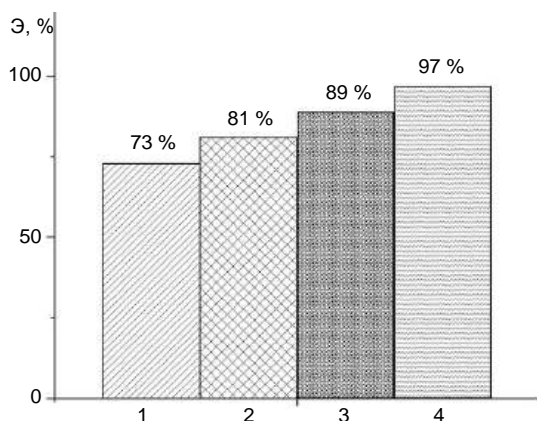


Рис. 6. Эффективность очистки воды:

1 — во флотоотстойнике; 2 — во флотокомбайне; 3 — в экофлотокомбайне; 4 — в циклокомбайне

Таким образом, обработка сточной воды в циклокомбайне приводит к заметно лучшим результатам, чем при использовании другой комбинированной техники.

Важно также отметить использование кинетических моделей процессов очистки, в том числе, флотации. Новый подход, основанный на многостадийности процесса, оказался успешным не только для интенсификации процессов на существующем, но и на вновь разработанном оборудовании [6—22]. При этом развитие моделирования способствовало появлению нового типа оборудования — циклокомбайнов, которые оказались более эффективными при меньших материало- и энергозатратах, чем известные машины и аппараты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ксенофонтов Б. С. Использование многостадийной модели флотации и разработка флотокомбайнов типа КБС для очистки воды. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — 156 с.
2. Ксенофонтов Б. С. Флотация: многостадийная и обобщенная модели процесса и флотокомбайны типа КБС и специального назначения. — Тверь: Тверской гос. ун-т, 2020. — 424 с.
3. Ксенофонтов Б. С. Очистка сточных вод: кинетика флотации и флотокомбайны. — М.: ИД "Форум": ИНФРА-М., 2015. — 256 с.

4. Ксенофонтов Б. С., Капитонова С. Н., Сеник Е. В. Использование многостадийной модели Ксенофонтова в процессах флотационной очистки сточных вод. — Тверь: Тверской гос. ун-т, 2019. — 162 с.

5. Ксенофонтов Б. С. Флотокомбайн для очистки сточных вод. Патент РФ на полезную модель № 170182. Пр. 25.07.2016. Рег. 18.04.2017.

6. Ксенофонтов Б. С. Очистка сточных вод во флотационных колоннах // Водоочистка. 2018. № 1—2. С. 18—23.

7. Ксенофонтов Б. С. Математические модели сложных сочлененных процессов во флотокомбайнах для очистки сточных вод // Водоочистка. 2018. № 10. С. 7—11.

8. Ксенофонтов Б. С. Очистка промышленных сточных вод от нефтепродуктов флотацией с доизвлечением микрофлотокомплексов // Водоочистка. 2018. № 10. С. 12—18.

9. Ксенофонтов Б. С. Интенсификация очистки сточных вод с использованием комбинированной флотационной техники // Водоочистка. 2018. № 4. С. 8—13.

10. Ксенофонтов Б. С. Модели сложных флотационных процессов очистки сточных вод // Водоочистка. 2018. № 6. С. 59—69.

11. Ксенофонтов Б. С. Очистка сточных вод: многостадийная модель флотации и флотокомбайны // Водоочистка. 2018. № 12. С. 5—21.

12. Ксенофонтов Б. С. Флотационная обработка воды, отходов и почвы. — М.: Новые технологии. 2010. — 272 с.

13. Ксенофонтов Б. С. Моделирование процесса электрофлотационной очистки сточных вод // Экспресс-информация. Сер. "Промышленность горнохимического сырья". НИИТЭХИМ. 1987. № 4. С. 1—8.

14. Гвоздев В. Д., Ксенофонтов Б. С. Очистка производственных сточных вод и утилизация осадков. — М.: Химия, 1988. 112 с.

15. Ксенофонтов Б. С., Виноградов М. С. Использование обобщенной флотационной модели Ксенофонтова для расчета процессов очистки воды. — Тверь: Тверской гос. ун-т. 2019. — 185 с.

16. Ксенофонтов Б. С. Очистка сточных вод: флотация и сгущение осадков. — М.: Химия, 1992. — 144 с.

17. Ксенофонтов Б. С. Химическая обработка воды. — Тверь: Тверской гос. ун-т, 2021. — 164 с.

18. Ксенофонтов Б. С. Очистка техногенных вод с использованием флотокомбайнов. — Тверь: Тверской гос. ун-т, 2020. — 154 с.

19. Ksenofontov B. S. Flotation Multistage and Generalized Models of the Process Harvesters of Ksenofontov Type and for Special Purpose. — San Francisco: Academus Publ., 2021. Pt. 1. — 299 p. DOI: 10.31519/0022-8 Available at: <https://academuspublish.com/en/nauka/monography/2212/view> (Date of access 26.09.2021).

20. Ксенофонтов Б. С. Очистка сточных вод флотацией с несколькими рабочими жидкостями. — Тверь: Тверской гос. ун-т, 2021. — 144 с.

21. Ксенофонтов Б. С. Биотехнологические основы защиты окружающей среды и использование биокомбайнов и биофлотокомбайнов. — Тверь: Тверской гос. ун-т, 2021. — 252 с.

22. Заявка на патент РФ на полезную модель "Комбинированный аппарат для очистки воды". № 2023100031. Приор. 9.01.2023 г.

Comparative efficiency of combined flotation technology in wastewater treatment technologies

B. S. KSENOFONTOV

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

This article considers the issues of wastewater treatment using a new type of equipment in the form of combined flotation equipment, including eco-combines. It is shown that such combined installations as eco-combines allow obtaining high quality indicators of purified water, as well as simultaneously obtaining the resulting sediment in a transportable form. It has been established that the efficiency of water purification and sludge thickening processes carried out in an eco-combine increases with the observance of technological regimes according to the use of multi-stage and generalized flotation models and related processes.

Keywords: wastewater treatment, combined flotation technique, eco-combines, sludge thickening, multi-stage and generalized flotation models.

Bibliography — 22 references.

Received January 27, 2023

УДК 628.164
DOI: 10.52190/2073-2589_2023_2_10
EDN: BZQFUL

Особенности применения и эксплуатации установок ионного обмена

Д. В. СПИЦОВ, канд. техн. наук; А. М. ПАВЕЛКОВА
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет», Москва, Россия

Изучены особенности применения установок ионного обмена в целях водоподготовки и очистки сточных вод. Выбор технологии ионного обмена и их комбинации, а также конструктивное оформление фильтров зависят как от качественного состава подготавливаемых вод, так и от требуемого качества подготовленной воды. Рассмотрены особенности образования сточных вод при регенерации фильтров и их очистки для сброса в систему городской канализации. Представлены методы уменьшения образования стоков и повышения качества фильтрации.

Ключевые слова: умягчение воды, натрий-катионирование, минерализованные стоки, прямоточная фильтрация, противоточная регенерация.

Применение ионного обмена в виде единственного метода, а также в сочетании с баромембранными технологиями является наиболее распространенным методом водоподготовки для котельных, в сферах ЖКХ и производства. Основная задача подготовки воды состоит в доведении исходной воды до соответствия утвержденным нормам [1—3] с наименьшей себестоимостью очистки воды.

Наиболее часто используются следующие технологические схемы: для тепловых сетей — одноступенчатое натрий-катионирование, реже водород-катионирование с "голодной" регенерацией фильтров; для производства пара — целесообразно применение сочетания нескольких ионитных методов, например, двухступенчатое натрий-катионирование; Н-катионирование с "голодной" регенерацией и последующим двухступенчатым натрий-катионированием; частичное химическое обессоливание, применяемое при необходимости одновременного умягчения и снижения солесодержания исходной воды [4]. Все иониты, включая ионообменные смолы, применяемые для умягчения воды, обладают ограниченным ресурсом.

При насыщении смолы ионами кальция/магния и наступления равновесия с исходной водой наступает конец рабочего цикла. Ионный обмен обратим, поэтому ионит можно вернуть в первоначальное состояние. Этот процесс называется восстановлением или регенерацией ионита. Полный фильтроцикл ионитного фильтра — это рабочий период фильтра и период его регенерации. Регенерация ионитного фильтра состоит из следующих операций: взрых-

ление, пропуск регенерационного раствора и отмывка [5].

Ионообменные установки, применяемые для подготовки воды, обладают следующими достоинствами: простота исполнения, надёжность в использовании, а также и недостатками: установки большой производительности весьма громоздки со значительным расходом воды на собственные нужды и реагентов (поваренной соли и сильных кислот) для регенерации ионитов. Серьезной экологической проблемой является образование при регенерации фильтров кислотных/солевых сточных вод с высокой степенью минерализации (10000 мг/л) [6]. Особенностью эксплуатации систем водоподготовки котельных является значительное колебание расхода воды, связанное как с отопительным периодом, так и с особенностями изменения тепловой нагрузки в системе горячего водоснабжения. Сброс производственных стоков от станций ионного обмена водоподготовки, в том числе регенерационных вод, в систему городской канализации должен осуществляться в соответствии с нормами [7]. В случае превышения ПДК показателем сточных вод для приема в систему централизованного водоотведения выполняется предварительная очистка сточных вод на локальных или промышленных очистных сооружениях. Таким образом, обзор ионообменных установок блока химводоподготовки котельных является актуальным и позволит определить пути снижения образования стоков, а также обеспечить надежность и барьерную роль сооружений в целом.

Применение установок ионного обмена

Установки ионного обмена широко используются для получения умягченной воды на предприятиях теплоэнергетики. За счет селективности к определенным веществам корректируется ионный состав умягченной воды. Обратимость процесса ионного

Спицов Дмитрий Владимирович, доцент.
E-mail: SpitsovDV@mgsu.ru
Павелкова Анна Михайловна, аспирант.
E-mail: pavelkovaanna@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2023 г.

© Спицов Д. В., Павелкова А. М., 2023

обмена, доступность реагентов привели к широкому распространению технологии умягчения воды с помощью прямоточных ионитных фильтров. Десятилетия эксплуатации показали простоту и надежность данной технологии. Существенным недостатком ионного обмена является восстановление ионита с применением высококонцентрированных солевых растворов, либо применением сильных кислот и щелочей. Образующиеся при регенерации кислотные/щелочные стоки, а также высокоминерализованные (до 10000 мг/л) солевые стоки нуждаются в обезвреживании и очистке. Основные загрязняющие вещества, содержащиеся в регенерационных сточных водах блоков химводоподготовки, — это хлориды, сульфаты и гидрокарбонаты [4, 8].

К значительному уменьшению образования стоков установок ионного обмена привело создание и внедрение противоточных технологий [9]. При прохождении воды по иониту с увеличивающейся глубиной регенерации обеспечивается более глубокая очистка воды. За счет этого необходимость во второй ступени очистки отпадает, сама установка при той же производительности становится компактнее [10]. Сравнение показателей двух технологий регенераций, согласно нормам, [11] приведено в таблице.

Сравнение прямоточной технологии регенерации с противоточной

Показатели	Прямоточная	Противоточная
Скорость фильтрования, м/ч	10—20	40—50
Удельный расход кислоты, г-экв/г-экв	2,5	1,6
Удельный расход щелочи, г-экв/г-экв	2,5	1,5
Удельный расход соли, г-экв/г-экв	2,5—3,1	2,3—1,5
Расход воды на собственные нужды, %	20	10

Противоточные технологии по сравнению с прямоточной регенерацией фильтров используют реже, но они более интенсивны, с большим количеством переключений, что требует более надежной арматуры, наличия средств автоматизации и контроля. Определенные трудности при реконструкции фильтров с прямоточной регенерации на противоточную создает износ и утрата защитных качеств внутренней поверхности, что при увеличении скорости фильтрования больше чем в 2 раза создает неоптимальные гидравлические характеристики [12].

Первые иониты были поликонденсационные, полученные в результате синтеза ароматических аминов с формальдегидом, имели зерна неправильной формы и малую механическую прочность, за счет чего значительно истирались в процессе регенерации.

Следующее поколение смол полимеризационные, обладающие сферической формой, что делает их более устойчивыми к механическим воздействиям. Химическая стойкость также превышает показатели поликонденсационных.

На большинстве отечественных тепловых котельных и электростанций, построенных до 90-х гг. XX в., были реализованы схемы с прямоточной регенерацией фильтров, в качестве ионита как для Н, так и для Na-катионирования применяли катионит

КУ-2-8, обладающий полидисперсным гранулометрическим составом [13].

Для противоточной регенерации разработан сильнокислотный катионит с однородным размером частиц Dowex, которые также применимы в фильтрах смешанного действия для глубокого обессоливания воды. Монодисперсные смолы являются необходимым условием противоточной регенерации, так как обладают более высокой скоростью ионного обмена и не создают повышенных гидравлических нагрузок при высоких скоростях фильтрования.

Улучшение эксплуатационных параметров ионообменных смол и возможность полной автоматизации процесса фильтрования позволяет максимально уменьшить количество образовавшихся от регенерации сточных вод, что делает различные модификации противоточной регенерации оптимальным методом реконструкции существующих установок ионного обмена. При прямоточной регенерации поток обрабатываемой воды движется сверху вниз, как и поток реагента, при противоточной регенерации направление движения потока реагента меняется на движение снизу вверх (рис. 1): разнонаправленное движение обеспечивается при помощи конструкции фильтра [9, 14—15].

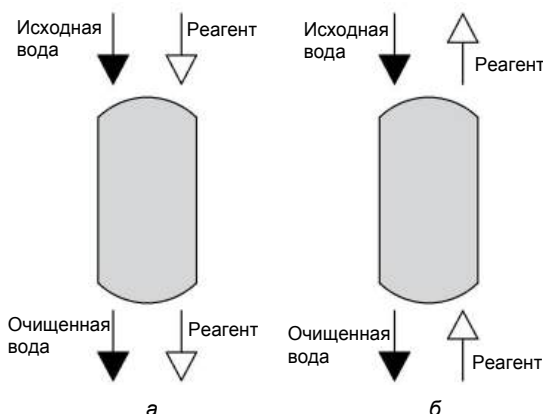


Рис. 1. Типы регенераций фильтров: а — прямоточная; б — противоточная

Возможно применение ионного обмена для очистки сточных вод с извлечением и утилизацией ценных примесей в виде хрома, цинка, свинца и других металлов, очищенная до норм ПДК вода может быть возвращена в производство [16]. Широкого распространения данная технология не получила из-за образования значительного количества регенерационных сточных вод, нуждающихся в утилизации.

В области водоподготовки широко применяют баромембранные методы [17], в том числе обратный осмос для получения обессоленной воды, но пока для подготовки воды в теплоэнергетике широко эти методы не применяются.

Возможные пути снижения объемов сточных вод, образующихся при регенерации

Ужесточение природоохранных требований к защите водных объектов и возникающие при этом сложности с отведением отработанных регенерационных растворов в сети коммунального хозяйства с

последующим их сбросом в водоёмы ведет к поиску путей снижения объемов сточных вод. Соли присутствуют в стоках как в виде реагентов (хлорид натрия), так и образуются дополнительно при нейтрализации щелочей и кислот [18]. Особенно чувствительными к повышению солесодержания в воде являются низшие ракообразные, которые, в свою очередь, являются кормом для большинства рыб, что может привести к изменениям в экосистеме водоема и ухудшениям санитарно-гигиенических качеств воды.

Сокращение объемов сброса сточных вод, образовавшихся в процессе регенерации ионообменных фильтров, может происходить следующими способами: оптимизация технологии водоподготовки; снижение объемов применяемых реагентов; применение локальных очистных сооружений для образующихся сточных вод.

Максимальное сокращение объемов сброса сточных вод достигают применением установок-испарителей с получением сухих солей [19]. Твердые отходы, содержащие в большом количестве хлорид- или сульфат-ионы, могут быть использованы в другом производстве или утилизированы иным способом. Недостатком этого метода является повышенное потребление электроэнергии или тепла, особенно при выпаривании раствора с высокой долей хлорида натрия. Наряду с разработкой методов утилизации сточных вод в рамках бессточной водоподготовки проводятся исследования по повторному использованию регенерационного раствора, в частности с применением мембранных и реагентных технологий [20, 21].

И отработанный, и свежий регенерационные растворы имеют одинаковую концентрацию. Для повторного применения необходимо очистить стоки от излишних солей жесткости. Институт МосводоканалНИИпроект разработана и внедрена на Крылатской РТС схема повторного использования сточных вод, образующихся при регенерации (рис. 2). При помощи известково-содового умягчения из отработанного регенерационного раствора удаляют в виде шлама осаждаемые соли жесткости в виде гидроксида магния и карбоната кальция. Регенерационный цикл становится замкнутым, в качестве реагентов используют гидрокарбонат натрия и гидроксид кальция. Производство соды сложнее и дороже производства хлорида натрия, что является существенным недостатком данного метода.

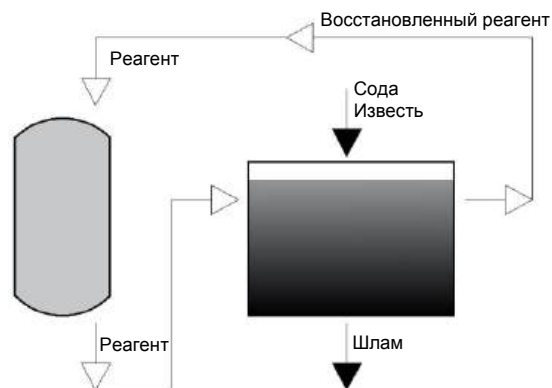


Рис. 2. Схема повторного использования регенерационного раствора

Обессоливание воды при помощи ионного обмена сопровождается значительным расходом щелочей и кислот для регенерации, прямо пропорциональным солесодержанию исходной воды. При комбинации Na-катионитового и анионитного фильтра в ОН-форме с электродиализатором с биполярными и катионитными ионообменными мембранами возможно реализовать бессточную схему обессоливания [22]. Вода, прошедшая через Na-катионитовый фильтр, подается на электродиализатор, где происходит извлечение кислоты и щелочи из исходной воды с накоплением сульфата и хлорида натрия. Обработанная в кислотных камерах ЭДА вода проходит вакуумный декарбонизатор для удаления бикарбоната-иона в виде углекислого газа. При последующей фильтрации на анионитном фильтре сульфат- и хлорид-ионы замешаются на гидроксид-ион, вода обессолена. Щелочь используют для регенерации анионитного фильтра. Отработанные регенерационные растворы с обоих типов фильтров смешивают, умягчают и используют для последующей регенерации катионитного фильтра. Осадок, содержащий соли карбоната кальция и гидроксида магния, утилизируют. Данная технология может быть реализована только при равенстве щелочности и общей жесткости воды.

Наиболее перспективным методом очистки регенерационных сточных вод натрий-катионитовых фильтров является разделение стоков на растворы, содержащие их компоненты, и чистую воду при помощи нанофильтрации за счет разной селективности мембраны по отношению к одновалентным и двухвалентным солям [23]. Фильтрация осуществляется при пониженных значениях давления по сравнению с процессом обратного осмоса, что делает их применение более энергоэффективным. Возврат в производство раствора хлорида натрия в регенерационной концентрации способствует уменьшению количества сбрасываемых сточных вод и экономии на закупке реагента. Отделенные растворы хлорида кальция и магния подлежат отдельной утилизации.

Заключение

Развитие технологий противоточной регенерации, начатое в 1960-х гг., помогло уменьшить количество образования сточных вод, но полностью эта проблема пока не решена. Предложенные способы восстановления растворов NaCl по тем или иным причинам до сих пор не реализуют в промышленности, поэтому поиск новых методов восстановления солевых растворов, позволяющих предотвратить загрязнение природных водоемов залповыми сбросами хлоридов, безусловно, актуален. Сокращение количества солевых сбросов может быть достигнуто как совершенствованием действующих технологических схем подготовки воды, так и повторным использованием стоков в цикле водоподготовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 20995-75 Котлы паровые стационарные давлением до 3,9 МПа. Показатели качества питательной воды и пара. — Введ. 1977-05-01.

2. РД 24.032.01-91 Методические указания "Нормы качества питательной воды и пара, организация водно-химического режима и химического контроля паровых стационарных котлов-утилизаторов и энерготехнологических котлов". — СПб.: АО НПО ЦКТИ. — Введ. 1991-07-01.
3. РД 24.031.120-91. Методические указания. Нормы качества сетевой и подпиточной воды водогрейных котлов, организация водно-химического режима и химического контроля. — СПб.: АО НПО ЦКТИ, ЦКТИ. — Введ. 1991-07-01.
4. **Лифшиц О. В.** Справочник по водоподготовке котельных установок. Изд. 2, перераб. и доп. — М.: "Энергия", 1976. — 288 с.
5. **Орлов В. А., Квитка Л. А.** Водоснабжение. — М.: ИНФРА-М, 2015. — 443 с.
6. **Первов А. Г., Спицов Д. В., Говорова Ж. М.** Разделение высокоминерализованных стоков с применением нанофильтрационных мембран для упрощения их последующей утилизации // Мембраны и мембранные технологии. 2021. Т. 11. № 5. С. 345—359.
7. Постановление Правительства РФ от 22 мая 2020 г. № 728 "Об утверждении Правил осуществления контроля состава и свойств сточных вод" и о внесении изменений и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации.
8. **Тихонов И. А.** Сточные воды установки На-катионирования воды. Состав. Способ утилизации // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2021. № 8. С. 12—15.
9. **Жадан А. В., Бушуев Е. Н.** Практическая реализация противоточной технологии ионного обмена // Вестник ИГЭУ. 2012. № 5. С. 10—15.
10. **Юрчевский Е. Б., Яковлев А. В.** Внедрение технологии противоточного ионирования на базе реконструкции установленного оборудования // Энергосбережение и водоподготовка. 1998. № 1. С. 52—59.
11. РД 34.02.401 (МТ 34-00-030-87). Методические указания. Методика разработки норм и нормативов водопотребления и водовведения на предприятиях теплоэнергетики. — М.: СПО Союзтехэнерго. — Введ. 1987-01-01.
12. **Веселовская Е. В., Луконина О. В., Шишло А. Г.** Современные проблемы реконструкции водоподготовительных установок теплоэнергетических предприятий // Известия высших учебных

- заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2012. № 2. С. 63—66.
13. **Кривченкова Е. А., Панфилова Л. А., Чернова И. А.** Анализ ассортимента и качества катионитов, представленных на российском рынке и предназначенных для применения на водоподготовительных установках ТЭС // Теплоэнергетика. 2021. № 10. С. 63—72.
14. **Громов С. Л.** Технологии противоточной регенерации ионитов для водоподготовки. Ч. 1 // Теплоэнергетика. 2006. № 8. С. 33—37.
15. **Громов С. Л.** Технологии противоточной регенерации ионитов для водоподготовки. Ч. 2 // Теплоэнергетика. 2006. № 11. С. 50—55.
16. **Волоцков Ф. П.** Очистка и использование сточных вод гальванических производств. — М.: Стройиздат, 1983. — 104 с.
17. **Первов А. Г., Юрчевский Е. Б.** Использование мембранных технологий в системах водоподготовки энергетических объектов // Энергосбережение и водоподготовка. 2005. № 5(37). С. 10—14.
18. **Хазиахметова Д. Р., Шищенко В. В.** Обработка и утилизация минерализованных сточных вод химводообессоливающих установок // Теплоэнергетика. 2004. № 11. С. 66—70.
19. **Ларин А. Б., Сорокина А. Я.** Утилизация регенерационных вод установки химического обессоливания добавочной воды на ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 2014. № 5(91). С. 8—12.
20. **Van der Bruggen B., Koninckx A., Vandecasteele C.** Separation of monovalent and divalent ions from aqueous solution by electrodialysis and nanofiltration // Water Research. 2004 March. V. 38(5). P. 1347—53. DOI: 10.1016/j.watres.2003.11.008.
21. **Fengrui Y., Zhi W., Fanglei Y., Jixiao W.** Progress in separation of monovalent/divalent inorganic salt solutions by nanofiltration // CIESC Journal. 2021. V. 72. Iss. 2. P. 799—813. DOI: 10.11949/0438-1157.20200570.
22. **Михайлин А. В., Чухин В. А.** Бессточная технология обессоливания воды // Вестник МГСУ. 2009. № 2. С. 151—153.
23. **Первов А. Г., Спицов Д. В.** Разделение высокоминерализованных стоков установок ионного обмена с применением нанофильтрационных мембран // Системные технологии. 2021. № 2(39). С. 35—55.

Features of application and operation of ion exchange installations

D. V. SPITSOV, A. M. PAVELKOVA

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

This article provides a brief review of study the features of the use of ion-exchange softening for water hardness removal and sewage treatment. The selection of technology of ion-exchange and their schemes, as well as the design of filters, grows both from the qualitative composition of the treated water, and from the required quality of the treated water. Methods of mineralized effluents handling into sewer systems and treatment are reviewed and discussed. Consider proposals of methods to reduce sewage, improving the quality of filtration.

Keywords: water hardness removal, sodium-cation exchange, mineralized effluent, direct flow filtration, countercurrent regeneration.

Bibliography — 23 references.

Received February 27, 2023

УДК 628.16:544.723

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_2_14

EDN: CJTDZM

Адсорбенты из подсолнечной лузги для очистки воды от ионов хрома (VI)

А. А. ФЕДОТОВ; Е. Ю. РУДЕНКО, д-р биол. наук

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

Исследован процесс модификации подсолнечной лузги в целях получения адсорбента для удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод. Показано, что данный процесс зависит от химической природы и концентрации модифицирующего вещества, температуры и продолжительности проведения процесса модификации. Рассмотрен адсорбент из подсолнечной лузги, модифицированный 2,5 М-ным раствором серной кислоты при температуре 60 °С в течение 30 мин. Доказано, что такой адсорбент предпочтительно использовать для удаления из водных растворов ионов хрома (VI), так как он имеет более высокие сорбционные характеристики, чем немодифицированная подсолнечная лузга.

Ключевые слова: подсолнечная лузга, модификация, сточная вода, очистка, тяжелые металлы, хром (VI).

Загрязнение воды ионами тяжелых металлов создает серьезную угрозу для существования всех форм жизни на Земле [1]. Хром (VI), содержащийся в сточных водах гальванического, кожевенного, красильных, текстильных и других производств, является одним из наиболее токсичных загрязнителей гидросферы [2].

Подсолнечник — одна из самых распространенных в мире сельскохозяйственных культур [3], которую используют для производства растительного масла. На долю лузги приходится около трети массы семян подсолнечника, поэтому ее утилизация является серьезной проблемой для масложировой промышленности [4]. Чаще всего лузгу, образующуюся при производстве подсолнечного масла, сжигают с получением энергии, увеличивая загрязнение атмосферы. Новым направлением утилизации подсолнечной лузги является производство адсорбентов для очистки природных и сточных вод от загрязнений различной химической природы [5, 6].

Цель исследования — изучение возможности использования немодифицированной и модифицированной подсолнечной лузги для создания адсорбентов, очищающих воду от ионов хрома (VI).

Задачи исследования — изучить зависимость процесса удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод от химической природы и концентрации вещества, использованного для модификации подсолнечной лузги; исследовать зависимость процесса удаления ионов хрома (VI) из мо-

дельных растворов сточных вод от температуры и продолжительности проведения процесса модификации подсолнечной лузги; на основании полученных данных оценить возможность использования немодифицированной и модифицированной подсолнечной лузги для создания адсорбентов, очищающих воду от ионов хрома (VI); опираясь на трехуровневый полный факторный план эксперимента, определить оптимальные условия проведения процесса модификации подсолнечной лузги; исследовать адсорбционные свойства подсолнечной лузги, полученной при оптимальных условиях проведения процесса модификации.

Объекты и методы исследований

Объектом исследований являлась подсолнечная лузга, полученная на Маслоэкстракционном заводе ЗАО «Самараагропромпереработка» (г. Безенчук Самарской обл.) и высушенная в сушильном шкафу ПЭ-4610 (Экоприбор, Россия) при температуре 105 °С до постоянной массы. Модельный раствор сточных вод, содержащий ионы хрома (VI), готовили путем растворения бихромата калия ($K_2Cr_2O_7$) в дистиллированной воде до достижения концентрации ионов хрома (VI), равной 10 мг/дм³.

Для улучшения сорбционных свойств в отношении ионов хрома (VI) проводили модификации подсолнечной лузги различными химическими веществами в разных условиях проведения экспериментов. Для выбора наиболее эффективного химического соединения, используемого в качестве модификатора, к навескам подсолнечной лузги массами по 10 г каждую приливали по 200 см³ 1 М-ных растворов кислот (серной, соляной, азотной и фосфорной) и щелочей (гидроксидов калия и натрия) и перемешивали. Для исследования влияния концентрации модифици-

Федотов Алексей Анатольевич, магистрант.

E-mail: fedotov23.f@yandex.ru

Руденко Елена Юрьевна, профессор.

E-mail: e_rudenko@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 2 февраля 2023 г.

© Федотов А. А., Руденко Е. Ю., 2023

рующего вещества на сорбционные свойства к навескам подсолнечной лузги массой по 10 г каждая приливали по 200 см³ 2 М, 3 М, 4 М-ных растворов H₂SO₄ и перемешивали. Процесс модификации проводили в термостате при температуре 30 °С в течение 30 мин. Для определения влияния температуры модификации на сорбционные свойства к навескам подсолнечной лузги массой по 10 г каждая приливали по 200 см³ 1 М-ного раствора H₂SO₄ и перемешивали. Модификацию проводили в термостатах при температурах 30, 45, 60 и 75 °С в течение 30 мин. Для изучения влияния продолжительности воздействия вещества-модификатора на сорбционные свойства навески подсолнечной лузги массами по 10 г каждая заливали 1 М-ным раствором H₂SO₄ объемом 200 см³ и перемешивали. Процесс обработки проводили в термостате при температуре 30 °С в течение 30, 60, 90 и 120 мин.

Модифицированную лузгу отфильтровывали через марлю и 3 раза промывали дистиллированной водой объемами по 200 см³ каждый, затем высушивали в сушильном шкафу ПЭ-4610 (Экоприбор, Россия) при температуре 105 °С до постоянной массы и использовали для очистки модельных растворов сточных вод.

Для изучения сорбирующих свойств к навескам немодифицированной (контроль) и модифицированной подсолнечной лузги массами по 1 г каждая приливали по 200 см³ модельного раствора сточных вод, содержащего 10 мг/дм³ ионов хрома (VI). Колбы плотно закрывали пробками и энергично встряхивали в течение 2 ч на шейкер-инкубаторе ES 20/60 (Biosan, Латвия) с частотой вращения 150 об/мин при комнатной температуре. Сорбенты удаляли фильтрацией через фильтровальную бумагу "красная лента". В фильтрах определяли остаточные концентрации ионов хрома фотометрическим методом с дифенилкарбазидом [7].

Показатели адсорбционной активности подсолнечной лузги по метиленовому синему, метиловому оранжевому, йоду, а также влагоемкость определяли стандартными методами [8].

Эксперименты проводили в трехкратной повторности. Математическую обработку результатов проводили с применением программы "Statistica 10.0".

Результаты исследований и их обсуждение

Предыдущие исследования [8] показали, что подсолнечная лузга — гетеропористый сорбент, обладающий способностью к хемосорбции, в котором имеются мезо- и макропоры, но преобладают поры, имеющие минимальный диаметр около 1,5 нм. Вследствие содержания восков подсолнечная лузга имеет невысокую влагоемкость.

Модификация растворами различных кислот и щелочей изменяет адсорбционные свойства подсолнечной лузги и степень удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод. При обработке 1 М-ными растворами гидроксидов калия и натрия при температуре 30 °С в течение 30 мин подсолнечная лузга теряет способность адсорбировать ионы хрома (VI) из очищаемых модельных растворов сточ-

ных вод. Кислотная модификация подсолнечной лузги при температуре 30 °С в течение 30 мин позволяет получить адсорбенты, повышающие степень удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод от 1,64 до 3,76 раза по сравнению с контрольной необработанной подсолнечной лузгой (рис. 1).

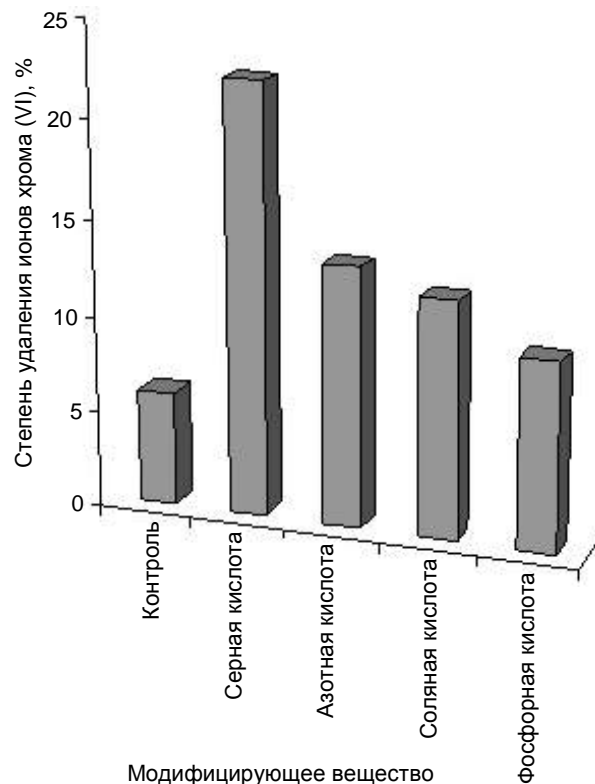


Рис. 1. Зависимость степени удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод от вещества, использованного для модификации подсолнечной лузги

Наименьшее влияние на степень удаления ионов хрома (VI) оказывает модификация подсолнечной лузги 1 М-ным раствором фосфорной кислоты, позволяющая увеличить степень удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод в 1,64 раза относительно процесса очистки, проведенного с немодифицированной подсолнечной лузгой. Модификация подсолнечной лузги 1 М-ным раствором азотной кислоты повышает степень удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод в 2,27 раза, а обработка 1 М-ным раствором соляной кислоты — в 2,07 раза относительно контроля. Обработка подсолнечной лузги 1 М-ным раствором серной кислоты увеличивает степень удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод в 3,76 раз по сравнению с очисткой, проведенной необработанной лузгой.

Повышение способности подсолнечной лузги удалять ионы хрома (VI) из модельных растворов сточных вод при кислотной модификации, возможно, обусловлено тем, что серная, азотная и соляная кислоты повышают общее количество функциональных групп на поверхности растительных клеток и волокон [9], а фосфорная кислота вызывает дегидратацию, деполимеризацию и перераспределение биополимеров [10].

В зависимости от молярной концентрации серной кислоты, использованной для модификации подсолнечной лузги при температуре 30 °С в течение 30 мин, возрастает степень удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод от 3,76 до 6,75 раза по сравнению с контрольной немодифицированной подсолнечной лузгой (рис. 2).

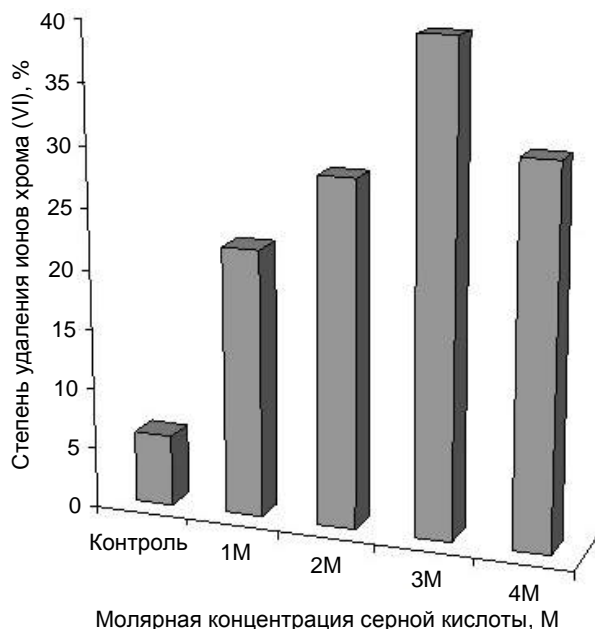


Рис. 2. Зависимость степени удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод от молярной концентрации серной кислоты, использованной для модификации подсолнечной лузги

Обработка подсолнечной лузги 1 М-ным раствором серной кислоты повышает степень удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод в 3,76 раза, а модификация 2 М-ным раствором серной кислоты — в 4,83 раза относительно контроля. Обработка 4 М-ным раствором серной кислоты увеличивает степень удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод в 5,25 раза по сравнению с очисткой немодифицированной подсолнечной лузгой. Наибольшее влияние на степень удаления ионов хрома (VI) оказывает модификация подсолнечной лузги, проведенная 3 М-ным раствором серной кислоты, позволяющая увеличить степень удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод в 6,75 раза по сравнению с процессом очистки, проведенным с необработанной подсолнечной лузгой.

Увеличение способности модифицированной подсолнечной лузги удалять ионы хрома (VI) из модельных растворов сточных вод при повышении концентрации раствора модифицирующей кислоты, вероятно, происходит за счет расширения пор и более неоднородного распределения их по размерам [11].

Повышение температуры проведения процесса модификации подсолнечной лузги 1 М-ным раствором серной кислоты в течение 30 мин увеличивает степень удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод от 3,76 до 6,10 раза по сравнению с контрольной немодифицированной подсолнечной лузгой (рис. 3).

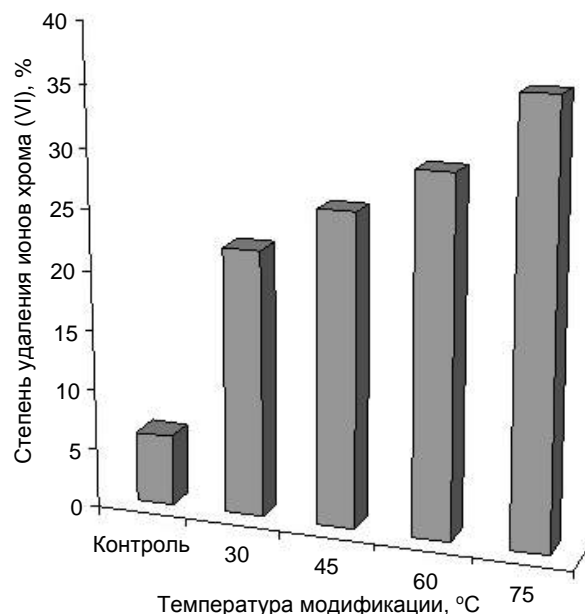


Рис. 3. Зависимость степени удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод от температуры модификации подсолнечной лузги

Обработка подсолнечной лузги 1 М-ным раствором серной кислоты при температуре 30 °С повышает степень удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод в 3,76 раза по сравнению с контрольным образцом немодифицированной подсолнечной лузги. Увеличение температуры модификации подсолнечной лузги до 45 °С повышает степень удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод в 4,41 раза, а нагревание лузги до температуры 60 °С приводит к возрастанию степени удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод в 5,03 раза по сравнению с контрольной необработанной серной кислотой подсолнечной лузгой. Наибольшая степень удаления ионов хрома (VI) обнаружена при очистке модельных растворов сточных вод подсолнечной лузгой, модифицированной 1 М-ным раствором серной кислоты при температуре 75 °С, которая в 6,10 раза превышает степень удаления ионов хрома (VI), обнаруженную при очистке модельных растворов сточных вод с помощью контрольного немодифицированного образца подсолнечной лузги.

Повышение способности воздействия подсолнечной лузги удалять ионы хрома (VI) из модельного раствора сточных вод при возрастании температуры модифицирующего раствора серной кислоты, вероятно, происходит из-за облегчения доступа модифицирующего вещества внутрь модифицируемого растительного материала вследствие его гидратации и набухания [8].

Возрастание продолжительности модификации подсолнечной лузги 1 М-ным раствором серной кислоты при температуре 30 °С почти не увеличивает степень удаления из модельных растворов сточных вод ионов хрома (VI) по сравнению с очисткой контрольной немодифицированной подсолнечной лузгой. При модификации подсолнечной лузги в течение 30, 60 и 120 мин степень удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод повышается в 3,76 по сравнению с очисткой немодифицированной

подсолнечной лузгой и составляет 22,2 %. Обработка подсолнечной лузги 1 М-ным раствором серной кислоты при температуре 30 °С в течение 90 мин увеличивает степень удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод в 3,97 раза относительно очистки, проведенной с необработанной подсолнечной лузгой, и составляет 23,4 %.

На основании предварительных экспериментов было установлено, что факторами, оказывающими наибольшее влияние на степень удаления ионов хрома, являются молярная концентрация модифицирующего вещества и температура, при которой раствор серной кислоты воздействует на подсолнечную лузгу. На основании этого был построен трехуровневый полный факторный план эксперимента (табл. 1).

Таблица 1

Трехуровневый полный факторный план эксперимента

№ опыта	Факторы		Отклик
	Температура воздействия реагента (T), °С	Молярная концентрация модифицирующего вещества (C), М	
1	30	1	22,2
2	30	2	28,5
3	30	3	39,8
4	45	1	26,0
5	45	2	24,7
6	45	3	28,5
7	60	1	29,7
8	60	2	42,3
9	60	3	22,2

Поверхность отклика полученной математической модели описывается следующим уравнением:

$$X = 29,322 + 0,617T + 2,1C - 2,192T^2 + 1,883C^2.$$

Адекватность уравнения подтверждается нормальным вероятностным графиком распределения

остатков. Нормальное распределение остатков на графике также подтверждает адекватность полученной модели. Графическая интерпретация полученной модели представлена на рис. 4 и 5.

Анализ диаграмм поверхности отклика, а также профилей предсказанных значений и функций желательности, показал, что максимальная степень удаления ионов хрома (VI) достигается при очистке модельного раствора сточных вод подсолнечной лузгой, модифицированной 2,5 М-ным раствором серной кислоты при температуре 60 °С в течение 30 мин.

Результаты анализа сорбционных свойств немодифицированной подсолнечной лузги и подсолнечной лузги, модифицированной 2,5 М-ным раствором серной кислоты при температуре 60 °С в течение 30 мин, представлены в табл. 2.

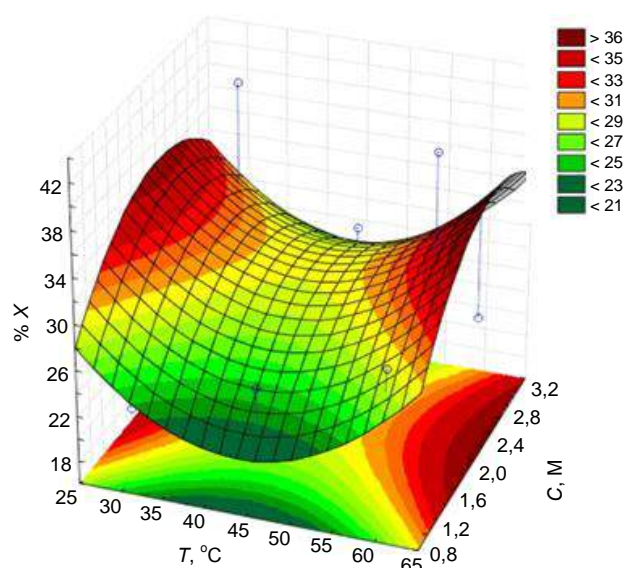


Рис. 4. Поверхность отклика для степени очистки от ионов хрома

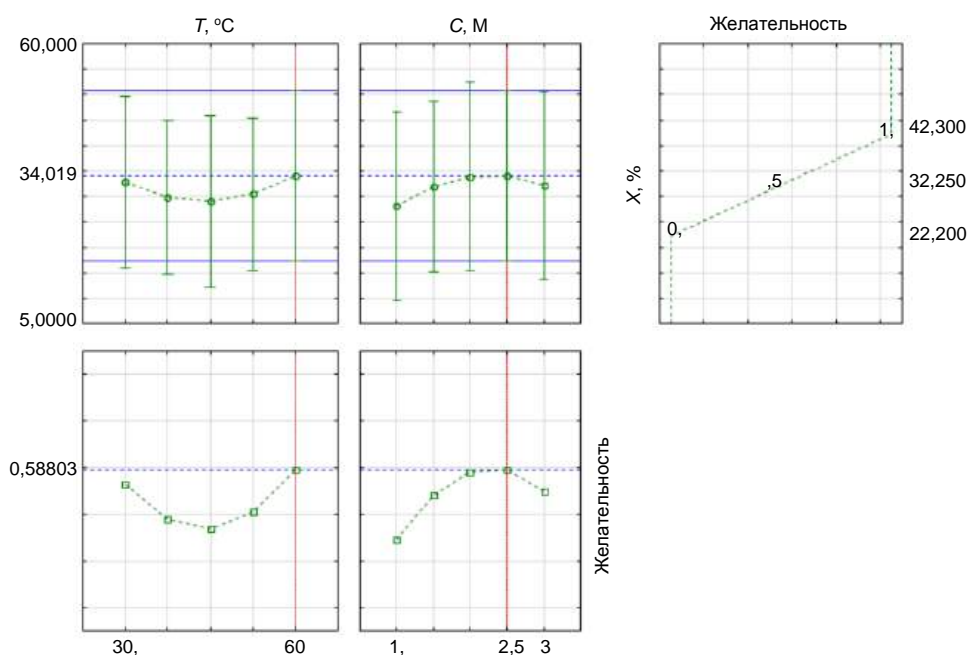


Рис. 5. Профили предсказанных значений и функций желательности

Таблица 2

Сорбционные свойства немодифицированной и модифицированной подсолнечной лузги

Показатель	Подсолнечная лузга	
	немодифицированная	модифицированная
Адсорбционная активность по метиленовому синему, мг/г	29,67 ± 0,74	38,53 ± 0,96
Адсорбционная активность по метиловому оранжевому, мг/г	27,85 ± 0,70	29,61 ± 0,74
Адсорбционная активность по йоду, %	5,40 ± 0,13	6,13 ± 0,15
Суммарный объем пор по воде, см ³ /г	35,26 ± 0,88	46,14 ± 1,15
Влагоемкость, см ³ /г	0,65 ± 0,02	0,76 ± 0,02

При модификации раствором серной кислоты адсорбционная активность подсолнечной лузги по метиленовому синему повышается в 1,30 раза; адсорбционная активность по метиловому оранжевому — в 1,06 раза; адсорбционная активность по йоду — в 1,14 раза; суммарный объем пор по воде — в 1,31 раза; влагоемкость — в 1,17 раза по сравнению с немодифицированной подсолнечной лузгой. Таким образом в процессе модификации в подсолнечной лузге увеличивается общее количество пор и возрастает влагоемкость, что повышает доступность подсолнечной лузги для контакта с водными растворами. Количество пор, имеющих минимальный диаметр около 1,5 нм, адсорбирующих метиленовый синий и метиловый оранжевый, увеличивается в большей степени, чем количество пор, имеющих минимальный диаметр около 1,0 нм и адсорбирующих йод.

Заключение

Результаты проведенных исследований позволили сделать следующие выводы:

- Немодифицированную и модифицированную подсолнечную лузгу можно использовать для создания адсорбентов, очищающих модельные растворы сточных вод от ионов хрома (VI).
- Процесс удаления ионов хрома (VI) из модельных растворов сточных вод зависит от химической природы и концентрации вещества, использованного для модификации подсолнечной лузги, а также от температуры и продолжительности проведения процесса модификации подсолнечной лузги.
- Наибольшее влияние на процесс модификации подсолнечной лузги оказывает концентрация модифицирующего вещества, меньше воздействует температура модификации, продолжительность протекания процесса модификации почти не влияет на адсорбционные свойства полученной модифицированной подсолнечной лузги.
- Трехуровневый полный факторный план эксперимента показал, что ионы хрома (VI) из модельных растворов сточных вод наиболее эффективно удаляет подсолнечная лузга, модифицированная

2,5 М-ным раствором серной кислоты при температуре 60 °С в течение 30 мин, которая имеет более высокие показатели влагоемкости, суммарного объема пор по воде и адсорбционных активностей по метиленовому синему, метиловому оранжевому, йоду, чем немодифицированная подсолнечная лузга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yang X., Wan Y., Zheng Y. et al. Surface functional groups of carbon-based adsorbents and their roles in the removal of heavy metals from aqueous solutions: A critical review // *Chemical Engineering Journal*. 2019. V. 366. P. 608—621.
2. Zou Z., Tang Y., Jiang C., Zhang J. Efficient adsorption of Cr(VI) on sunflower seed hull derived porous carbon // *J. Environmental Chemical Engineering*. 2015. V. 3. Iss. 2. P. 898—905.
3. Konyali S. Sunflower production, consumption, foreign trade and agricultural policies in Turkey // *Social Sciences Research Journal*. 2017. V. 6. P. 11—19.
4. Anastopoulos I., Ighalo J. O., Igwegbe C. A. et al. Sunflower-biomass derived adsorbents for toxic/heavy metals removal from (waste) water // *J. Molecular Liquids*. 2021. V. 342. P. 117540. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117540>.
5. Liu Y., Li X., Sun Y., Yang R., Lee Y., Ahn J.-H. Macroporous carbon with a three-dimensional channel skeleton derived from waste sunflower seed shells for sustainable room-temperature sodium sulfur batteries // *J. Alloys and Compounds*. 2021. V. 853. P. 157316.
6. Федотов А. А., Руденко Е. Ю. Получение адсорбентов из подсолнечной лузги для удаления хрома (VI) из сточных вод // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2022. Т. 12. № 4. С. 506—513. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-4-506-513>.
7. ПНДФ 14.1:2:4.52-96. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации ионов хрома в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с дифенилкарбазидом. — М., 2016. — 20 с.
8. Руденко Е. Ю., Царева Е. А., Давлятшина М. З., Темникова Е. С. Адсорбенты из отходов пищевой промышленности для очистки воды // *Экология промышленного производства*. 2022. № 1(117). С. 18—23.
9. Gautam R. K., Mudhoo A., Lofrano G., Chattopadhyaya M. C. Biomass-derived biosorbents for metal ions sequestration: Adsorbent modification and activation methods and adsorbent regeneration // *J. Environmental Chemical Engineering*. 2014. V. 2. P. 239—259.
10. Lin Q. H., Cheng H., Chen G. Y. Preparation and characterization of carbonaceous adsorbents from sewage sludge using a pilot-scale microwave heating equipment // *J. Analytical and Applied Pyrolysis*. 2012. V. 93. P. 113—119.
11. Molina-Sabio M., Rodriguez-Reinoso F. Role of chemical activation in the development of carbon porosity // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2004. V. 241. P. 15—25.

Adsorbents from sunflower seed hull for water treatment from ions of chrome (VI)

A. A. FEDOTOV, E. Yu. RUDENKO

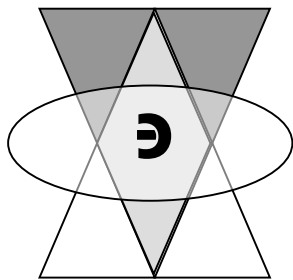
Samara State Technical University, Samara, Russia

Process of modification sunflower seed hull for the purpose of reception of adsorbent for removal of ions of chrome (VI) of modelling solutions of sewage is investigated. It is shown that the yielded process depends on the chemical nature and concentration of modifying material, temperature and duration of carrying out of process of modification. It is considered adsorbent from sunflower seed hull, by the modified 2,5 M solution of sulfuric acid at temperature 60 °C within 30 minutes. It is proved that such adsorbent is preferable for using to removal from water solutions of ions of chrome (VI) as it has higher sorption characteristics, than not modified sunflower seed hull.

Keywords: sunflower seed hull, modification, wastewater, removal, heavy metals, chromium (VI).

Bibliography — 11 references.

Received February 2, 2023



Экологический контроль. Прогнозирование

УДК 665.7.033.22; 66.081.3
DOI: 10.52190/2073-2589_2023_2_20
EDN: CKZWGX

Экологическое обоснование проектов снижения выбросов энергетических объектов в период неблагоприятных метеоусловий

И. М. ЕВГРАФОВА, д-р техн. наук

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет», Москва, Россия

А. В. ЕВГРАФОВ, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет МСХА
имени К. А. Тимирязева», Москва, Россия

Рассмотрены варианты мероприятий для снижения выбросов энергетических объектов в период неблагоприятных метеорологических условий (НМУ). Дано обоснование снижения выбросов на примере котельной нефтеперерабатывающего завода. Исследование показало, что наилучший экологический эффект достигается при полном выключении одного котла по сравнению со снижением общей мощности всех установок. Выбраны оптимальные решения для практикующих экологов и увеличены знания в области экологии энергетики в части обоснования экологических решений для энергетических установок.

Ключевые слова: неблагоприятные метеоусловия, выбросы энергетических установок, рассеивание загрязняющих веществ, качество атмосферного воздуха.

Неблагоприятные метеорологические условия являются кратковременными погодно-климатическими явлениями, способными существенно повлиять на качество атмосферного воздуха. Однако в научной литературе не рассматривался вопрос вариативности подходов по снижению выбросов от энергетических объектов. Снижение выбросов, связанных с загрязнением атмосферного воздуха как на этапе строительства, так и на этапе эксплуатации является важной экологической задачей. Количество и состав выбросов способны оказывать существенное влия-

ние на качество окружающей среды. Для предотвращения негативного воздействия разрабатываются проекты ПМООС, ООС и другие с обязательным установлением и обоснованием размеров санитарно-защитной зоны; а на этапе эксплуатации объекта — проекты ПДВ. Но экстремальным условием для выбросов всегда остаются НМУ. Их нельзя учесть на предпроектных стадиях работ при инженерно-гидрометеорологических изысканиях, но необходимо экстренно реагировать при их возникновении.

Цель работы — провести экологическую оценку различных вариантов снижения выбросов в атмосферный воздух от котельной нефтеперерабатывающего завода в период НМУ.

Задачи работы:

- обобщение подходов при составлении плана мероприятий в период НМУ;
- проведение экологического обоснования поиска оптимального варианта снижения выбросов;

Евграфова Ирина Михайловна, профессор кафедры "Инженерные изыскания и геоэкология".

E-mail: irina-sen811@yandex.ru

Евграфов Алексей Викторович, доцент кафедры "Экология".

E-mail: evgrafov-aleksey@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2023 г.

© Евграфова И. М., Евграфов А. В., 2023

- осуществление расчета валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух для различных режимов работы объекта в период НМУ.

Проект снижения выбросов в период НМУ

Положительным моментом НМУ является их краткосрочный характер, особое сочетание метеорологических факторов, способствующих загрязнению приземного слоя атмосферного воздуха выше предельно-допустимой концентрации (максимально-разовой).

Своевременное оповещение на безвозмездной основе осуществляется территориальными органами центра по гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. Задача всех юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, которые имеют источники выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, расположенных на объектах 1, 2, 3 категорий, разрабатывать план мероприятий при НМУ и следить за его своевременным осуществлением. План должен быть разработан для трех степеней опасности.

- Предупреждение 1-й степени опасности — в случае ожидаемого роста концентраций примесей в атмосферный воздух выше ПДК м.р.
- Предупреждение 2-й степени опасности — рост концентраций примесей выше трех ПДК м.р.
- Предупреждение 3-й степени опасности — рост концентраций примесей выше пяти ПДК м.р.

Ранее [1—6] план мероприятий при НМУ был составной частью норматива ПДВ, но в проекте он яв-

ляется самостоятельным документом, который согласовывают в органах исполнительной власти субъектов РФ, уполномоченных осуществлять данный вид деятельности [7—9].

Ранее исходными данными для разработки плана мероприятий в рамках ПДВ являлись качественные и количественные составы выбросов и расчет рассеивания загрязняющих веществ. В проекте исходными данными являются [10—13]:

- данные инвентаризации стационарных источников выбросов;
- нормативы НПДВ, ВСВ, технологические нормативы;
- результаты расчета рассеивания загрязняющих веществ;
- результаты государственного и производственного экологического мониторинга;
- данные Госэконадзора на предмет превышения ПДК м.р. загрязняющих веществ на границе СЗЗ объекта неблагоприятного воздействия на окружающую среду.

Разработанные мероприятия при НМУ должны обеспечивать снижение приземных концентраций [14—15] на:

- 15—20 % при НМУ 1-й степени опасности;
- 20—40 % при НМУ 2-й степени опасности;
- 40—60 % при НМУ 3-й степени опасности.

Весомый вклад в загрязнение атмосферного воздуха при НМУ приносят тепловые энергетические установки [16, 17]. Исходя из опыта практической деятельности в данной сфере предлагаются подходы, представленные на рис. 1.

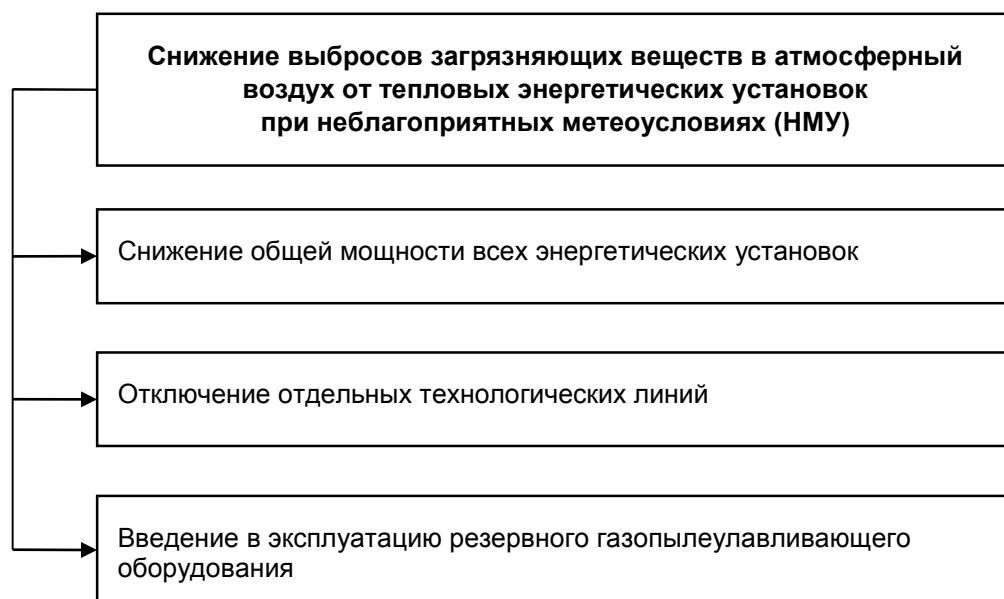


Рис. 1. Варианты мероприятий при НМУ для энергетических установок

Экологическое обоснование для модельного полигона

Для осуществления экологического обоснования в качестве модельного полигона был выбран объект — котельная НПЗ "Ростовка", расположенная в Каменском районе Пензенской области. Выбор именно этого объекта базировался на локальности данной котельной, с одной стороны, и близостью жилой застройки (до 250 м), с другой стороны.

Котельная предназначена для обеспечения теплом зданий НПЗ в зимний период. Топливом является сырая нефть. По характеру ведения технологических процессов и режиму работы оборудования залповых и аварийных выбросов не предполагается. Объект относится к 3-му классу опасности с размером СЗЗ — 300 м. Произведенная расчетная корректировка и обоснование позволили снизить размеры СЗЗ до 100 м (граница жилой застройки 250 м). Метеорологические характеристики рассеивания веществ и коэффициенты, определяющие условия рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Метеорологические характеристики рассеивания веществ и коэффициенты, определяющие условия рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере

Наименование характеристик	Показатель
Коэффициент, зависящий от стратификации атмосферы, А	160,0
Коэффициент рельефа местности	1,0
Средняя температура воздуха наиболее жаркого месяца года, T , °C	23,7
Средняя температура воздуха наиболее холодного месяца, T , °C	-28,0
Среднегодовая роза ветров, %	
север	9
северо-восток	6
восток	10
юго-восток	15
юг	15
юго-запад	16
запад	16
северо-запад	13
Скорость ветра, повторяемость превышения составляет 5%, м/с	8

Анализ архивных данных прогнозов НМУ по Пензенской обл., предоставленных Приволжским УГМС за 2020—2021 г. показал, что в среднем ежемесячно в течение года наблюдается порядка 6 дней с НМУ 1-й степени опасности, в том числе в зимний период. 2-й и 3-й степени опасности не было выявлено за указанный период. Таким образом, снижение выбросов в дни с НМУ должно составлять до 20 % от валового количества загрязняющих веществ.

В рассматриваемой котельной (водогрейной, УВТ — 2,0...95), предназначенной для нужд отопления и вентиляции, установлены два котла КВ-ГМ-1,0-95, теплопроводностью 9500 Ккал/кг, расход топлива составляет 500 т/г (250 т/г на каждый котел). Дымовые газы от каждого котла отводятся в атмосферу через две дымовые трубы диаметром 273 мм, высотой 16 м. Учитываемыми загрязняющими веществами являются оксиды азота, углерода, сернистый ангидрид, мазутная зола, сажа, бенз(а)перен.

Расчеты валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух проводили для четырех вариантов режима работы объекта в период НМУ [18—20].

- Штатный режим работы объекта с работающими двумя котлами.
- Снижение общей мощности всех энергетических установок.
- Отключение отдельных энергетических установок при полной загрузке оставшихся.
- Применение резервного газопылеулавливающего оборудования.

Расчет проведен по методике определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах. Расчет рассеивания загрязняющих веществ выполнен с помощью унифицированной программы расчета загрязнения атмосферы УПРЗА "ЭКОцентр — Стандарт". Расчетные характеристики приняты для суточного периода работы энергетической установки. Данные расчетных валовых суточных выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух приведены в табл. 2.

Таблица 2

Валовые суточные выбросы загрязняющих веществ от котельной установки

Загрязняющее вещество	Валовый суточный выброс загрязняющего вещества, г/с				Эффективность очистки, %
	Вариант 1 (штатный режим, расход топлива 2,08 т/сут)	Вариант 2 (снижение общей мощности на 20 %, расход топлива 1,6 т/сут)	Вариант 3 (отключение одного котла, расход топлива 1,04 т/сут)	Вариант 4 (применение ГПУ, расход топлива 2,08 т/сут)	
Азота диоксид	0,099	0,075	0,066	0,099	—
Азота оксид	0,016	0,012	0,011	0,016	—
Углерод (сажа)	0,031	0,024	0,021	0,002	95
Ангидрид сернистый	0,184	0,141	0,124	0,184	—
Углерод оксид	0,130	0,100	0,088	0,130	—
Бенз(а)пирен (3,4 бенз-пирен)	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	76
Мазутная зола тепло-электростанций	0,002	0,001	0,001	0,00008	95

Заключение

Размер санитарно-защитной зоны определен по результатам рассеивания выбросов в атмосферу наиболее загрязняющего вещества с учётом розы ветров, расчётный размер — из условия расстояния от источника выброса, на котором значения ПДК приземных концентраций достигают наихудшего варианта. Анализ расчётов рассеивания показал, что ни по одному веществу превышение ПДК не наблюдалось, поэтому корректировка размера санитарно-защитной зоны не требуется и принимается согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. Таким образом, расчётный размер санитарно-защитной зоны для котельной НПС "Ростовка" принят равным 100 м.

В результате анализа расчета суточных валовых выбросов объекта при различных режимах работы можно сделать следующие выводы.

- Превалирующими при всех режимах работы объекта загрязняющими веществами являются: сернистый ангидрид, оксид углерода, сажа диоксид и азота.

- Лучший экологический эффект по снижению выбросов в период НМУ достигается при полном выключении одного котла, а не снижении общей мощности всех установок.

- Применение резервного газопылеулавливающего оборудования при НМУ показывает наихудший экологический эффект, так как не позволяет осуществить очистку отходящих газов по всем загрязняющим веществам. Кроме того, это несет дополнительные эксплуатационные и капитальные затраты.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Акатьева Т. Г.** Сравнительный анализ качества атмосферного воздуха в период ремонта и эксплуатации котельной: мат. VI Всеросс. (национальной) науч.-практ. конф. "Актуальные проблемы экологии и природопользования", Курган, 2022. С. 3—6.
2. **Глазков С. С., Седаев А. А., Чуйкин С. В.** Снижение концентрации загрязняющих веществ в вентиляционных выбросах при неблагоприятных метеоусловиях и аварийных ситуациях // Научный вестник. Сер. Строительство и архитектура. 2013. № 1(29). С. 91—98.
3. **Дергунов А. В., Якубайлик О. Э.** Анализ температурных инверсий в периоды неблагоприятных метеоусловий в Красноярске: мат. VII Междунар. науч. конф. "Региональные проблемы дистанционного зондирования земли", Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий. 2020. С. 199—202.
4. **Долженков А. Ф., Джалетова Е. К., Никулина А. А.** Оценка экологического риска загрязнения атмосферы выбросами котельных малой мощности // Научный вестник НИИГД Респиратор. 2022. № 1(59). С. 77—82.
5. **Иванова Е. Е., Лугаськова Н. В.** Оценка выбросов в атмосферный воздух загрязняющих веществ, поступающих от котельной: мат. Второй Всероссийской с международным участием науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов "Экологическая безопасность в техносферном пространстве". 2019. С. 134—139.

6. **Иванова О. О., Иванова Ю. П., Азаров В. Н.** Влияние метеорологических условий на формирование городской среды линейных городов: мат. II Всеросс. конкурса науч.-исслед. работ "Инновационный потенциал развития науки в современном мире". Уфа, 2020. С. 36—39.
7. **Кешева Л. А., Теунова Н. В.** Распространение загрязняющих веществ в атмосфере при эксплуатации котельных установок // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. 2019. Т. 19. № 3. С. 70—77.
8. **Кириленко В. И., Маслов Е. Н., Муртузалиев М. А.** Оценка распределения концентрации загрязняющего вещества в атмосферном воздухе // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2022. № 1(19). С. 247—255.
9. **Лебедева Т. Б.** Анализ снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от котельной // Вестник КИГИТ. 2019. № 1. С. 97—105.
10. **Лукьянов С. В.** Оценка загрязнения воздушной среды в окрестностях автомагистралей при неблагоприятных метеоусловиях // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3. С. 101.
11. **Павлов В. И., Смоляков Я. С.** Влияние погодных условий на рост загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы: мат. IV студенческой науч.-практ. конф. "Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения". 2021. С. 253—257.
12. **Петрова Т. П.** Модель распределения воздушных потоков: сборник статей Междунар. науч.-практ. конф. "Материалы и методы инновационных научно-практических исследований и разработок". Уфа, 2022. С. 42—45.
13. **Ренев Я. Н., Шиндлер В. В.** Обеспечение экологической безопасности населения г. Тюмени при неблагоприятных метеоусловиях (на примере ТЭЦ-1): мат. 52-й ежегодной Всеросс. конф. студентов и молодых ученых, посвященной 90-летию доктора медицинских наук, профессора, заслуженного деятеля науки РФ Павла Васильевича Дунаева "Актуальные проблемы теоретической, экспериментальной, клинической медицины и фармации". 2018. С. 152.
14. **Сарилов М. Ю., Тютрин М. Н.** Метод снижения выбросов вредных веществ при сжигании мазута в котельных установках: мат. 18-й Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам экологии и безопасности "Дальневосточная весна — 2020". 2020. С. 43—44.
15. **Талалай Т. О., Лебедева М. Г., Крымская О. В., Крымская А. А.** Влияние синоптических условий на содержание загрязняющих веществ в атмосфере // Региональные геосистемы. 2021. Т. 45. № 1. С. 107—117.
16. **Уфимцева М. Г., Смоляков Я. С.** Возможное воздействие котельной на атмосферный воздух: мат. Национальной науч.-практ. конф. "Перспективные разработки и прорывные технологии в АПК". 2020. С. 78—81.
17. **Уфимцева М. Г., Смоляков Я. С.** Возможный рост концентраций загрязняющих веществ промышленного предприятия в приземном слое атмосферы // Мир инноваций. 2021. № 2. С. 48—52.
18. **Шагидуллин А. Р., Габдрахимов В. А., Магдеева А. Р., Ибрагимова А. А., Шагидуллин Р. А., Шагидуллин Р. Р.** Снижение негативного воздействия на атмосферный воздух в периоды неблагоприятных метеорологических условий: мат. Всеросс. науч.-практ. конф. "Экология. Риск. Безопасность". Курган, 2020. С. 195—196.
19. **Шагидуллин А. Р., Гилязова А. Ф., Магдеева А. Р., Шагидуллин Р. А., Шагидуллин Р. Р.** Обеспечение снижения загрязнения атмосферного воздуха при неблагоприятных метеоусловиях. В сб.: Химия и инженерная экология: XVIII сб. тр. международной научной конференции. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ). 2018. С. 231—235.
20. **Шагидуллин Р. А., Григорьева И. Г., Валиев В. С.** Комплексная оценка неблагоприятных для рассеивания метеоусловий, формирующие высокие уровни загрязнения воздуха: на примере территории г. Нижнекамска: сб. Химия и инженерная экология: XIX сб. тр. международной научной конференции, посвященной 150-летию периодической таблицы химических элементов. 2019. С. 293—297.

Environmental justification for projects to reduce emissions from energy facilities during adverse weather conditions

I. M. EVGRAFOVA

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

A. V. EVGRAFOV

RSAU-Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazeva, Moscow, Russia

In this study, firstly, options for measures for the section of AWC are considered, and secondly, an environmental and economic justification for reducing emissions is carried out using the example of a boiler house of an oil refinery. The study showed that the best environmental effect is achieved by completely shutting down one boiler, compared to reducing the total capacity of all installations. The results of the study make it possible to choose the best solutions for practicing ecologists and expand knowledge in the field of energy ecology in terms of justifying environmental solutions for power plants.

Keywords: adverse weather conditions, emissions from power plants, dispersion of pollutants, air quality.

Bibliography — 20 references.

Received February 16, 2023

УДК 542.08, 519.24, 681.58, 004.89
DOI: 10.52190/2073-2589_2023_2_25
EDN: CNSDTE

Практическое внедрение систем автоматического контроля эмиссий загрязняющих веществ в химико-технологических процессах

В. А. ГАНЯВИН, канд. техн. наук; **А. Ю. ПОПОВ**, канд. хим. наук
ФГАУ «НИИ «Центр экологической промышленной политики»,
г. Мытищи, Московская обл., Россия

А. Н. ПРОНИН; **С. В. МЕДВЕДЕВСКИХ**, канд. техн. наук
ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», Санкт-Петербург, Россия

Д. В. ЖЕЛТУХИН
ООО «Газпром переработка», Санкт-Петербург, Россия

Представлены практические результаты тестового внедрения автоматизированной измерительной системы учёта выбросов для химико-технологического производства. Изложены основные принципы сбора и подготовки данных временных рядов для построения и обучения функции преобразования входных параметров в её выходной сигнал для цифрового газоанализатора. Определен компонентный состав программных и аппаратных модулей системы. Разработаны экранные формы системы для отображения показателей выбросов на автоматизированном рабочем месте в режиме "советчик оператора".

Ключевые слова: химико-технологические процессы, большие данные, автоматизированные измерительные системы, дескриптивная статистика, машинное обучение, глубокое обучение, цифровой двойник технологических процессов.

Исторически химико-технологическая индустрия является первопроходцем компьютерного управления, где для стабильного и эффективного ведения технологических процессов необходимо контролировать тысячи, а иногда и десятки тысяч параметров. В отраслях химико-технологических процессов (ХТП) сбор данных и их сохранение в базах данных временных рядов (БДВР) превратились в обычную процедуру, по факту это стало стандартом обеспечения безопасного и устойчивого управления технологическим процессом и привело к появлению развитых платформ для сбора и анализа больших данных. В большинстве случаев мониторинг и учёт технологических параметров для таких производств строится с использованием так называемых систем усовершенствованного управления технологическими про-

цессами (СУУТП) или Advanced Process Control (APC) в составе с прогнозирующими моделями управляемого процесса [1, 2]. Подход к контролю и учёту качества продукции на основе СУУТП может быть эффективно применен к построению систем промышленного экологического мониторинга выбросов загрязняющих веществ.

В данной работе описана автоматизированная измерительная система с использованием цифровых газоанализаторов с фокусом на проведение измерений компонентов химического состава загрязняющих веществ, опирающуюся, в том числе на большие производственные данные и методы искусственного интеллекта.

Основная часть

Динамика экологической ситуации и негативное воздействие на окружающую среду влекут за собой растущие требования к количественному измерению параметров газовоздушной смеси (ГВС) выбросов отходящих газов и передачи усредненных значений в единый государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду (НВОС). Автоматизированные измерительные системы (АИС) контроля выбросов загрязняющих веществ играют важную роль при производственном экологическом контроле, измерении количественного содержания компонентов газовой смеси выбросов в атмосферный воздух, характеризующих конкретный объект и этап производства промышленного предприятия [3].

Ганявин Василий Александрович, научный сотрудник.
E-mail: v.ganyavin@eipc.center
Попов Александр Юрьевич, старший научный сотрудник.
E-mail: a.popov@eipc.center
Пронин Антон Николаевич, генеральный директор.
E-mail: uniim@uniim.ru
Медведевских Сергей Викторович, руководитель отделения механических измерений.
E-mail: uniim@uniim.ru
Желтухин Дмитрий Викторович, начальник отдела охраны окружающей среды.
E-mail: Gpp@gpp.gazprom.ru

Статья поступила в редакцию 20 февраля 2023 г.

© Ганявин В. А., Попов А. Ю., Пронин А. Н., Медведевских С. В., Желтухин Д. В., 2023

Возможность создания на базе методов машинного и глубокого обучения гибкого предсказывающего алгоритма, адаптированного под изменяющиеся производственные условия и многовариантности режимов работы технологического оборудования, позволяет использовать в АИС цифровые газоанализаторы для онлайн измерений содержаний компонентов химического состава загрязняющих веществ на основе данных автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) [4, 5].

Для АСУ ТП контролируемые параметрами являются технологические параметры, от которых в той или иной степени могут зависеть качественные и количественные характеристики химического состава газовой дымовой смеси. При этом вид и степень зависимости определяется большим количеством одновременно воздействующих факторов. Наряду с общими закономерностями существенными для свойств продукции (полупродуктов, полуфабрикатов) могут оказаться факторы (либо их сочетание), определяемые спецификой как технологического потока, так и алгоритмической схемы системы автоматического управления. Выявление такого рода зависимостей ручными методами не всегда приносит желаемые результаты в условиях производства.

Статистические методы предоставляют возможность использования архивных исторических данных для выработки подхода к цифровому вычислению массовых либо объемных содержаний компонентов загрязняющих веществ в ГВС на основе параметров технологического процесса. Преимуществом такого подхода является возможность создания на базе методов машинного и глубокого обучения, гибкого предсказывающего алгоритма для цифрового газоанализатора, адаптированного под изменяющиеся производственные условия и многовариантности режимов работы технологического оборудования.

Автоматизированная измерительная система учёта выбросов (АИС УВ) — это первая в РФ автоматизированная измерительная система с использованием цифровых газоанализаторов для включения её в государственный реестр средств измерения. Система анализирует технологические параметры процессов и оборудования и предоставляет результаты интеллектуального измерения выбросов загрязняющих веществ для передачи информации в государственный реестр объектов НВОС с помощью удобных средств визуализации. Внедрение систем такого класса даёт возможность существенно сократить стоимость в плане частичной замены измерительных инструментальных средств на функции преобразования (математические модели) входных параметров системы в её выходной целевой параметр.

Автоматизированная система АИС УВ может использоваться для мониторинга выбросов загрязняющих веществ и предназначена для:

- автоматических непрерывных измерений концентрации загрязняющих веществ — оксида углерода (CO), оксида азота (NO), диоксида азота (NO₂), аммиака (NH₃), диоксида серы (SO₂), твердых (взвешенных) частиц, а также закиси азота (N₂O), диоксида углерода (CO₂), кислорода (O₂) и паров воды (H₂O), скорости потока, температуры и давления

в отходящих или технологических газах промышленных предприятий;

- сбора, обработки, визуализации, хранения полученных данных, предоставления полученных результатов в различных форматах;

- передачи по запросу накопленной информации в определенном формате на внешний удаленный сервер реестра объектов НВОС.

Система АИС УВ, в том числе в составе аппаратно-программного комплекса (АПК), является стационарным автоматическим многоканальным устройством непрерывного действия и состоит из двух уровней.

1. Нижний уровень включает программные коннекторы (драйвера промышленных протоколов), подключаемых к центральному хранилищу БДВР АСУ ТП, в которую средства измерения технологического процесса (поточные газоанализаторы, расходомеры, датчики измерения температуры, давления, скорости и т. д.) архивируют значения.

2. Верхний уровень является кроссплатформенной системой со специализированным программным обеспечением интеллектуального моделирования, сбора, хранения и передача данных во внешнюю сеть, реализованной на базе промышленного сервера под управлением ОС семейства Linux или Microsoft Windows.

Обмен данными между хранилищем данных АСУ ТП и сервером АИС УВ осуществляется в цифровой форме через интерфейс Ethernet по следующим протоколам: OPC UA, SQL, Modbus TCP/IP. Связь системы АИС УВ с удаленными автоматизированными рабочими станциями осуществляется через интерфейс Ethernet по протоколу HTTP.

Значения "сырых" онлайн измерений технологических параметров из БДВР, входящих в функцию преобразования, передаются на сервер системы, который проводит преобразование, обработку, вычисление и хранение результатов, осуществляет передачу данных на удаленный сервер реестра НВОС и персональный компьютер (ПК). ПК представляет собой автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора. Поставка элементов системы может быть реализована в виде серверного шкафа.

На рис. 1 показан пример программного интерфейса базового экрана "Рабочей панели" системы с отображением значений выбросов загрязняющих веществ и ключевых показателей, значения которых необходимы для оценки состояния вычисляемой функции и визуализации её состояния, а также для оценки качества технологических параметров.

Функционально информационно-алгоритмическое программное обеспечение (ПО) системы АИС УВ разделено на два уровня: уровень встроенного ПО — интеллектуальная среда статистического моделирования данных и диспетчерский уровень прикладного ПО — автоматизированное приложение системы контроля (рис. 2).

Встроенное ПО интеллектуальной среды моделирования специально разработана изготовителем и находится в Едином реестре российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных.

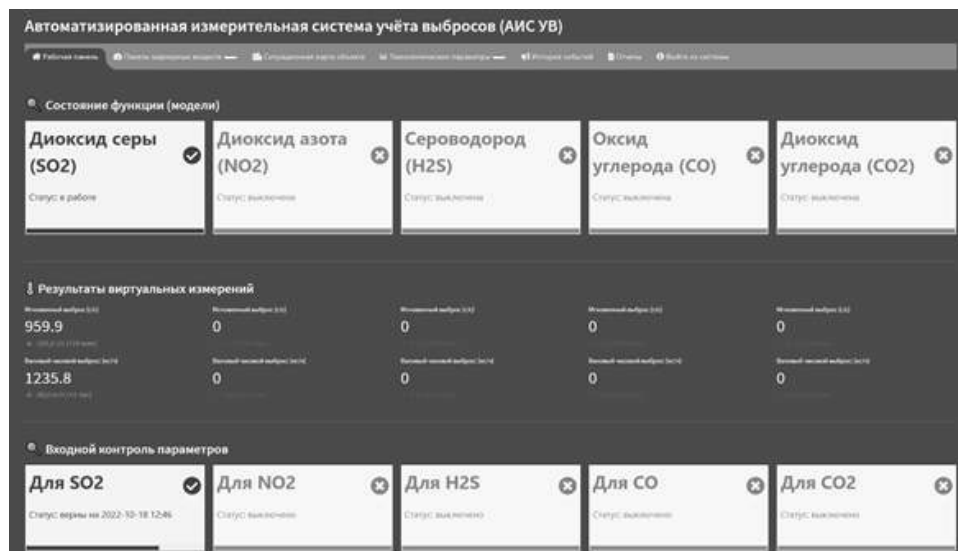


Рис. 1. Программный интерфейс базового экрана

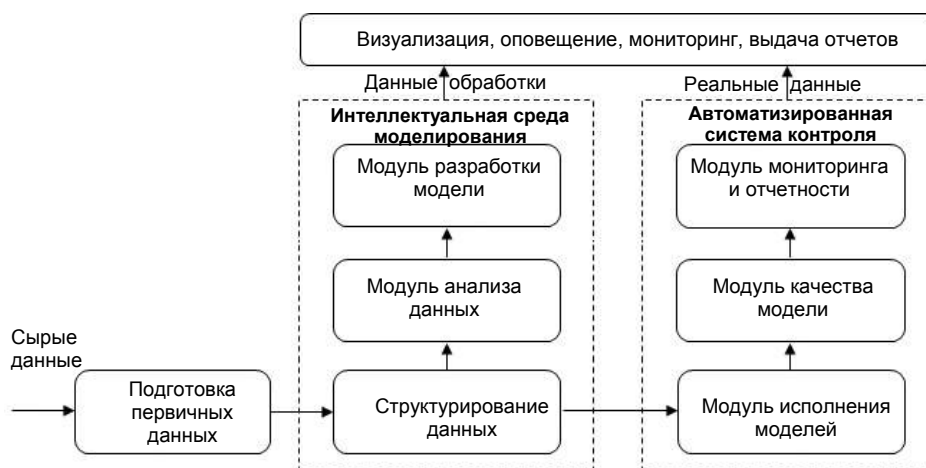


Рис. 2. Информационно-алгоритмическое ПО системы АИС УВ

Интеллектуальная среда моделирования (ИСМ) предназначена для выполнения аналитики данных, начиная от импорта и консолидации информации из БДВР, включая интеллектуальный статистический анализ, разработку и построение моделей с помощью методов машинного и глубокого обучения до визуализации и интеграции результатов модельных вычислений. Среда моделирования позволяет проводить глубокий анализ данных, обеспечивает управление жизненным циклом моделей, осуществляет гибкую настройку алгоритмов машинного обучения за счет настройки гиперпараметров, а также реализует функцию предварительных офлайн вычислений по функциям преобразования с отображением числовых значений, графиков и отчетов.

В состав среды моделирования включены два основных программных модуля.

1. Модуль анализа исторических данных, который предоставляет компонентный набор мощных аналитических инструментов для проведения многомерного анализа, первичной предобработки и обработки данных, средства (протокольные коннекторы) для подключения к источникам данных.

2. Модуль разработки модели, который предоставляет инструментарий для создания, обучения,

валидации и интерпретации моделей машинного и глубокого обучения. Функционал поддерживает автоматический поиск наилучшей модели для решения задач регрессии, кластеризации и распознавания образов (классификация) при обучении модели с учителем.

Прикладное ПО автоматизированной системы контроля в режиме реального времени производит сбор данных с систем АСУ ТП, преобразование, обработку и структурирование полученной информации, архивирование и визуализацию вычисляемых и измеряемых параметров по источнику выброса и является метрологически значимым [6]. Данное ПО реализует следующие расчетные алгоритмы:

- вычисление результатов измерений параметров по значениям аналоговых, цифровых и/или релейных сигналов, поступающих от БДВР;
- приведение результатов измерений массовой концентрации определяемых компонентов и расхода дымовых газов к нормальным условиям;
- пересчет объема массового и валового выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в г/с, кг/ч или т/г;
- сравнение результатов измерений с заданными пороговыми уставками.

Модуль исполнения модели позволяет запускать обученные модели эмиссий в динамическом режиме для онлайн вычисления значений для целевых параметров. Результаты вычислений целевых параметров и показателей сохраняются в собственной БДВР системы АИС УВ.

Модуль мониторинга и отчётности обеспечивает выполнение следующих функций:

- отображение текущих результатов измерений и просмотр архива;
- предоставление на дашбордах состояния основных параметров и компонентов системы, таких как качество и достоверность линий связи/данных/моделей, серверов и рабочих мест, сетевых коммутаторов, источников бесперебойного питания и т. п.;
- управление в ручном режиме опциями системы, в том числе запуск процедур генерации отчетных форм и выгрузка результатов в формате pdf;
- отображение событий, предупреждений и аварийных состояний, квитиование состояний с учётом уровней привилегии пользователя;
- функция автоматической и ручной "заморозки" архивирования измерений и результаты расчётов в аварийных режимах и на время проведения сервисных работ;
- настройки уставок предупреждений и аварийных состояний.

Программное обеспечение имеет защиту от несанкционированного доступа: защита осуществляется путем запроса пароля у пользователя. Уровень защиты метрологически значимого ПО от преднамеренных изменений, согласно рекомендации по метрологии [7], установлен средний, обеспечивающий проверку идентификации программного обеспечения по наименованию и номеру версии (идентификационный номер) ПО, значениям контрольных сумм файлов ПО и сериализованных функций преобразования в виде битовых последовательностей. Цифровой индикатор ПО в АИС УВ вычисляется 128-битным алгоритмом хеширования MD5 [8].

К метрологическому обеспечению АИС УВ, как и к любому другому средству измерения, предъявляются требования к измерениям параметров датчиками и приборами учёта, входящими в расчетную функцию, метрологические и технические требования к средствам этих измерений, требования к программному

обеспечению и условиям эксплуатации средств измерений [9, 10].

Как правило, степень количественной зависимости содержания компонентов химического состава загрязняющих веществ может характеризоваться большим количеством контролируемых параметров, качество измерений которых в некоторых случаях может не отвечать требованиям технологического регламента из-за возникновения различного рода неопределённостей и ошибок. В связи с этим, для обеспечения качественных измерений необходимо обеспечить достоверность первичной измерительной информации, поступающей из АСУ ТП с онлайн идентификацией аномальных значений.

Сырые необработанные данные не подходят для алгоритмов машинного и глубокого обучения из-за зашумленности, погрешности измерения и прочих неопределённостей, поэтому предварительная обработка является крайне важным этапом в мониторинге значений концентраций выбросов на основе производственных данных. Когда вычисления производятся на основе неверных данных, порождается ложная информация об объекте исследования, что может привести к неверным результатам.

АИС УВ содержит модуль обработки входных и выходных данных для модели, который выполняет ряд проверок во времени, близком к реальному: валидация диапазона измерения, проверка на "заморозку" значений, проверка качества входного значения, пропущенные измерения. Принципиальная схема обработки данных представлена на (рис. 3).

Некоторые проверки значений данных могут осуществляться на основе диагностических сообщений "интеллектуального" КИПиА (при поддержке обмена с объектом по HART-протоколу). После этого осуществляется исключение из мониторинга недостоверных (плохих) данных, добавление пропущенных измерений, при этом значения помечаются меткой, что качество добавленного измерения высокое, а надежность измерения — низкая, т. к. значения были получены алгоритмически. Затем, в случае необходимости, выполняется фильтрация значений.

Разработанный программный образец автоматизированной измерительной системы с использованием цифровых газоанализаторов был опробован и протестирован на исторических данных с установок получения элементарной серы (процесс Клауса).

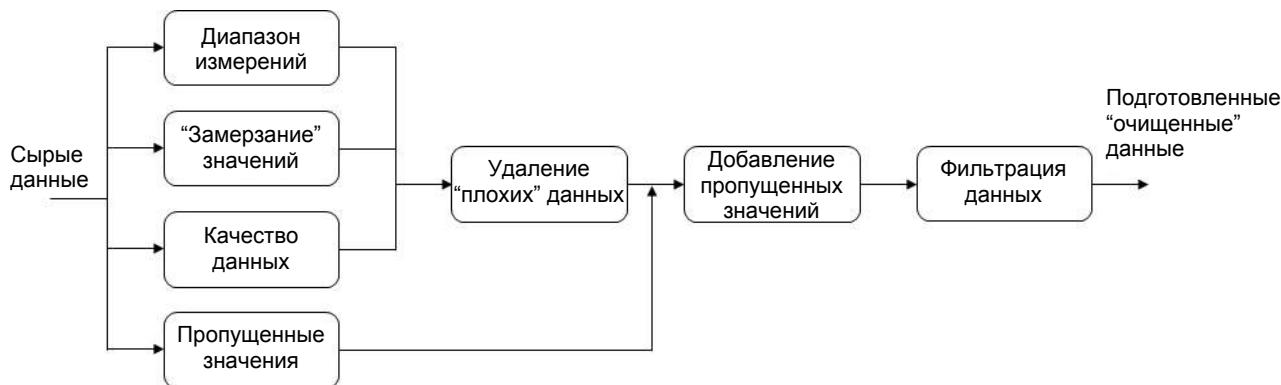


Рис. 3. Схема обработки данных

получения элементарной серы (процесс Клауса). Установка предназначена для получения элементарной (газовой) серы из кислого технологического газа (в основном в форме сероводорода H_2S), выделенного в процессе сероочистки природного газа газоконденсатного месторождения.

Процессы получения серы включают термическую стадию, на которой часть сероводорода окисляют кислородом воздуха до диоксида серы, и каталитическую стадию, на которой ведут реакцию между сероводородом и диоксидом серы в присутствии алюмооксидного катализатора с получением элементарной серы. На обеих стадиях также протекает реакция прямого окисления сероводорода до элементарной серы. В целях повышения степени извлечения серы и снижения выбросов сернистых соединений установки получения серы дополняют узлами доочистки хвостовых газов различными методами: по реакции Клауса между сероводородом и диоксидом серы (например, процесс Sulfreen); каталитическим гидрированием сернистых соединений в сероводород с дальнейшим его извлечением этаноламинами и возвратом в головной процесс (например, процесс SCOT); путём окисления (дожига) всех сернистых соединений до диоксида серы или элементарной серы [11].

Для проведения статистического анализа и разработки функции преобразования параметров АСУ ТП цифрового газоанализатора использовали набор временных рядов основных параметров установки по производству элементарной серы за последние 15 месяцев непрерывной работы с периодичностью 1 мин. В набор данных было включено 128 технологических параметров, из которых 117 — это аналоговые управляющие и контролирующие параметры технологического процесса, 11 — это дискретные параметры, определяющие ключевые режимы работы технологической установки.

Вследствие определяющей зависимости термодинамических и физико-химических характеристик входных параметров от концентраций серо- и водородосодержащих соединений в газе была произведена разбивка исходного набора в соответствии со стадийностью переработки газа в серу, включающего сепарирование кислого газа, процесс Клауса, процесс Sulfreen, процесс дегазации жидкой серы и процесс дожига газа.

Список технологических параметров установки, согласно общей функциональной схеме автоматизации, был декомпозирован на следующие группы по процессам:

- сепарация кислого газа — 5 параметров;
- термическая часть 1 — 20 параметров;
- термическая часть 2 — 15 параметров;
- каталитическая часть 1 — 7 параметров;
- каталитическая часть 2 — 6 параметров;
- sulfreen — 17 параметров;
- газодувка — 5 параметров;
- котлы — 10 параметров;
- серная яма дегазации — 11 параметров;
- печь дожига — 32 параметра.

В ходе предварительной статистической обработки данных из 128 параметров на основе расчёта мат-

рицы парных коэффициентов корреляции и статистики t -критерия Стьюдента были отобраны 29 регрессоров, которые могут оказывать сильное влияние на концентрацию диоксида серы на выходе из дымовой трубы.

Далее выборка, состоящая из 525 тыс. объектов временного ряда, случайным образом и в случайном порядке была разделена на обучающую и тестовую выборки в соотношении 70:30, каждая из которых затем была также разделена на четыре квартальные подвыборки с учётом флуктуаций условий окружающей среды на технологические параметры.

С помощью процедур описательной статистики была выполнена количественная оценка распределения полученных выборок данных. Результаты анализа позволяют сделать заключение, что, поскольку коэффициенты вариации, эксцесса и асимметрии распределения вероятности значений исследуемых характеристик не превышают критических значений, их распределения соответствуют нормальному закону, разбросы носят стохастический характер, и, значит, к имеющимся выборкам данных могут быть применимы методы статистического машинного обучения.

Сами функции преобразования входных параметров в её выходной — концентрацию выбросов представляют собой модель и могут состоять из некоторого числа регрессионных параметрических (в виде уравнений регрессии) или непараметрических моделей, построенных на основе архивных производственных данных АСУ ТП и данных непрерывных инструментальных измерений газо-воздушной смеси, выполненных в соответствии с ГОСТ [10].

Многомодельный подход к адаптации позволяет комбинировать модели, обученные на различных алгоритмах, и запускать наилучшие из них для текущего режима работы технологической установки. Процесс распознавания кластеров, из размеченной ранее начальной обучающей выборки, является основным процессом работы модели. При обучении модели кластеризации методом k -mean [12]: выясняется, является ли текущее наблюдение новым, ранее не встречающимся; начальный набор наблюдений разбивается на кластеры, находятся координаты центров кластеров, а затем для последнего наблюдения рассчитываются нормированные расстояния до центров кластеров. Если расстояние до центра кластера равно определенному расстоянию, то можно считать, что последнее наблюдение принадлежит одному из известных кластеров. Предлагаемый подход позволяет с помощью методов кластеризации производить обновление функции преобразования при изменении режима работы установки.

Полученная функция преобразования соответствует лишь конкретным условиям работы установки, поэтому при любом значимом изменении характеристик моделируемого объекта (например, после реконструкции) потребуется корректировка (калибровка) используемой функции, и весь процесс моделирования начнётся сначала.

Рассмотрим пример графического интерфейса автоматизированного приложения системы учёта и контроля эмиссии для загрязняющего вещества диоксида серы приведен на (см. рис. 4).

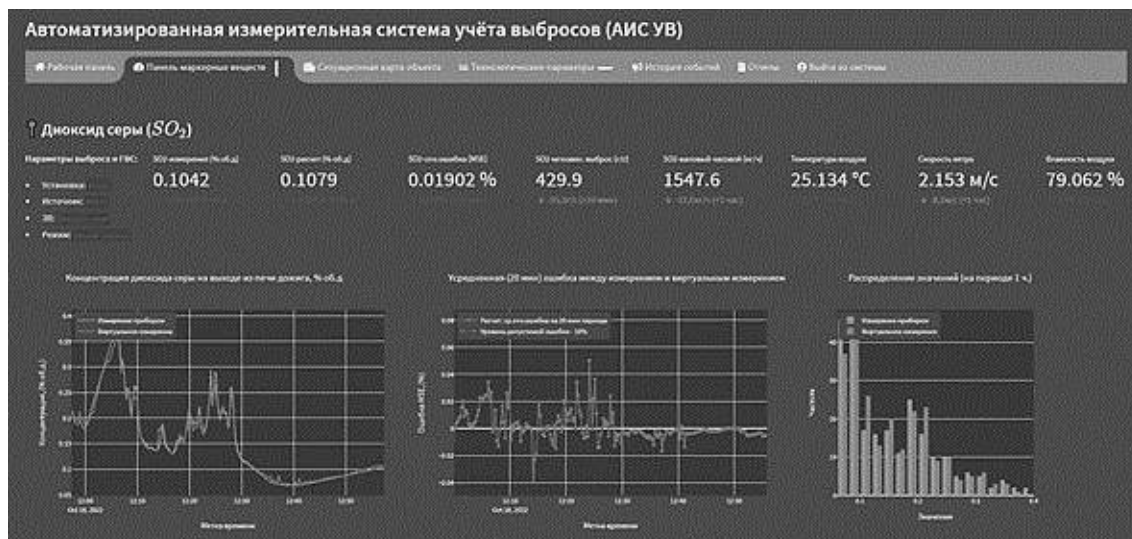


Рис. 4. Пример графического интерфейса

Страница индикатора по диоксиду серы предоставляет пользователю возможность:

- просматривать свойства текущего объекта источника выброса;
- просматривать информацию измерений показателей ГВС и измеренных параметров окружающей среды в виде числовых значений и в графическом виде, в том числе с отображением средней относительной ошибки между двумя источниками данных: прямыми измерениями, выполняемыми прибором (поточным газоанализатором), и цифровыми измерениями с помощью функции преобразования сигналов.

Для визуального контроля диапазона технологических параметров представлена гистограмма распределения. На ней в явном виде прорисована величина и характер разброса данных прямых измерений прибора и цифровых измерений.

В том числе программный интерфейс автоматизированного приложения системы учёта и контроля позволяет просматривать информацию по источнику выброса с привязкой к территориальному расположению границ установок, производства или всего завода в целом; позволяет отображать в графическом виде временные зависимости технологических параметров, входящих в функцию преобразования, как в абсолютных значениях, так и относительных; предоставляет возможность анализировать и квитирировать события и предупреждения, появляющиеся при эксплуатации системы; производить процедуры генерации отчетности за фиксированный период времени для анализа качества данных, "здоровья" функций преобразования, а также при проведении метрологических процедур в период сертификации АИС УВ как средства измерения.

Заключение

Приведены практические результаты тестового внедрения автоматизированной измерительной системы учёта выбросов с использованием цифровых газоанализаторов эмиссий загрязняющих веществ. В разработанном решении ФГАУ "НИИ "ЦЭПП" интеллектуальный анализ данных и инструментарий

для создания и обучения цифровых газоанализаторов может входить в состав программного или аппаратно-программного комплекса АИС УВ, внедряемого на нефте- и газоперерабатывающих предприятиях. Это позволит в сжатые сроки, и в полуавтоматическом режиме проанализировать технологический процесс, выявить причинно-следственные связи для создания функции преобразования входных параметров, а также реализовать отображение показателей выбросов на автоматизированном рабочем месте в режиме "советчик оператора" для эколога или технолога. Испытания АИС УВ в целях утверждения типа средства измерения запланированы аккредитованным испытательным центром "ВНИИМ им. Д. И. Менделеева". Данные средства измерения успешно внедряются на Астраханском газоперерабатывающем заводе ООО "Газпром переработка".

ЛИТЕРАТУРА

1. Файрузов Д. Х., Бельков Ю. Н., Кнеллер Д. В. и др. Система усовершенствованного управления установкой первичной переработки нефти: создание, внедрение, сопровождение // Автоматизация в промышленности. 2013. № 8. С. 23—28.
2. Егоров А. А. Интеллектуальные системы в нефтегазовой отрасли: иллюзии, реальность, практика // Автоматизация в нефтегазовой области. 2014. № 4. С. 39—45.
3. Стороженко П. А., Скобелев Д. О., Малявин А. С. и др. Международный и российский опыт нормативно-правового регулирования применения систем автоматического контроля выбросов загрязняющих веществ промышленных предприятий // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 4. С. 37—43.
4. Грачев В. А., Скобелев Д. О., Попов А. Ю. Развитие предиктивных систем контроля выбросов загрязняющих веществ // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 10. С. 43—49.
5. Мешалкин В. П., Скобелев Д. О., Попов А. Ю. Автоматический контроль выбросов: опыт применения предсказывающих систем // Компетентность. 2020. № 9—10. С. 15—21.
6. ГОСТ Р 8.654-2015 "Требования к программному обеспечению средств измерения".
7. Р 50.2.077-2014 "Испытания средств измерений в целях утверждения типа. Проверка защиты программного обеспечения".
8. Rivest R. The MD5 Message-Digest Algorithm, IETF. 1992. — 21 p.
9. Костылева В. М., Скобелев Д. О., Пронин А. Н., Медведевских С. В. Оснащение предприятий промышленности системами автоматического контроля эмиссий // Справочник Эколога. 2022. № 5(113). С. 92—98.

10. ГОСТ Р 8.960-2019 "Метрологическое обеспечение автоматических измерительных систем для контроля вредных промышленных выбросов".

11. Голубева И. А., Хайруллина Г. Р., Старынин А. Ю., Картун О. Н. Анализ производства серы методом Клауса на нефте-

газовых предприятиях России, нерешенные проблемы // Нефтегазохимия. 2017. № 3. С. 5—12.

12. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning Data Mining, Inference, and Prediction, Stanford, California. 2008. — 745 p.

Practical application of automatic control systems for pollutant emissions in chemical-technological processes

V. A. GANYAVIN, A. Yu. POPOV

FSAB "Research Institute "Environmental industrial policy center", Mytischy, Moscow region, Russia

A. N. PRONIN; S. V. MEDVEDEVSKIKH

D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM), Saint Petersburg, Russia

D. V. ZHELTUKHIN

Company "Gazprom pererabotka", Saint Petersburg, Russia

The practical results of the test implementation of an automated measuring system for accounting for emissions for chemical-technological production are presented. The basic principles of collecting and preparing time series data for constructing and training the function of converting input parameters into its output signal for a digital gas analyzer are outlined. The component composition of software and hardware modules of the system is determined. Screen forms of the system have been developed for displaying emissions indicators at an automated workplace.

Keywords: chemical engineering processes, big data, automated measuring systems, descriptive statistics, machine learning, deep learning, digital twin of technological processes.

Bibliography — 12 references.

Received February 20, 2023

УДК 621.22

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_2_32

EDN: DBAIFE

Расчет темпа глобального потепления и роста уровня Мирового океана

В. В. ТЕТЕЛЬМИН, д-р техн. наук

Институт экологии Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы,
Москва, Россия

Общественный совет при Минэнерго РФ, Москва, Россия

Выполнен анализ накопленной мировой наукой информации об основных энергетических процессах в климатической системе Земли, вызванных эмиссией антропогенных парниковых газов. Выявленные эмпирические закономерности положены в основу предлагаемых аналитических решений, которые можно использовать для прогноза глобального потепления. Отмечено существенное увеличение вклада в глобальное потепление положительных обратных связей. Каждый киловатт-час произведенной энергии ускоренно нагревает планету, обеспечивая накопление в климатической системе 18 кВт·ч парниковой тепловой энергии. Получены и предлагаются к использованию функции, определяющие темп накопления Землей тепловой энергии антропогенных парниковых газов, а также радиационно-равновесную температуру атмосферы и продолжительность достижения климатической системой состояния радиационного баланса. Впервые получены расчетные функции роста уровня Мирового океана от теплового расширения воды и таяния материковых льдов в процессе глобального потепления. После достижения углеродной нейтральности в 2060 г. глобальное потепление будет продолжаться до 2270 г. К тому времени в климатической системе Земли будет накоплено $953 \cdot 10^{15}$ кВт·ч тепловой энергии, которая расплавит 316000 км³ материковых льдов и обеспечит подъём уровня Мирового океана на 1090 мм.

Ключевые слова: глобальное потепление, парниковые газы, тепловая энергия, радиационно-равновесная температура, таяние льдов, уровень Мирового океана.

Современное человечество в погоне за производством все возрастающего количества энергии ежегодно выбрасывает в атмосферу парниковые газы в следующих примерно количествах: CO₂ — 40 млрд т.; CH₄ — 330 млн т.; N₂O — 8,2 млн т. Зависимость мировой энергетики от ископаемого топлива привела к выбросу и накоплению в климатической системе Земли более 2 трлн т. основного парникового газа CO₂, из которых около половины усваивается мировой растительностью и Мировым океаном, а вторая половина антропогенных выбросов аккумулируется атмосферой.

Наука предсказывает опасные последствия глобального потепления и призывает отходить от использования ископаемого топлива с переходом на использование возобновляемой энергии. Парижское соглашение к Рамочной Конвенции ООН об измене-

нии климата направлено на ограничение 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 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 сложные математические модели энергетического баланса, учитывающие множество соотношений между различными физическими свойствами климатической системы (КС) Земли. Предполагается, что было бы надежнее вести расчеты глобального потепления, используя в качестве отправных начальных условий содержание антропогенных парниковых газов (ПГ) в атмосфере и их последующее изменение во времени. Для решения этой задачи предлагается выстроить соответствующий алгоритм [1].

В данной работе выполнен ретроспективный анализ накопленной мировой наукой информации об основных энергетических процессах в КС Земли, вызванных антропогенной эмиссией парниковых газов.

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

Статья поступила в редакцию 31 марта 2023 г.

© Тетельмин В. В., 2023

Выявленные закономерности положены в основу эмпирических решений, которые можно экстраполировать и использовать для прогнозирования глобального потепления в привязке к конкретному содержанию ПГ в атмосфере.

Методы и материалы

Используем эмпирический подход к расчету и определению закономерностей теплообмена между ПГ и климатической системой Земли, основанный на анализе натурных данных и публикаций. Основными источниками информации явились Пятый и Шестой оценочные доклады Межправительственной группы экспертов ООН по изменению климата [2, 3].

С использованием систематизированных натурных данных выполнены расчеты основных энергетических характеристик процесса глобального потепления, представленные в виде таблиц, рисунков и функций. Выявлены общие особенности и закономерности энергообмена между парниковыми газами атмосферы и климатической системой Земли, экстраполяция которых позволяет рассчитывать темпы и пределы глобального потепления при различных сценариях антропогенных выбросов парниковых газов (ПГ). 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 на горизонте 100 лет (t-eq и ppm-eq).

Результаты

Мировое производство глобальной энергии к 2020 г. составило $175 \cdot 10^{12}$ кВт·ч/год, а суммарное произведенное за последние полтора века количество антропогенной энергии достигло $8,3 \cdot 10^{15}$ кВт·ч. Около 83 % глобальной энергии производится с использованием ископаемого топлива, в результате чего к 2020 г. в атмосфере накоплено около $1360 \cdot 10^9$ т-eq (182 ppm-eq) антропогенных парниковых газов. Результатом выбросов антропогенных ПГ в атмосферу явилась накопившаяся в КС Земли парниковая тепловая энергия в количестве около $158 \cdot 10^{15}$ кВт·ч. Можно отметить, что энергоклиматическая цена использования человечеством ископаемого топлива оказалась очень высокой: каждый киловатт-час произведенной энергии ускоренно нагревает нашу планету, обеспечивая накопление

в климатической системе Земли более 18 кВт·ч парниковой тепловой энергии. Главным аккумулятором накопленной тепловой энергии является Мировой океан — около 91 %, на сушу приходится около 5 %, на льды — около 3 %; на атмосферу — около 1,0 % энергии.

На рис. 1 приведена кривая увеличения накопленной КС Земли парниковой тепловой энергии с разбросом оценок в пределах ± 30 %, взятая из материалов Шестого оценочного доклада МГЭИК [3], отражающая детальные данные о потеплении атмосферы, суши и верхних слоев Мирового океана как доминирующего фактора КС Земли. На фоне этой интегральной кривой построена сглаживающая средняя линия роста аккумулированного климатической системой (КС) тепла.

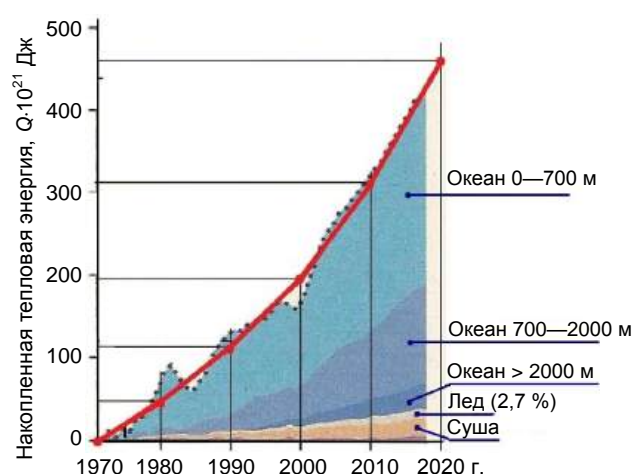


Рис. 1. Увеличение количества парниковой тепловой энергии, аккумулированной климатической системой Земли [3]

С использованием натурных данных систематизированы и сведены в табл. 1 основные энергетические характеристики процесса глобального потепления, накопленные мировой наукой в течение последних 50 лет наблюдений за КС Земли. Данные об изменении содержания ПГ и росте температуры атмосферы (столбцы 2 и 4 табл. 1) взяты из материалов Шестого оценочного доклада МГЭИК [3, 4]. График рис. 1 позволяет определять средние значения приращения тепловой энергии с разбросом оценок в пределах ± 30 %, получаемые климатической системой Земли и её составляющими за каждый 10-летний период наблюдений (столбец 3 табл. 1).

Таблица 1

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

Годы	Рост содержания выбросов ПГ в атмосфере, К ppm-eq	Рост содержания тепла в КС, $\Delta Q_{\text{КС}} \cdot 10^{15}$ 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	Доля тепла ПГ, остающегося в атмосфере, n %
1970—1980	77,5	13,3	0,165	17,2	0,30	1,84
1980—1990	101,4 (31 %)	19,8 (47 %)	0,170	19,5	0,44	1,27
1990—2000	121,0 (56 %)	24,6 (85 %)	0,175	20,3	0,55	1,05
2000—2010	141,4 (87 %)	31,0 (133 %)	0,180	21,9	0,69	0,86
2010—2020	168,6 (117 %)	38,3 (188 %)	0,185	22,7	0,86	0,72

В названных источниках разброс оценок при определении концентрации ПГ в атмосфере не превышает $\pm 3\%$, а погрешность в определении глобального тренда температуры составляет $\pm 20\%$. Остальные данные табл. 1 получены расчетом. В частности, эффективность поглощения тепла единицей содержания ПГ в атмосфере (столбец 5) получена как отношение $q = \Delta Q_{КС}/10K$ (кВт·ч/год·ppm-eq). Нетто-поглощение тепловой энергии (столбец 6) получено как отношение $i = \Delta Q_{КС}/8,76 \cdot S$ (Вт/м²), где S — площадь земной поверхности (м²). Доля тепла $n\%$, остающегося в атмосфере в каждом 10-летнем акте теплообмена КС с антропогенными парниковыми газами, определяется отношением $\Delta Q_{КС}/\Delta Q_{АТ}$.

Приведенные в табл. 1 энергетические параметры глобального потепления и график роста аккумулированной КС тепловой энергии рис. 1 являются результатом всех видов радиационной и нерадиационной передачи парниковой тепловой энергии климатической системе Земли, включая все виды положительных и отрицательных обратных связей. Начиная с периода 1970—1980 гг. в каждом последующем десятилетии КС Земли накапливала все возрастающее количество тепловой энергии, при этом эффективность поглощения тепла q единицей содержания ПГ в атмосфере увеличилась с 17,2 до $22,7 \cdot 10^{12}$ кВт·ч/год·ppm-eq (табл. 1). В относительных показателях рост накопленного КС тепла примерно в полтора раза 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 почти в три раза (188 %).

Наблюдаемый рост парниковой эффективности q каждой единицы объема ПГ объясняется улучшением условий передачи тепловой энергии Мировому океану (МО) и КС в целом за счет увеличения вклада в глобальное потепление усиливающихся положительных обратных связей $\Delta Q^* = \Delta q \cdot K$. Если взять за начало отсчета период 1970—1980 гг., то в следующий период 1980—1990 гг. вклад положительных обратных связей в общее потепление составил $2,36 \cdot 10^{15}$ кВт·ч (12 %), а в период 2010—2020 гг. этот вклад увеличился до $9,3 \cdot 10^{15}$ кВт·ч (24 %). Вполне закономерно, что последнее десятилетие 2011—2020 гг. оказалось самым теплым за всю историю наблюдений [5].

Можно задаться вопросом, как пойдет эмпирическая кривая роста тепловой энергии в будущем в случае, если человечество продолжит выбрасывать ПГ в прежних объемах, а атмосфера накапливать 3,1 ppm-eq/год (рис. 2). В таком случае к 2200 г. концентрация ПГ достигнет значения насыщения $K_{НАС} = 850$ ppm-eq, а температура глобального потепления достигнет своего максимума $8,9^\circ\text{C}$ [6, 7].

С 2020 г. человечество стремится следовать рекомендациям Парижского соглашения, чтобы к середине XXI в. достичь состояния углеродной нейтральности. Можно принять, что при сегодняшней рассогласованности действий мирового сообщества достичь этой цели будет сложно. Наиболее вероятным сценарием планируемого сокращения глобаль-

ных выбросов может быть следующий: содержание антропогенных ПГ в атмосфере удастся стабилизировать к 2060 г. на уровне около $1,75 \times 10^{12}$ т-eq (233 ppm-eq).

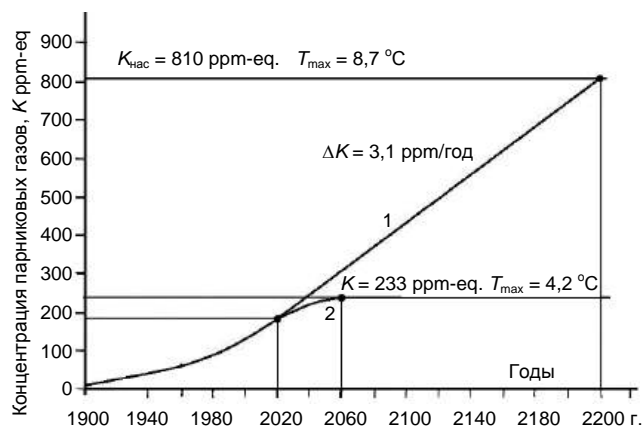


Рис. 2. Графики двух вариантов изменения концентрации ПГ в атмосфере после 2020 г.:

1 — выбросы и накопление ПГ продолжают с интенсивностью 3,1 ppm-eq/год; 2 — выбросы диоксида углерода снизились к 2060 г. в два раза

В таком случае возникает вопрос, как в будущем пойдет кривая (рис. 1) накопления тепловой энергии климатической системой Земли при постепенном сокращении выбросов ПГ и фиксации их концентрации в атмосфере на постоянном уровне 233 ppm-eq ($1,75 \cdot 10^{12}$ т-eq).

С помощью приведенных в табл. 1 натурных данных получена следующая зависимость тепловой энергии $\Delta Q_{КС}$, получаемой климатической системой Земли за каждый первый 10-летний период, от концентрации антропогенных ПГ в атмосфере [6]:

$$\Delta Q_{КС} = q(K - 30) \cdot \Delta t, \text{ кВт·ч}, \quad (1)$$

где $q = 27,6 \cdot 10^{12}$ 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 $\Delta t = 10$ лет.

Эмпирическая функция (1) антропогенного потепления Земли отражает медианную реакцию КС на увеличение содержания ПГ в атмосфере. Это выражение, определяющее количество полученной КС Земли тепловой энергии за время $\Delta t = 10$ лет, справедливо при условии изменении концентрации ПГ в пределах: $80 \text{ ppm-eq} \leq K$. В указанных пределах изменения концентрации K линейная функция (1) дает приемлемые для прикладных расчетов результаты.

Физический смысл углового коэффициента q в (1) заключается в том, что он определяет тепловую энергию, получаемую КС Земли от единицы содержания ПГ в атмосфере в течение одного года. Значимость этого эмпирического показателя в том, что он характеризует 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 про-

цессов, включая все положительные и отрицательные обратные связи.

Связь между мощностью i реального поглощения тепловой энергии ПГ (нетто-поглощения) и количеством аккумулированного КС тепла следующая [6]:

$$\Delta Q_{\text{КС}} = 4,5 \cdot 10^{15} \cdot i, \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}. \quad (2)$$

Для выполнения прогнозных расчетов необходимо учитывать ещё ряд важных особенностей энергообмена между отраженной парниковыми газами длинноволновой радиацией в ИК-спектре и КС Земли.

После достижения углеродной нейтральности 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.

Приемлемая для прикладных расчетов функция, определяющая радиационно-равновесную температуру T_{max} , представлена в [6, 7], где использовалось допущение о квазистационарном состоянии КС Земли в последней фазе ледникового периода. При современных параметрах орбиты Земли и значении солнечной постоянной 1368 Вт/м^2 функция зависимости радиационно-равновесной температуры от объема содержания антропогенных ПГ в атмосфере имеет следующий вид:

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

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

Функция (3) позволяет определять предельную температуру глобального потепления, которая установится на Земле в будущем при $K = \text{const}$. Исследуя (3) на экстремум, получаем предельное насыщающее значение концентрации антропогенных ПГ $K_{\text{НАС}} = 850 \text{ ppm-eq}$ и соответствующее предельное значение температуры $T_{\text{НАС}} = 8,9^\circ\text{C}$. При достижении значения $K_{\text{НАС}} \geq 850 \text{ ppm-eq}$ атмосфера потеряет "парниковую чувствительность" и перестанет откликаться повышением температуры на дальнейшие выбросы ПГ. Значение температуры парникового насыщения $T_{\text{НАС}} = 8,9^\circ\text{C}$ теоретически подтверждается уравнением Стефана-Больцмана [8], которое определяет современный потенциал ПГ по увеличению температуры глобального потепления, примерно равный $8,8^\circ\text{C}$.

Для выполнения прогнозных расчетов необходимо знать функцию продолжительности t_{max} выхода КС к состоянию радиационного равновесия с космическим пространством.

Функция имеет следующий вид [1]:

$$t_{\text{max}} = 10^2 \cdot (T_{\text{max}} - T_0) \cdot m \cdot c_p / 0,5n \cdot q \cdot (K - 30), \text{ годы}, \quad (4)$$

где $m = 5,18 \cdot 10^{15}$ — масса атмосферы, т;

$c_p = 0,286$ — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, кВт·ч/(т·град);

n — доля тепловой энергии, остающаяся в атмосфере в каждом акте теплообмена КС с отраженной ПГ радиацией, %.

В каждом последующем акте передачи парниковой тепловой энергии климатической системе в атмосфере остаётся всё меньшая доля $n\%$ тепловой энергии (табл. 1) от количества тепла $\Delta Q_{\text{КС}}$. Эта доля уменьшается при переходе к каждому последующему расчету теплообмена с шагом по времени $\Delta t = 10$ лет на величину $\Delta n\% = 10 n\% / t_{\text{max}}$ [1].

При постоянном содержании ПГ в атмосфере количество получаемого КС парникового тепла будет постепенно уменьшаться в течение времени t_{max} от начального значения (1) до нуля. Исходя из этого условия, определяется текущее значение получаемого климатической системой тепла в любой расчетный момент времени t . Соответствующая функция имеет следующий вид:

$$Q_{\text{КС}} = q (K - 30) (1 - t/t_{\text{max}}). \quad (5)$$

Накопленная климатической системой за время t тепловая энергия определяется следующей функцией:

$$\Sigma Q_{\text{КС}} = q (K - 30) (2t_{\text{max}} - t) t / 2t_{\text{max}}. \quad (6)$$

Рассмотрим пример. В 2020 г. начальные условия для расчета продолжительности t_{max} следующие: концентрация антропогенных ПГ $K = 182 \text{ ppm-eq}$; температура атмосферы от воздействия ПГ $T_0 = 1,2^\circ\text{C}$; $n = 0,72\%$. С помощью (3) находим радиационно-равновесную температуру $T_{\text{max}} = 3,4^\circ\text{C}$, к которой будет стремиться КС, а из (4) находим соответствующую продолжительность этого процесса $t_{\text{max}} = 216$ лет. Таким образом, если бы человечество зафиксировало концентрацию антропогенных ПГ в атмосфере на современном уровне $K = 182 \text{ ppm-eq}$, то потепление до температуры равновесного состояния $T_{\text{max}} = 3,4^\circ\text{C}$ продолжалось бы до 2236 г.

С помощью (6) находим, что для приведенных выше начальных условий 2020 г. КС Земли к 2060 г. за $t = 40$ лет получила бы $152 \cdot 10^{15} \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ тепловой энергии, а к моменту достижения радиационного равновесия за время $t_{\text{max}} = 216$ лет накопила бы $453 \cdot 10^{15} \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ тепловой энергии. Однако этого не произойдет, потому что в период 2020—2060 гг. антропогенные выбросы увеличат концентрацию ПГ в атмосфере от $K = 182 \text{ ppm-eq}$ до вероятного значения $K = 233 \text{ ppm-eq}$.

С помощью функции (6) построен график роста накопленной КС тепловой энергии до выхода системы Земля—Космос к состоянию радиационного баланса при условии обеспечения углеродной нейтральности к 2060 г. при фиксированном значении концентрации ПГ в атмосфере на уровне

$K = 233$ ppm-eq (рис. 3). Расчетная кривая 2 является продолжением эмпирической кривой 1, которая в более крупном масштабе приведена на рис. 1. График рис. 3 построен с учетом накопленной до 1970 г. тепловой энергии в количестве $30 \cdot 10^{15}$ кВт·ч.

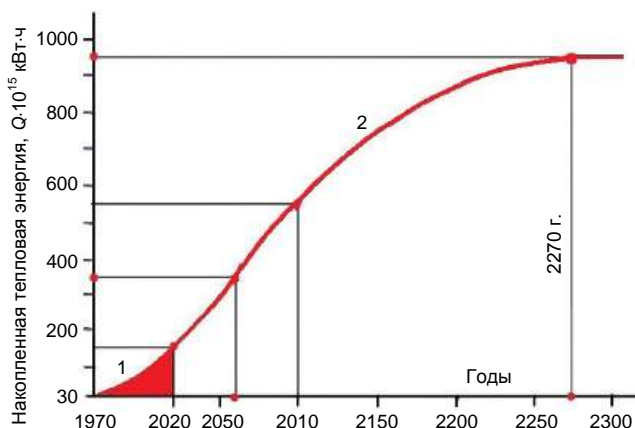


Рис. 3. Рост общей накопленной энергии глобального потепления при $K = 233$ ppm-eq до выхода КС Земли к состоянию радиационного баланса:

- 1 — график (рис. 1) по данным натурных наблюдений;
2 — расчетный график роста аккумулированного тепла

Если к 2060 г. масса антропогенных ПГ в атмосфере достигнет вероятного уровня 233 ppm-eq, то в соответствии с (5) количество тепловой энергии, которую получит КС в 2060 г., составит $5,6 \cdot 10^{15}$ кВт·ч/год. Все же за период с 2020 по 2060 гг. к моменту достижения "углеродной нейтральности" КС получит около $203 \cdot 10^{15}$ кВт·ч парниковой тепловой энергии, которая ускорит таяние материковых льдов и поднятие уровня Мирового океана.

Из рис. 1 следует, что на нагревание МО до глубины 2000 м расходуется 84 %, а на таяние льдов 2,7 % накопленной КС тепловой парниковой энергии. С помощью гипсометрической кривой поверхности земной коры [9] находим, что в пределах глубин МО до 2000 м находится $643 \cdot 10^{15}$ т воды. В период с 2020 по 2060 гг. эта масса воды получит $169 \cdot 10^{15}$ кВт·ч тепловой энергии, которая в среднем обеспечит её нагревание на $0,226$ °С. При коэффициенте теплового расширения воды $\beta = 16,5 \cdot 10^{-5}$ град $^{-1}$ объем воды увеличится на $24 \cdot 10^{12}$ м 3 , что обеспечит подъем уровня МО на 67 мм.

Из полученной КС за рассматриваемый период тепловой энергии $201 \cdot 10^{15}$ кВт·ч на таяние льдов будет использовано $5,43 \cdot 10^{15}$ кВт·ч (2,7 %) тепла.

На фазовый переход первого рода лед—вода требуется $332,4$ Дж/г = 84 кВт·ч/м 3 тепловой энергии. С учетом того, что на таяние льдов расходуется 2,7 % общей накопленной тепловой энергии, можно пользоваться следующим удельным показателем таяния материковых льдов: 3110 кВт·ч/м 3 общей накопленной в КС тепловой энергии. Отсюда получаем объем материковых льдов 65 тыс. км 3 , который будет расплавлен в период 2020—2060 гг. Ввиду разницы в плотности льда и воды образовавшийся за счет фазового перехода льда объем воды будет на 9 % меньше и составит $59,2 \cdot 10^{12}$ м 3 . Этот дополнительный объем воды поднимет уровень МО на 164 мм.

Таким образом, за период 2020—2060 гг. нагревание КС на $201 \cdot 10^{15}$ кВт·ч обеспечит общий подъем уровня МО на 231 мм. В среднем темп подъема уровня МО составит 5,76 мм/год, из которых на эффект теплового расширения будет приходиться около 30 %, а на эффект таяния льдов — около 70 %. Для сравнения укажем, что в период 2006—2012 гг. средний темп подъема уровня МО составлял 3,7 мм/год, а в период 1970—2006 гг. — 1,9 мм. Видим, что процесс таяния материковых льдов набирает скорость.

Из функции (6) выведена функция накопленного роста уровня Мирового океана за период времени t за счет таяния материковых льдов:

$$h_l = 81,23 \cdot 10^{-20} \cdot \sum Q_{КС}, \text{ м.} \quad (7)$$

Из выражения (5) получаем функцию зависимости скорости роста уровня Мирового океана от времени:

$$V = 31,6 \cdot 10^6 (K - 30)(1 - t/t_{\max}), \text{ м/год.} \quad (8)$$

Например, после достижения углеродной нейтральности к 2060 г. и фиксации содержания ПГ в атмосфере на уровне $K = 233$ ppm-eq скорость роста уровня МО в 2100 г. составит 5,2 мм/год.

Общий накопленный рост уровня Мирового океана с учетом теплового расширения воды и таяния льдов за период времени t определяется следующей функцией:

$$\sum h = 114,41 \cdot 10^{-20} \cdot \sum Q_{КС}, \text{ (м).} \quad (9)$$

С применением функций (7) и (9) получены расчетные показатели роста накопленной КС Земли тепловой энергии и роста уровня МО за счет таяния материковых льдов и температурного расширения воды МО (табл. 2).

Таблица 2

Расчетные показатели роста уровня Мирового океана при снижении к 2060 г. выбросов ПГ в два раза

Годы	Накопленное тепло, $\sum Q_{КС} \cdot 10^{15}$ кВт·ч	Рост за счет таяния льда, h_l , мм	Рост за счет расширения воды, h_a , мм	Общий рост уровня, $\sum h$, мм
До 1970 г.	30	26	11	37
1900—2020	158	128	52	180
2020—2060	201	163	67	230
2060—2100	203	164	67	231
2100—2270	391	318	130	448
1900—2270	953	773	316	1090

На рис. 4 приведены построенные с помощью (7) и (9) графики роста уровня моря за счет таяния материковых льдов и общего подъема уровня Мирового океана до момента достижения климатической системой Земли радиационно-равновесного состояния в 2270 г.

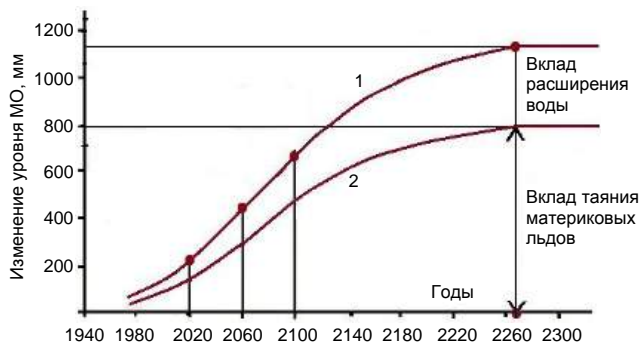


Рис. 4. Графики подъема уровня моря за счет таяния материковых льдов (2), а также общего подъема уровня (1) до момента достижения климатической системой Земли радиационно-равновесного состояния

Расчет выполнен с использованием алгоритма расчета глобального потепления [1] при условии достижения углеродной нейтральности к 2060 г. Видим, что к 2100 г. уровень Мирового океана поднимется на 680 мм и далее процесс подъема уровня будет продолжаться. К 2270 г. накопленная в КС тепловая энергия в количестве $953 \cdot 10^{15}$ кВт·ч растопит $317 \cdot 10^3$ км³ материковых льдов и поднимет уровень МО на 1090 мм.

Выводы

Каждый киловатт-час произведенной человечеством за последние полтора века глобальной энергии нагревает планету Земля на 18 кВт·ч.

Рост накопленной Землей тепловой энергии парниковых газов существенно опережает рост их содержания в атмосфере, что свидетельствует об увеличении вклада в глобальное потепление положительных обратных связей: усиление горизонтального конвективного переноса тепла циклонами; деградация грунтов криолитозоны с выбросом метана, арктическое усиление и др.

Впервые получена и рекомендуется к использованию для прогнозных расчетов глобального потепления функциональная зависимость (3) радиационно-равновесной температуры земной атмосферы от содержания в ней антропогенных парниковых газов.

Получена функция (4) зависимости продолжительности глобального потепления от содержания в атмосфере парниковых газов.

Впервые получена и рекомендуется к использованию функция (6) темпа глобального потепления, определяющая зависимость количества аккумулированной климатической системой Земли парниковой тепловой энергии от времени.

Получены зависимости скорости роста (8) и накопленного роста (9) уровня Мирового океана от времени в процессе глобального потепления.

Каждая порция полученной климатической системой тепловой энергии $E = 3110$ кВт·ч/м³ обеспечивает таяние 1 м³ материковых льдов.

При снижении к 2060 г. глобальных выбросов ПГ в два раза КС Земли накопит к 2100 г. $563 \cdot 10^{15}$ кВт·ч парниковой тепловой энергии, которая обеспечит к тому времени скорость роста уровня Мирового океана около 5,2 мм/год и общий подъем уровня примерно на 680 мм.

Если человечество обеспечит к 2060 г. углеродную нейтральность и зафиксирует содержание парниковых газов в атмосфере на уровне 233 ppm, то глобальное потепление будет продолжаться до 2270 г. до достижения радиационно-равновесной температуры 4,2 °С. К тому времени в КС Земли будет накоплено $953 \cdot 10^{15}$ кВт·ч парниковой тепловой энергии, которая растопит 316000 км³ материковых льдов и поднимет уровень Мирового океана на 1090 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тетельмин В. В. Аналитический расчет глобального потепления // Экология промышленного производства. 2022. № 3. С. 34—41.
2. МГЭИК: 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.
3. Technical Summary. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A.]. — Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. P. 33—144.
4. IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade]. — Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
5. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории России. Общее резюме / Росгидромет. С.-Пб.: Наукоемкие технологии. 2022. — 144 с.
6. Тетельмин В. В. Энергетические особенности и пределы глобального потепления // Экология промышленного производства. 2023. № 1. С. 51—59.
7. Тетельмин В. В. Формула максимального глобального потепления // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. "Экология и безопасность жизнедеятельности". 2022. Т. 30. № 1. С. 45—57.
8. Бринкман Э. Физические проблемы экологии / пер. с англ. — М.: Интеллект. 2012. — 288 с.
9. Тетельмин В. В., Язев В. А. Геоэкология углеводородов. — М.: Интеллект, 2009. — 304 с.

Calculation of the global warming rate and the global sea level rise

V. V. TETELMIN

Institute of Ecology of the Russian Peoples' Friendship University named after Patrice Lumumba,
Moscow, Russia

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

We analyzed the information accumulated by the world science about the main energy processes in the climate system of the Earth caused by anthropogenic greenhouse gas emissions. The identified empirical regularities are the basis for the proposed analytical solutions, which can be used for reliable prediction of global warming. There has been a significant increase of the positive feedback contribution into global warming. Each kilowatt-hour of energy produced heats the planet at an accelerated rate, ensuring the accumulation of 18 kWh of greenhouse heat energy in the climate system. The functions determining the rate of the Earth's accumulation of thermal energy of anthropogenic greenhouse gases, as well as the radiation equilibrium temperature of the atmosphere and the duration of reaching the radiation balance state by the climate system, were obtained and are proposed for use. For the first time the calculated functions of the global sea level rise from thermal expansion of water and melting of continental ice in the process of global warming were obtained. After achieving carbon neutrality in 2060, the global warming will continue until 2270. By that time, $953 \cdot 10^{15}$ kWh of thermal energy will have been accumulated in the Earth's climate system, 316000 km^3 of continental ice will have melted, the global sea level rise will be 1090 mm.

Keywords: global warming, greenhouse gases, thermal energy, radiation equilibrium temperature, ice melting, global sea level.

Bibliography — 9 references.

Received March 31, 2023

УДК 504.064.2.001.18
DOI: 10.52190/2073-2589_2023_2_39
EDN: DGAQOS

Методология прогнозирования и моделирования миграции загрязняющих веществ в системе комплексного экологического мониторинга химически опасных объектов

¹ И. М. ЯННИКОВ, д-р техн. наук; ^{1, 2} Р. А. ГАЛИАКБЕРОВ,

¹ В. Г. ИСАКОВ, д-р техн. наук

¹ ФБГОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова», г. Ижевск, Россия

² ЗАО «Ижевский нефтяной научный центр», г. Ижевск, Россия

Проведен анализ существующих методов и способов прогнозирования миграции загрязняющих веществ в окружающей природной среде и моделирования данного процесса. Авторами выделены, рассмотрены и систематизированы основные подходы к прогнозированию путей миграции загрязняющих веществ в горизонтальной (в пределах одной составляющей окружающей природной среды) и вертикальной (перенос из одной составляющей в другую) плоскостях, отмечены их достоинства и недостатки, сделаны выводы о возможности применения указанных подходов в системе комплексного экологического мониторинга химически опасных объектов, а также выработаны рекомендации по их применению.

Ключевые слова: миграция загрязняющих веществ, математическое моделирование, прогнозирование миграции, комплексный экологический мониторинг, химически опасный объект.

Возможность перемещения загрязняющих веществ в пределах определенной территории (часто достаточно большой по площади) известна ученым довольно давно. Прогнозирование данного явления, целью которого является определение путей перемещения загрязняющих веществ и локальных мест их скопления в окружающей среде представляет собой довольно сложный и трудоемкий процесс, подобная задача ставится перед исследователями повсеместно в силу своей высокой актуальности.

Анализ различных источников литературы в области прогнозирования путей миграции загрязняющих веществ в окружающей среде, позволяет выделить два основных подхода исследователей к данному вопросу:

- использование результатов прямых измерений, получаемых в ходе проведения различных экспериментов (эмпирический);

- использование физико-химических законов распространения загрязняющих веществ в окружающей среде (теоретический).

Между тем, доказано, что применение теоретических знаний без их проверки на практике и корректировки моделей по результатам практических результатов работы не представляется возможным, равно как спорной остается эффективность моделей, построенных исключительно на практических данных без использования физических и химических законов. Таким образом, если говорить о применении подобных методик в системе экологического мониторинга химически опасных объектов, наиболее высокая степень эффективности и точности моделирования достигается при объединении данных подходов, совмещении теоретических и практических знаний.

С другой стороны, учитывая многообразие путей перемещения загрязняющих веществ в окружающей природной среде, а также значительное количество факторов, оказывающих влияние на данные процессы, исследование методологии прогнозирования целесообразнее проводить по частям, и здесь приоритетным становится, прежде всего, прогнозирование путей перемещения загрязняющих веществ в горизонтальной и вертикальной плоскостях (в силу существенных различий этих процессов).

Методология прогнозирования вертикальной миграции загрязняющих веществ

Исследования отечественных ученых путей и способов перемещения загрязняющих веществ, полу-

Янников Игорь Михайлович, доцент, профессор кафедры "Техносферная безопасность".

E-mail: imyannikov@mail.ru

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

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

Исаков Виталий Германович, профессор, заведующий кафедрой "ВиВ".

E-mail: isakovvg@istu.ru

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2023 г.

© Янников И. М., Галиакберов Р. А., Исаков В. Г., 2023

чившие наибольшую актуальность и развитие с освоением ядерной энергетики, показали, что перенос загрязняющих веществ из атмосферы в другие составляющие биосферы главным образом (до 80 %) происходит с помощью осадков, причем данный процесс происходит с помощью двух механизмов [1]:

- внутриоблачное вымывание;
- подоблачное вымывание.

Исходя из того, что в основе данных процессов лежит явление абсорбции газов и взвешенных частиц жидкими аэрозолями (дождь) [2], решение задачи прогнозирования данных процессов является сложным и многофакторным процессом. Известны три основных подхода, отличающихся друг от друга уровнем точности, количеством необходимого времени, входными данными и другими параметрами (рис. 1).

При сравнении этих подходов становится очевидным, что наиболее высокой точностью обладают математические симуляционные модели [3—5]. В то же время, в силу своей специфики, математическое моделирование достаточно трудоемкий процесс, требующий большого количества времени и наличия специального программного обеспечения. Несмотря на некоторые ограничения по области применения и значительную погрешность при использовании, наибольшую популярность, в силу своей простоты, в практической деятельности получило использование теории подобия и критериальных уравнений, которое дает возможность учитывать физико-химические процессы абсорбции [2, 6].

Чрезвычайно высокий интерес в плане применения в практической деятельности представляет объединение положительных качеств двух рассмотренных подходов, что приводит к появлению третьего, основанного на разбиении процесса абсорбции газов на отдельные этапы. Решение проблемы подобным образом позволяет максимально упростить проведение расчетов, и в то же время достигнуть максимальных показателей точности и учета всех влияющих факторов.

При проведении численной оценки эффективности подоблачного вымывания основную роль играет коэффициент подоблачного вымывания, равный отношению скорости накопления аэрозольных частиц в выпавших осадках к среднему количеству частиц в облаке за время выпадения осадков [7, 8]. Расчеты данного показателя, проводимые различными авторами [9—13], а также сравнение этих расчетов [10] позволяют сделать ряд выводов. В частности, в ис-

следовании [10] авторами проведено сравнение различных моделей и сделан вывод о том, что точность показателей, получаемых по моделям [11, 13], существенно ниже, чем в моделях [9, 10, 12], поскольку не учитывают размеры аэрозольных частиц, а модели [9, 12], в силу игнорирования некоторых параметров, обладают значительно меньшей точностью, чем модель [10].

В целом, в ходе анализа существующих методик прогнозирования вертикальной миграции загрязняющих веществ выявлено качественное превосходство математического моделирования над любыми другими способами оценки данных процессов. Основными недостатками методологии математического моделирования является высокая трудоемкость выполнения расчетов, что влечет за собой необходимость применения средств автоматизации.

Горизонтальная миграция загрязняющих веществ

В отличие от вертикальной миграции, характерной чертой которой является перенос веществ из одной составляющей окружающей среды в другую, горизонтальная миграция в большей степени связана с переносом внутри одной сферы. Характерной чертой такой миграции является высокая площадь распространения загрязняющих веществ. С другой стороны, преобладание внутрисферного переноса дает возможность рассмотреть распространение загрязнителей отдельно для каждой среды. Необходимость такого подхода обуславливается и существенными физико-химическими различиями сфер, действием в каждой из них своих законов и правил. Например, скорость миграции загрязнителей в атмосфере значительно выше, чем в почвогрунтах и подземных и поверхностных водах в силу влияния климатических характеристик и т. д.

В частности, при изучении источников литературы, посвященных вопросам моделирования и прогнозирования переноса загрязняющих веществ в атмосфере, становится понятным, что в основе любой модели лежит явление атмосферной диффузии, обусловленной ее турбулентностью.

Классификация методик расчета распространения загрязняющих веществ в атмосфере может осуществляться по различным параметрам. В частности, один из вариантов классификации был проведен в работе [4]. Результаты представлены на рис. 2.



Рис. 1. Подходы к прогнозированию путей вертикальной миграции загрязняющих веществ в окружающей среде



Рис. 2. Методы прогнозирования распространения загрязнений в атмосфере

Еще большее количество методов и способов разработано в области прогнозирования распространения загрязняющих веществ в почвогрунтах. Наиболее распространенным методом прогнозирования данных процессов является математическое моделирование, в основе которого лежит система дифференциальных (как правило — нелинейных) уравнений [13]. При этом, к основным факторам, оказывающим существенное влияние на миграцию ингредиентов в почвогрунтах, а значит лежащих в основе данного подхода, относятся конвективный перенос, диффузия и сорбционные процессы, а также уравнения хроматографии [13—15].

В частности, уравнения хроматографии и сорбции широко использованы в работах [15—18], процессы конвективной диффузии рассмотрены в работах В. Н. Иванова, 1984; Д. Ф. Шульгина, 1972; D. E. Rolston, 2007; Ю. Н. Матвеева и др., 2016; Н. Н. Веригина, 1953; В. И. Аравина, 1954.

Отдельного внимания к себе требуют процессы переноса загрязняющих веществ в поверхностных водных объектах. Анализ информации в этой области [13, 15, 19—25] позволяет судить о том, что основным инструментом для прогнозирования путей распространения загрязнений в этой сфере является математическое моделирование, методы которого условно можно разделить на упрощенные инженерные и балансовые модели, а также более сложные модели, в основе которых лежат уравнения гидродинамических расчетов поля скорости течения, а также уравнения переноса примесей [16, 22, 25].

При этом, исходя из того, что упрощенные инженерные и балансовые модели в большинстве своем не содержат в себе инструментов для учета параметров водного объекта (форма русла, наличие препятствий, влияние притоков, характеристики донной поверхности и т. д.), применимость их в системе экологического мониторинга крупного химически опасного объекта остается весьма спорной. Куда более интересными, с этой точки зрения, являются модели, основанные на исследованиях в области гидродинамики. Несмотря на высокую сложность и трудоемкость выполнения расчетов по данным методикам (в силу учета больших объемов входной информации), их применение позволяет получить наиболее высокую точность при моделировании поведения загрязняющих веществ в водных объектах. К тому же, применение современных вычислительных машин и алгоритмов позволяет существенно нивелировать данный недостаток.

Анализ существующих программных инструментов математического моделирования процессов миграции загрязняющих веществ

Как следует из изложенного, наиболее перспективным методом прогнозирования путей миграции загрязняющих веществ в окружающей среде является математическое моделирование данных процессов. При этом, высокая скорость развития информационных технологий дает возможность решения

основной проблемы данной группы методов, заключающейся в высокой трудоемкости этих процессов.

В зависимости от различных факторов и условий, авторами различных исследований в области миграции загрязняющих веществ используются такие математические системы, как Maple, Math Lab, Math Cad, Mathematica и др. Возможности данных продуктов позволяют решить абсолютное большинство математических моделей, а объединение в них линейной алгебры и аналитической геометрии позволяет моделировать трехмерные объекты [26—28].

Учитывая широкую пространственную распространенность данных, получаемых при прогнозировании миграции загрязнений, а также необходимость их визуализации, высокую популярность в данной сфере получило и применение геоинформационных технологий. В отличие от других компьютерные технологии ГИС объединяют в себе традиционные операции при работе с базами данных, с географическим анализом и визуализацией [29]. Кроме того, существенным плюсом данных технологий является возможность их применения в системах принятия решений на основе получаемых данных [30].

Отдельно стоит отметить и возможность использования в области прогнозирования распространения загрязнений нейронных сетей. Известно большое количество нейросетевых моделей для прогнозирования путей распространения как в атмосфере [31—33], так и в почвогрунтах [34, 35].

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о наличии большого количества разнообразных программных продуктов, предназначенных для моделирования путей миграции загрязняющих веществ в каждой составной части окружающей природной среды, однако подбор того или иного программного продукта зависит как от выбора метода прогнозирования, так и от необходимости учета большого количества тех или иных параметров, а также физических возможностей самого программного обеспечения.

Выводы

Использование различных подходов к прогнозированию процессов миграции загрязняющих веществ (эмпирический и теоретический) ведет к появлению значительного количества моделей прогнозирования. Например, эмпирический подход дает право на существование регрессионным уравнениям, экспертным системам, нейронным сетям, теоретическое же моделирование основывается, главным образом, на языке дифференциальных уравнений. Подобная ситуация приводит к появлению большого количества методик, которые с той или иной степенью точности (в зависимости от учитываемых параметров) позволяют смоделировать процесс распространения загрязняющих веществ.

Наиболее перспективными методами прогнозирования распространения загрязняющих веществ в окружающей среде (как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях) является математическое моделирование. В силу возможности учета большого количества параметров, получаемых с использованием подобных инструментов, точность проводимых

прогнозов существенно возрастет. Основными проблемными вопросами при этом являются наличие большого количества методик, учитывающих (не учитывающих) те или иные параметры, и отсутствие единой, универсальной методологии прогнозирования, что несколько затрудняет применение данных моделей в системе экологического мониторинга химически опасных объектов. Кроме того, необходимость выполнения оперативных прогнозов диктует необходимость применения средств и инструментов (программных продуктов) для автоматизации расчетов, а необходимость принятия на основе получаемых данных решений по поддержанию устойчивости экологической обстановки (что и является конечной целью проведения расчетов) диктует необходимость визуализации информации в удобной форме.

Применение современных средств вычислительной техники, учитывая высокий уровень их развития к той или иной модели, не представляется чересчур сложным процессом. Однако, учитывая тот факт, что воздействие любого производственного объекта на окружающую среду происходит комплексно (на все сферы окружающей природной среды), что обуславливает применение комплексного подхода при создании системы экологического мониторинга химически опасных объектов, возникает необходимость в создании единой методики моделирования процесса распространения загрязняющих веществ. Это позволит соединить в себе преимущества большинства моделей, существенно повысив точность получаемых данных. Такой подход требует создания программного обеспечения, способного удовлетворить все требования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Беликов В. В., Головизнин В. М., Семенов В. Н. и др.** Нострадамус — компьютерная система прогнозирования радиационной обстановки. Верификация модели атмосферного переноса примеси // Труды ИБРАЭ. Моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде. — М.: Наука, 2008. С. 41—103.
2. **Кустов М. В., Калугин В. Д.** Прогнозирование интенсивности осаджения газообразных токсичных химических веществ атмосферными осадками // Восточно-Европейский журнал. 2016. № 2. С. 52—59.
3. **Gilde A., Siladke N., Lawrence C. P.** Molecular dynamics simulations of water transport through butanol films // J. Phys. Chem. A. 2009. № 113(30). P. 8586—8590.
4. **Shiraiwa M., Pfrang C., Koop T., Poschl U.** Kinetic multi-layer model of gas-particle interactions in aerosols and clouds (KM-GAP): linking condensation, evaporation and chemical reactions of organics, oxidants and water // Atmos. Chem. Phys. 2012. № 12. P. 2777—2794.
5. **Takaharu T., Tsuruta T., Nagayama G.** Molecular dynamics studies on the condensation coefficient of water // J. Phys. Chem. B. 2004. № 108(5). P. 1736—1743.
6. **The National Ambient Air Quality Standard (NAAQS)** // The U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2012. — 43 p.
7. **Бурцев И. И.** О вымывании осадками искусственных радиоактивных аэрозолей из атмосферы: сб. "Радиоактивные изотопы в атмосфере и их использование в метеорологии". — М.: Атомиздат, 1965. С. 217—229.
8. **Slade D. H.** Meteorology and atomic energy / пер. с англ. / под ред. Бызовой Н. Л. — Л.: Гидрометеоиздат, 1971. — 648 с.
9. **Махонько К. П., Дмитриева Г. В.** Способность различных типов осадков к вымыванию продуктов деления из атмосферы и характеристики вымывания // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1966. Т. 2. № 3. С. 297—304.
10. **Припачкин Д. А., Будыка А. К.** Влияние параметров аэрозольных частиц на их вымывание из атмосферы дождевыми каплями // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 2. С. 203—209.

11. Balklanov A., Sorensen J. H. Parameterization of radionuclide deposition in atmospheric long-range transport modelling // Phys. Chem. Earth (B). 2001. V. 26. P. 787—799.
12. Loosmore G. A., Cederwall R. T. Precipitation scavenging of atmospheric aerosols for emergency response applications: testing an updated model with new real-time data // Atmospheric Environment. 2004. V. 38. P. 993—1003.
13. Webster H., Thomson D. The NAME wet deposition scheme forecasting research // Technical report. 2014. № 584. — 41 p.
14. Лобачева Л. В., Борисова Е. В. Моделирование процессов миграции загрязнений от свалки твердых бытовых отходов // Компьютерные исследования и моделирование. 2020. Т. 12. № 2. С. 369—385.
15. Wilson I. N. A theory of chromatography // J. Am. Chem. Soc. 1940. V. 62. P. 1583—1591.
16. Антошкина Л. И. и др. Численное моделирование процессов загрязнений поверхностных и подземных вод. — Днепрпетровск: ЧП Свидлера А. Л., 2004. — 168 с.
17. Цвет М. С. Хроматографический адсорбционный анализ: избранные работы. — М.: АН СССР, 1946. — 273 с.
18. Тодес О. М. Динамика сорбции смесей // Журнал прикладной химии. 1945. Т. XVIII. № 11—12. С. 591—608.
19. Кундас С. П. и др. Компьютерное моделирование миграции загрязняющих веществ в природных дисперсных средах. — Минск: МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2011. — 212 с.
20. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. — М.: Наука, 1982. — 316 с.
21. Фальковская Л. Н., Каминский В. С., Пааль Л. Л., Грибовская М. Ф. Основа прогнозирования качества поверхностных вод. — М.: Наука, 1982. — 181 с.
22. Шеренков И. Л. Прикладные плановые задачи гидравлики спокойных потоков. — М.: Энергия, 1978. — 240 с.
23. Беляев Н. Н., Покутнева Л. В. Численное моделирование загрязнения акватории реки // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2009. № 28. С. 69—72.
24. Ветрова Ю. В., Васюткина Д. И., Радоуцкий В. Ю. Модели распространения вредных веществ в окружающей среде // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2012. № 4. С. 159—162.
25. Савенко В. Я., Славинская Е. С. Математическая модель механизма поперечной циркуляции в открытых потоках при неизотропных коэффициентах турбулентной вязкости // Вестник ХГАДТУ. 1998. Вып. 7. С. 50—53.
26. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель. — М.: ДМК Пресс, 2012. — 768 с.
27. Новиковский Е. А. Работа в системе MathCAD: учеб. пособие. — Барнаул: Типография АлтГТУ, 2013. — 114 с.
28. Самигуллина А. Р. Математическое моделирование объектов линейной алгебры и аналитической геометрии в системе компьютерной математики Maple // Вестник ТГГПУ. 2010. № 21. С. 69—74.
29. Гусева А. В. Геоинформационные системы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № S5. С. 50—55.
30. Янников И. М. Методы и системы автоматизации обработки результатов биологического мониторинга потенциально опасных объектов: монография. — Самара: СамНЦ РАН, 2020. — 486 с.
31. Муравьев К. А. Исследование загрязнений атмосферы в районе компрессорных станций с применением нейросетевого моделирования // Технические науки — от теории к практике. 2012. № 6—2. С. 118—130.
32. Плуготаренко Н. К., Варнавский А. Н. Применение нейронных сетей для построения модели прогнозирования состояния городской воздушной среды // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4—2. С. 10.
33. Ходакова Ж. Г., Савицкая Т. В. Разработка нейросетевой модели прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха источниками выбросов предприятий // Успехи в химии и химической технологии. 2020. № 6(229). С. 139—141.
34. Басова И. А., Миненко А. А., Белоусов Д. А. Нейросетевое моделирование загрязнения почв на территории горнопромышленного региона // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2014. № 4. С. 3—9.
35. Кундас С. П., Коваленко В. И., Хилько О. С. Разработка нейронных сетей для прогнозирования миграции химических веществ в почве и алгоритмов их обучения // Наука и техника. 2010. № 2. С. 32—38.

Methodology for forecasting and modeling the migration of pollutants in the system of integrated environmental monitoring of chemically hazardous objects

¹ I. M. YANNIKOV, ^{1,2} R. A. GALIAKBEROV, ¹ V. G. ISAKOV

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

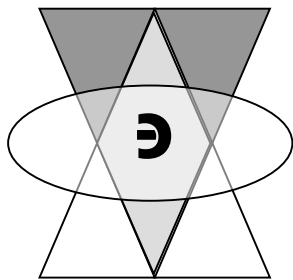
² "Izhevsk Petroleum Research Center" CJSC, Izhevsk, Russia

The article is devoted to the analysis of existing methods and methods for predicting the migration of pollutants in the natural environment and modeling this process. Based on the results of the analysis, the authors identified, reviewed and systematized the main approaches to predicting the migration paths of pollutants in the horizontal (within one component of the environment) and vertical (transfer from one component to another) planes, noted their advantages and disadvantages, and made conclusions, on the possibility of using these approaches in the system of integrated environmental monitoring of chemically hazardous objects, as well as recommendations for their application.

Keywords: pollutant migration, mathematical modeling, migration forecasting, integrated environmental monitoring, chemically hazardous facility.

Bibliography — 35 references.

Received February 15, 2023



Внедрение экологически безопасных технологий

УДК 62-523.8; 62-522.2; 62-522.7
DOI: 10.52190/2073-2589_2023_2_44
EDN: DKGJKP

Автоматизированная система повышения эффективности и экологических показателей гусеничных движителей

Е. В. ОВЧИННИКОВ, А. С. ОВЧАРЕНКО; К. С. ДМИТРИЕВ
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
Москва, Россия

Проведен обзор способов снижения давления тракторных движителей на почву, и рассмотрена возможность установки автоматизированной системы управления изменением размера пятна контакта гусеничных движителей, установленных на заднюю ось трактора, для выбора оптимального параметра пятна контакта, обеспечивающего минимальное воздействие на почву и оказывающего влияния на снижение буксования при максимальной производительности.

Ключевые слова: гусеничный движитель, пятно контакта, снижение давления на грунт, автоматизированная система.

На сегодняшний день, в мире ужесточаются экологические требования к различным производственным процессам, в том числе, сохранение плодородности почвы. Одним из способов минимизирования влияния на производственный процесс является снижение давления машинно-тракторным агрегатом (МТА) на почву [1—4], так как это влияет на движение воды и питательных веществ, баланс углерода и азота и рост корней растений, более того, восстановление после уплотнения грунта может занять несколько десятилетий [5]. Одним из основных способов снижения давления является использование гусеничных движителей вместо колес [6, 7], так как этот параметр определяется как вес МТА деленный на площадь пятна контакта. Соответственно, чем меньше площадь пятна контакта с почвой, тем выше оказываемое давление. Также пятно контакта оказывает влияние и на такой параметр, как буксование [8—10].

Многие производители техники используют сдвоенные колеса, либо колеса сверхнизкого давления во многих отраслях производства, в том числе и городском хозяйстве. Это отчасти решает проблему, однако увеличивает габариты МТА по ширине, что может, в свою очередь усложнить перемещение техники по дорогам общего пользования. Помимо этого, существует тенденция на интеллектуальные системы автоматического управления процессами, максимально исключая влияние человека. В данной работе рассмотрена автоматизированная система изменения пятна контакта гусеничных движителей.

Материалы и методы

В процессе научно-исследовательской работы, коллективом авторов была разработана, изготовлена и испытана съемная гусеничная ходовая система (СГХС) для трактора "Беларус-622" (рис. 1), представленная на ежегодной Всероссийской выставке "Золотая Осень" 2019 г. и отмеченная Золотой медалью выставки "За разработку ресурсосберегающей съемной гусеничной ходовой системы сельскохозяйственного трактора для работы в различных почвенно-климатических условиях и агрозонах РФ".

Овчинников Евгений Валентинович, научный сотрудник.
E-mail: evo-xpro-info@yandex.ru
Овчаренко Александр Сергеевич, ведущий инженер.
E-mail: peterbilt@list.ru
Дмитриев Кирилл Сергеевич, младший научный сотрудник.
E-mail: kir0597@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 29 января 2023 г.

© Овчинников Е. В., Овчаренко А. С., Дмитриев К. С., 2023



Рис. 1. Съемная гусеничная ходовая система для трактора "Беларус-622"

В процессе проведения испытаний возникла идея доработки, а именно, создание автоматизированной системы, позволяющей в процессе эксплуатации изменять пятно контакта гусеничного движителя. Учитывая универсальность трактора, на который были установлены движители, существует необходимость проведения технологических работ на слабонесущих грунтах, а также для технологических и транспортных работ. Были рассчитаны и смоделированы модели механизмов, позволяющие изменять пятно контакта за счет трансформации съемных гусеничных ходовых систем (рис. 2).

Данный механизм позволяет без изменения длины гусеницы и номенклатуры конструктивных эле-

ментов влиять на эксплуатационные, потребительские и экологические показатели трактора за счет изменения длины участка опорной ветви. При этом большее пятно контакта позволяет снизить вредное уплотняющее воздействие на почву, повысить эффективность использования сцепного веса путем лучшего распределения массы орудия и поперечную устойчивость, улучшить проходимость на почвах с низкой несущей способностью, а меньшее пятно контакта снижает сопротивление повороту и улучшает движение по дорогам общего пользования.

Автоматизированная система синхронно измеряет и регулирует проскальзывание гусеничных движителей. Фактическая и теоретическая скорости получают в цифровом виде с помощью комбинации контроллера и эффекта Холла, используемой на передних колесах и задних гусеницах для цифрового считывания пробуксовки движителей [11]. Также производится замер уровня заглубления движителей за счет датчиков, измеряющих расстояние от нижней точки трактора до поверхности грунта. Контроллер, получая сигналы от датчиков, самостоятельно их анализирует и, при необходимости, посылает сигнал на исполнительные механизмы (сервоприводы): производить увеличение или уменьшение пятна контакта в зависимости от выбранного ранее режима (рис. 3).

Для сравнения штатной колесной ходовой системы с трансформируемой СГХС в исходном и трансформированном состояниях удобно воспользоваться таблицей.

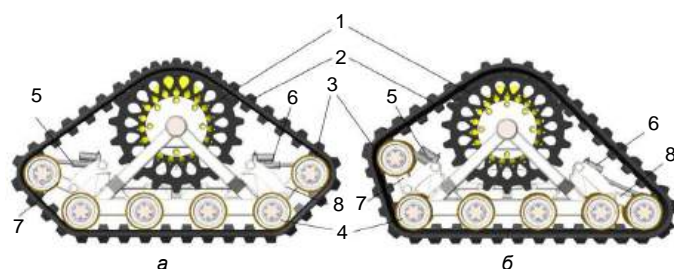


Рис. 2. Внешний вид трансформируемой СГХС с изменяемым пятном контакта:

а — исходное пятно контакта; б — трансформированное пятно контакта; 1 — ведущее колесо; 2 — резиномармированная гусеница; 3 — колесо, направляющее двухободье с внешней амортизацией; 4 — колесо опорное двухободье с внешней амортизацией; 5 — сервопривод натяжного устройства; 6 — сервопривод устройства изменения опорной ветви; 7 — кривошип натяжного устройства; 8 — кривошип устройства изменения опорной ветви

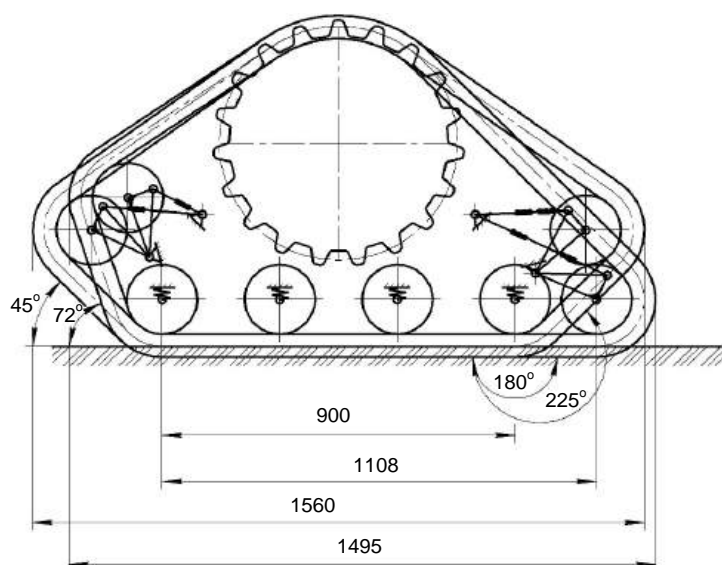
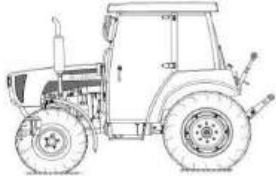
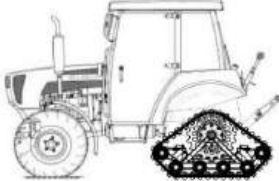
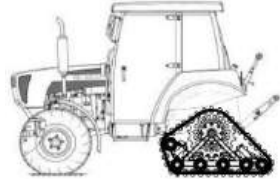
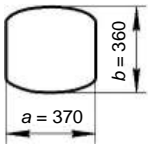
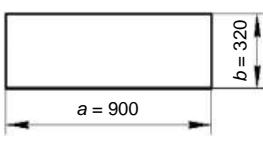
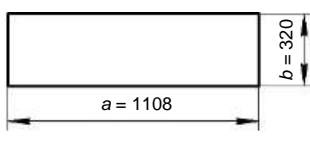


Рис. 3. Основные изменяемые размеры СГХС до и после трансформации

Сравнение отдельных характеристик трактора с трансформируемой СГХС

№ п/п	Параметр \ Тип ходовой системы	Значение при варианте ходовой системы		
		Колесная (штатная)	Съемная гусеничная — исходное пятно контакта	Съемная гусеничная — трансформированное пятно контакта
1.	Изображение			
2.	Масса эксплуатационная, кг	2410	2696	2696
3.	Развесовка перед/зад, %	40/60	36/64	36/64
4.	Маркировка колеса или гусеницы	360/70R24	320×100×37	320×100×37
4.	Форм пятна контакта (условная)			
5.	Площадь пятна контакта, м²	$S_k = 0,25\pi abK_1 = 0,125$ [12], $K_1 = 1,2$ (ГОСТ 26953-86)	$S_{c1} = ab = 0,288$	$S_{c2} = ab = 0,354$
6.	Удельное давление на почву, кПа	$\rho = \frac{0,60mg}{2000S} =$ 56,7	$\rho = \frac{0,64gm}{2000S} =$ 29,4 23,9	

Примечание: S_k , S_{c1} , S_{c2} — площадь пятна контакта соответственно под штатным колесным движителем, СГХС в исходном и СГХС в трансформированном состоянии; a , b — соответственно продольная и поперечная составляющие размера пятна; K_1 — коэффициент, зависящий от наружного диаметра шины колеса (ГОСТ 26953-86); ρ — удельное давление на почву; m — масса трактора, приходящаяся на один движитель; g — ускорение свободного падения; S — площадь исследуемого пятна контакта.

Как видно из таблицы, даже исходная площадь пятна контакта СГХС S_{c1} больше аналогичной площади штатной колесной ходовой системы S_k в 2,3 раза. В процессе трансформации за счет увеличения длины опорной ветви гусеницы общая площадь пятна контакта СГХС увеличивается на 23%, что подтверждается расчетами по формуле:

$$S_{c\Delta} = \frac{S_{c2} - S_{c1}}{S_{c1}} 100 = 23 \%. \quad (1)$$

Таким образом, после трансформации относительно штатной ходовой системы увеличение пятна контакта достигает значения в 2,8 раза, что существенно снижает давление на почву до безопасных 23 кПа.

При включении переднего моста в ведомый режим работы скорость движения трактора и его буксование будут определяться исключительно кинематическими особенностями перематывания гусеничной ленты ведущей звездочкой (ВЗ) СГХС. При этом теоретическая скорость движения будет определяться зависимостью [13]:

$$V_i = \frac{0,06 z_{BK} n_d t_{BK}}{i_{tri}}, \quad (2)$$

где z_{BK} — число зубьев ВЗ;

n_d — частота вращения вала двигателя, мин⁻¹;

t_{BK} — шаг зубьев ВЗ;

i_{tri} — передаточное число трансмиссии на -й передаче.

Расчет величины буксования с учётом данных, полученных от внешнего источника действительной скорости или данных датчика частоты вращения передних колес, осуществляется по следующей формуле:

$$\delta = \left(1 - \frac{V_d}{V_i} \right), \quad (3)$$

где V_d — действительная скорость движения, км/ч.

Заключение

Данная разработка направлена на уменьшение воздействия на почву, позволяет минимизировать негативное воздействие и повысить производительность, не требуя при этом отдельного внимания оператора. С использованием автоматизированной системы выбор пятна контакта гусеничных движителей происходит в автоматическом режиме, тем самым снижается нагрузка на оператора. При этом установлено, что за счет большей площади контакта давление на почву со стороны СГХС в исходном состоянии снижено в 2,3 раза по сравнению со штатной колесной ходовой системой, а режим трансформации позволяет увеличить площадь опорной ветви гусеницы

СГХС ещё на 23 %, что дополнительно снижает давление на почву до 23 кПа, что более чем в три раза меньше допустимых параметров и способствует дальнейшему снижению уплотняющего воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Garcia-Tomillo Aitor, de Figueiredo Tomás, Dafonte Jorge, Almeida Arlindo, Paz-González Antonio. Effects of machinery trafficking in an agricultural soil assessed by Electrical Resistivity Tomography (ERT) // Open Agriculture. 2018. V. 3. № 1. P. 378—385. <https://doi.org/10.1515/opag-2018-0042>.
2. Fashutdinov M., Khafizov K., Galiev I., Gabdrifkov F., Khabliullin F. Research of dynamics of turning of machine-tractor aggregate with tractor on wheeled-crawler mover // BIO Web of Conferences 17, 00056 (2020) FIES 2019 <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700056>.
3. Seguel O., Díaz D., Acevedo E. et al. Hydraulic Conductivity in a Soil Cultivated with Wheat-Rapeseed Rotation Under Two Tillage Systems // J Soil Sci Plant Nutr. 2020. V. 20. P. 2304—2315. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00296-w>.
4. Кузьмин В. А., Федоткин Р. С., Крючков В. А. Искусственная нейронная сеть для обоснования параметров ходовых систем тракторов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017. № 4. С. 24—30.
5. Ezzati S., Najafi A., Rab M. A., Zenner E. K. Recovery of soil bulk density, porosity and rutting from ground skidding over a 20-year period after timber harvesting in Iran // Silva Fennica. 2012. V. 46(4). P. 521—538. DOI: 10.14214/sf.908.
6. Федоткин Р. С. Выбор движителя для тракторов и комбайнов // Сельский механизатор. 2019. № 4. С. 2—3.
7. Федоткин Р. С. О выборе типа ходовой системы для сельскохозяйственных тракторов и комбайнов: мат. междунар. науч.-практ. конф., посвященной 75-летию Курганской ГСХА имени Т. С. Мальцева "Научно-техническое обеспечение агропромышленного комплекса в реализации Государственной программы развития сельского хозяйства до 2020 года" (Курган, 18—19 апреля 2019 г.). С. 357—363.
8. Ashok Kumar A., Tewari V. K., Nare B. Embedded digital draft force and wheel slip indicator for tillage research // Computers and Electronics in Agriculture. 2016. V. 127. P. 38—49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.05.010>.
9. Damanauskas V., Janulevičius A., Pupinis G. Influence of extra weight and tire pressure on fuel consumption at normal tractor slippage // J. Agricultural Science. 2015. V. 7(2). P. 55—67.
10. Shafaei S. M., Loghavi M., Kamgar S. Fundamental realization of longitudinal slip efficiency of tractor wheels in a tillage practice // Soil and Tillage Research. 2021. V. 205. P. 104765. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104765>.
11. Gupta C., Tewari V. K., Ashok Kumar A., Shrivastava P. Automatic tractor slip-draft embedded control system // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. V. 165. P. 104947. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104947>.
12. Казаченко Г. В., Басалай Г. А., Кремчев Э. А. Колесные движители горных машин: метод. пособие. — Минск: БНТУ, 2012. — 37 с.
13. Федоткин Р. С., Крючков В. А., Бейнсенсон В. Д., Парфенов В. Л. Методика проектирования ведущих колес цевочного сцепления с резиномармированными гусеницами тяговых и транспортных машин // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 3. С. 24—32.

An automated system for improving the efficiency and environmental performance of tracked propellers

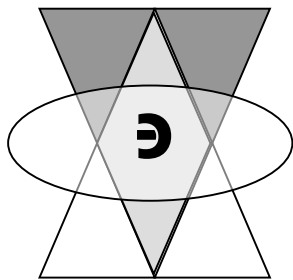
E. V. OVCHINNIKOV, A. S. OVCHARENKO, K. S. DMITRIEV
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

This article provides an overview of modern methods of reducing the pressure of tractor propellers on the soil and considers the possibility of installing an automated intelligent control system for changing the contact patch of caterpillar propellers installed on the rear axle of the tractor to select the optimal contact patch parameter that provides minimal impact on the soil and reduces slipping at maximum performance.

Keywords: tracked mover, contact patch, ground pressure reduction, intelligent system.

Bibliography — 13 references.

Received January 29, 2023



Чрезвычайные ситуации, экологическая оценка их последствий

УДК 004.9

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_2_48

EDN: DKOLPR

Изменения в информационной технологии разработки паспортов безопасности потенциально опасных объектов

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

Институт информатики и математического моделирования им. В. А. Путилова — обособленное подразделение ФГБУ науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр РАН», г. Апатиты, Мурманская область, Россия

Рассмотрены вопросы паспортизации безопасности потенциально опасных объектов. Дано описание прежней и новой нормативных баз, проанализированы проблемы создания планирующих документов. Основное внимание уделено информационно-аналитическим вопросам разработки.

Ключевые слова: промышленная безопасность, паспорт безопасности, потенциально опасные объекты.

Начиная с 2020 г., законодательство РФ по регулированию промышленно-экологической безопасности, разработке планирующих документов претерпевает существенные изменения. Авторами ранее были освещены такие аспекты этого процесса, как планирование борьбы с разливами нефтепродуктов [1] и безопасность критически важных объектов [2]. В данной работе представлен анализ изменений в порядке (регламенте, правилах) и формах (содержании) разработки паспортов безопасности промышленных предприятий — направления, охватывающего наибольшее число опасных объектов техносферы. Формирование нового законодательства продолжается, однако процесс паспортизации стартует в 2023 г. В связи с этим обсуждение поднятых авторами вопросов представляется актуальным.

Дана краткая характеристика прежних (отменённых) положений. Здесь авторы опираются в основном на работу [3] и делятся своим опытом разработки паспортов безопасности. Рассматриваются новые документы, выпущенные к настоящему времени. Далее производится сравнительный анализ старого и нового законодательства.

Прежнее законодательство

Процедура паспортизации была запущена в результате решения [4]. По числу разработанных к 2020 г. паспортов безопасности и охваченных производственных объектов это самая массовая кампания в сфере промышленной безопасности РФ. Главные регламентирующие акты были выпущены под эгидой МЧС России. Это прежде всего Приказ от 04.11.2004 № 506 [5], определявший требования к структуре и оформлению типового паспорта безопасности (ПБ) опасного объекта (за исключением объектов Вооружённых Сил РФ).

ПБ утверждал руководитель объекта и согласовывал руководитель Главного управления (ГУ) МЧС по субъекту России. В качестве задач разработки ПБ указывались оценки показателей риска чрезвычайных ситуаций (ЧС), а также мероприятия по снижению риска и смягчению последствий ЧС. При этом должны были учитываться возможные ЧС на соседних объектах, а также опасные природные явления.

Разработку ПБ организует руководство объекта. ПБ разрабатывался в двух экземплярах, один — хранится на объекте, другой — направляется в соответствующее ГУ МЧС России.

ПБ содержит 4 раздела и приложения.

Раздел 1 представляет собой таблицу общих сведений об организации, территории, персонале, климатических условиях, опасных веществах.

Раздел 2 — таблица, содержащая показатели приемлемого риска для персонала и населения и

Яковлев Сергей Юрьевич, старший научный сотрудник.

E-mail: yakovlev@iimm.ru

Шемякин Алексей Сергеевич, младший научный сотрудник.

E-mail: shemyakin@iimm.ru

Статья поступила в редакцию 20 марта 2023 г.

© Яковлев С. Ю., Шемякин А. С., 2023

основные характеристики наиболее опасного и наиболее вероятного сценариев ЧС.

Раздел 3 содержит характеристики аварийности, травматизма и пожаров на опасном объекте за последние пять лет, также в краткой табличной форме.

Раздел 4 содержит сведения о наличии необходимых объектовых документов (в т. ч. по Приказу № 105 [6]), о сроке оценки готовности объекта к локализации и ликвидации ЧС, о характеристиках специальных подразделений (спасательных и иных формирований), о наличии технических защитных систем (систем оповещения, защитных сооружений, противопожарных систем, резервных источников и т. п.), о договоре страхования ответственности за причинение вреда.

В числе обязательных приложений ПБ — ситуационный план, диаграммы социального риска, расчетно-пояснительная записка (РПЗ).

Ситуационный план объекта с прилегающей территорией содержит зоны последствий ЧС и изолинии риска.

В РПЗ приводятся расчеты показателей риска по всем возможным сценариям ЧС. РПЗ — наиболее наукоёмкая часть ПБ, своего рода документ в документе. РПЗ имеет собственную внутреннюю структуру. Именно там обосновывается методология оценки риска и воспроизводятся все расчёты. Результаты расчётов в краткой форме воспроизводятся в разделе 2 ПБ.

Наряду с Приказами [5, 6] к числу основных нормативных документов также можно отнести Методические указания [7], утверждённые Заместителем Министра МЧС России 19.08.2004.

На уровне субъектов РФ принимались решения по организации разработки, выпускались соответствующие методические рекомендации, утверждались перечни опасных объектов, для которых необходима разработка ПБ (см., например, выпущенные для Мурманской области документы [8—10]).

При выполнении расчётов можно было воспользоваться специализированными методиками, например, [11—14].

Отметим, что для формирования ПБ требовались сбор и изучение разнообразных материалов объектового уровня (положения, лицензии, свидетельства, сертификаты, договоры и т. д.), многие из которых прикладывали к ПБ в виде приложений.

В [3] отмечен ряд проблем разработки ПБ, намечены способы их решения, приведены примеры реализации.

Новое законодательство

Приказы № 506 и 105 [5, 6] отменены Постановлением Правительства РФ № 1034 от 11.07.2020 [15]. Прошёл довольно значительный период прежде чем начали появляться аналоги прежних документов. Основным новым актом — постановление Правительства РФ № 1265 от 14.07.2022 [16] — вступает в силу 1 сентября 2023 г. (и действует по 31 августа 2029 г.). Таким образом, правовой вакуум длился более двух лет. Обратимся к постановлению [16]. Оно содержит ссылку на закон № 68-ФЗ [17] в части полномочий Правительства РФ устанавливать условия разработ-

ки и форму ПБ критически важных объектов (КВО) и потенциально опасных объектов (ПОО). Постановление [16] утверждает правила (порядок) и форму ПБ ПОО.

ПБ по новому законодательству нацелен на решение двух задач: информационное обеспечение Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (РСЧС) и обеспечение планирования мероприятий по предупреждению и ликвидации ЧС на объекте.

ПБ разрабатывают для предприятий, отнесенных к ПОО на основании критериев, которые принимают в соответствии с постановлением № 1226 [18]. Отметим, что постановление [18] содержит ссылку на ту же статью закона [17], что и постановление [16], и определяет только правила разработки критериев, самих критериев (наименований показателей и их значений) оно не содержит. Методическое руководство разработкой критериев поручается МЧС России. В [18] содержатся определения понятий, таких как здание, здания и сооружения повышенного уровня ответственности, категории опасности ПОО, объект, объекты, подлежащие отнесению к потенциально опасным объектам, сооружение. В зависимости от характера (уровня) возможной ЧС (федеральный характер, межрегиональный, региональный, межмуниципальный, муниципальный, локальный и ниже) выделяются ПОО шести категорий (уровней) опасности (1-я категория опасности — особо высокий уровень опасности, 2-я — чрезвычайно высокий, 3-я — высокий, 4-я — повышенный, 5-я — средний, 6-я — низкий).

В соответствии с [18] разработан ряд критериев [19, 20].

Физические и юридические лица, эксплуатирующие ПОО, до 1 декабря 2023 г. организуют разработку и утверждение ПБ. ПБ оформляется на бумажном носителе в двух экземплярах.

Паспорт безопасности не разрабатывают в случае отнесения ПОО одновременно к КВО на основании критериев, утвержденных в соответствии с постановлением № 1225 [23]. Заметим, однако, что согласно постановлению Правительства № 2034 [24] для КВО также разрабатываются паспорта безопасности КВО (ранее были планы повышения защищённости КВО).

ПБ утверждает руководитель (заместитель руководителя) организации, эксплуатирующей ПОО. После утверждения ПБ подлежит регистрации и учету в ГУ МЧС России (по субъекту нахождения ПОО) и последующему размещению в базе данных органа повседневного управления РСЧС федерального и регионального уровней.

Соответствие ПБ требованиям настоящих Правил и форме, утвержденной постановлением [16], оценивается ГУ МЧС России (по месту нахождения ПОО) в ходе регистрации ПБ, а также при осуществлении федерального государственного надзора.

Рассмотрим содержание ПБ [16].

Раздел 1 "Общие сведения о ПОО". Здесь содержатся краткие сведения об организации, которой принадлежит ПОО, в т. ч. данные о должностных лицах, обеспечивающих борьбу с ЧС. Далее приводятся краткие сведения о ПОО, в т. ч. его учетный номер

по перечню ПОО, категория ПОО, его фактический адрес, код по ОКТМО (Общероссийский классификатор территорий муниципальных образований) и описание земельного участка.

Раздел 2 содержит сведения о силах и средствах для предупреждения и ликвидации ЧС. Здесь содержатся данные об аварийно-спасательных службах и формированиях (профессиональных и нештатных) и их аттестации. Приводятся сведения о системах оповещения и информирования персонала и населения, а также о резервных источниках снабжения, обеспечивающих функционирование ПОО в ходе ЧС. Приводятся данные по резервам финансовых и материальных ресурсов для борьбы с ЧС. Даются сведения о пожарной охране организации. Большая часть данных отображается в табличной форме.

Раздел 3 "Результаты прогнозирования и оценки последствий возникновения ЧС". Кратко описываются наиболее вероятный и наиболее опасный сценарии ЧС. При этом, однако, приводятся данные о всех возможных источниках ЧС. Здесь же для каждого источника ЧС заполняется таблица с характеристиками зоны действия поражающих факторов: технологический источник, сценарий, опасное вещество, поражающий фактор, размеры и форма зоны действия, разрушение и заражение зданий, возможное число людей в зоне. Также в табличной форме и для каждого источника приводится характеристика последствий на территории ПОО: опасное вещество, сценарий, возможный социальный и материальный ущерб. Подобные таблицы (только без материального ущерба) оформляются и для территории вне ПОО: для своего и соседних муниципальных и территориальных образований, а также для мест с массовым пребыванием людей. Указывается характер ЧС (в соответствии с требованиями по классификации ЧС). Кроме того, в этом же пункте даётся характеристика негативного воздействия на ПОО от ЧС на рядом расположенных ПОО. При этом приводится информация по каждому из рядом расположенных ПОО, от которых возможно негативное воздействие на описываемый ПОО. Для каждого из соседних ПОО заполняются похожие данные также в форме таблиц: вид опасности (химически опасный, пожароопасный, взрывоопасный и другие), возможные сценарии и характер ЧС; зоны воздействия поражающих факторов для описываемого ПОО; социальный и материальный ущерб "нашего" ПОО. Затем характеризуется воздействие на ПОО со стороны возможных ЧС природного характера. Для каждой территории указываются возможные источники ЧС и перечисляются опасные сценарии, даётся характеристика зон действия поражающих факторов и возможных последствий (социальный и материальный ущерб) для ПОО. В заключение этого пункта приводятся количественные показатели рисков ЧС на территории ПОО: индивидуального, коллективного и потенциального территориального риска.

Рассмотрим приложения ПБ [16].

Ситуационный план (СП) размещения ПОО — неотъемлемая часть ПБ. СП представляет собой общий план ПОО и размещение ПОО на территории муниципального образования.

Также неотъемлемой частью ПБ является список изменений, вносимых в ПБ.

В ПБ может быть внесена дополнительная информация с учетом особенностей ПОО.

Таковы основные особенности нового ПБ ПОО.

Сопоставительный (сравнительный) анализ

Сравним прежнее и новое законодательство. Сначала рассмотрим *основные сходные составные части* разработки ПБ.

- Ведущая роль в методическом руководстве отводится МЧС России.

- В ПБ есть аналогичные разделы: общие сведения об объекте (раздел 1), сведения о готовности к борьбе с ЧС (раздел 4 в прежнем и раздел 2 в новом), показатели риска ЧС (приложение "РПЗ" в прежнем и раздел 3 в новом), приложение "Ситуационный план".

- В обоих случаях полнее других представлены наиболее опасный и наиболее вероятный сценарии ЧС.

Отметим *главные различия*.

- Основные руководящие документы ранее были в ранге Приказов МЧС России, теперь это постановления Правительства РФ.

- Изменились круг и содержание задач, для решения которых разрабатывается ПБ.

- В новом законодательстве более существенная роль отведена критериям отнесения объектов к потенциально опасным.

- В прежнем ПБ более значительное место было отведено обоснованию методологии и расчётам показателей риска (в рамках РПЗ), в новом результаты оценки риска представлены кратко, в табличной форме (РПЗ отсутствует).

- Появились определения некоторых понятий, важных для разработки ПБ.

Остановимся также на некоторых дискуссионных вопросах.

1. Об отнесении объектов к потенциально опасным. Выше обсуждались правила разработки критериев [18]. Отметим, что содержащееся в них определение понятия — объекты, подлежащие отнесению к ПОО — само по себе уже является критерием. Разработанные в соответствии с [18] показатели ([19, 20] и другие возможные) посвящены различным объектам, ссылаются на разнородные документы (Градостроительный кодекс, постановление Правительства, Санитарные правила и нормативы), не образуют системы, и неясно, когда эта работа будет закончена.

2. Наиболее опасный и наиболее вероятный сценарии ЧС. В основном постановлении [16], как видно из приведённого описания, наряду с требованием предоставления только двух указанных сценариев, также содержатся позиции, предписывающие предоставление всех возможных источников ЧС, ЧС на соседних ПОО, опасных природных явлений.

3. Нормативно-методическая и организационная основа паспортизации.

Не вполне понятны и не регламентированы методические основы расчёта показателей риска. Отметим для примера относительно новый Приказ [25].

Не вполне ясным представляется также распределение ответственности между ведомствами в процессе категорирования уровней ПОО.

Заключение

В целом выполненный анализ внесённых изменений ([1, 2] и настоящая статья) позволяет сделать вывод об их общей направленности: унификация, централизация разработки планирующих документов (декларации, планы, паспорта). Основные нормативные акты выпускаются в виде постановлений Правительства РФ. Можно констатировать, что правила и формы упрощаются, устраняется дублирование, но в то же самое время оценки безопасности (рисков) становятся более приближёнными и менее обоснованными. К тому же, как отмечалось, формирование нового законодательства далеко не закончено, и этот процесс не отличается системностью. На некоторое время прервалась и практическая деятельность по разработке планирующих документов.

*Работа выполнена в рамках темы НИР
122022800547-3 "Разработка теоретических
и организационно-технических основ инфор-
мационной поддержки управления жизнеспособ-
ностью региональных критических инфраструк-
тур Арктической зоны Российской Федерации"*

ЛИТЕРАТУРА

1. Yakovlev S. Yu., Shemyakin A. S. Problems of Environmental and Technogenic Safety Regulation in the Arctic Region: Oil Spills // E3S Web Conf. 378 05006 (2023). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337805006>
2. Яковлев С. Ю., Шемякин А. С., Олейник А. Г. Регулирование техногенно-экологической безопасности критически важных объектов инфраструктуры: обновление нормативной базы // Труды Колского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 2. С. 83—102.
3. Яковлев С. Ю., Рыженко А. А., Исакевич Н. В. Методические вопросы разработки паспортов безопасности опасных объектов // Информационные технологии в региональном развитии. 2005. Вып. 5. С. 83—88.
4. О мерах по обеспечению защищенности критически важных для национальной безопасности объектов инфраструктуры и населения страны от угроз техногенного, природного характера и террористических проявлений. Решение совместного заседания Совета Безопасности Российской Федерации и президиума Государственного совета Российской Федерации (протокол от 13 ноября 2003 г. № 4).
5. Приказ МЧС РФ от 04.11.2004 № 506 "Об утверждении типового паспорта безопасности опасного объекта" (Зарегистрировано в Минюсте РФ 22.12.2004 № 6218).
6. Приказ МЧС РФ от 28.02.2003 № 105 "Об утверждении Требований по предупреждению чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах и объектах жизнеобеспечения" (Зарегистрировано в Минюсте РФ 20.03.2003 № 4291).
7. Методические указания по разработке паспорта безопасности опасного объекта. Утверждены Заместителем министра МЧС России 19.08.04.
8. Постановление Правительства Мурманской области от 24.06.2005 № 254-ПП "Об утверждении перечня потенциально опасных объектов и объектов жизнеобеспечения Мурманской области" (ред. от 30.12.2020)
9. Постановление Правительства Мурманской области от 27.07.2005 №292-ПП "О разработке паспортов безопасности опасных объектов и территорий Мурманской области" (вместе с "Типовым паспортом безопасности опасного объекта", "Типовым паспортом безопасности территорий субъектов Российской Федерации и муниципальных образований").
10. Методические рекомендации по организации разработки паспортов безопасности опасных объектов, территорий муниципаль-ных образований и территории Мурманской области. Утверждены Приказом Начальника Главного управления МЧС России по Мурманской области от 19.10.2005 г. № 469.
11. Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций. — М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2004.
12. Методика оценки последствий химических аварий (Методика "Токсик". Редакция 2.2) // Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: сб. документов. / Колл. авт. Изд. 2, испр. и доп. — М.: ГУП "НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России", 2002. Сер. 27. Вып. 2. С. 123—206.
13. Методика оценки последствий аварий на пожаровзрывоопасных объектах // Сборник методик по прогнозированию возможных аварий, катастроф, стихийных бедствий в РСЧС. Кн. 2. — М.: ВНИИ ГОЧС, 1994. С. 1—42.
14. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов (РД 03-418-01). Утверждены Постановлением Госгортехнадзора России от 10.07.2001 № 30.
15. Постановление Правительства РФ от 11.07.2020 №1034 "О признании утратившими силу нормативных правовых актов и отдельных положений нормативных правовых актов РФ, об отмене актов федеральных органов исполнительной власти, содержащих обязательные требования, соблюдение которых оценивается при проведении мероприятий по контролю при осуществлении федерального государственного пожарного надзора и лицензионного контроля в области пожарной безопасности, федерального государственного надзора в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, государственного надзора за использованием маломерными судами, базами (сооружениями) для их стоянок во внутренних водах и территориальном море Российской Федерации" (ред. от 19.12.2020).
16. Постановление Правительства РФ от 14.07.2022 № 1265 "Об утверждении Правил разработки и формы паспорта безопасности потенциально опасного объекта"
17. Федеральный закон от 21.12.1994 № 68-ФЗ "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера" (ред. от 04.11.2022).
18. Постановление Правительства РФ от 14.08.2020 № 1226 "Об утверждении Правил разработки критериев отнесения объектов всех форм собственности к потенциально опасным объектам".
19. Приказ Ростехнадзора от 03.08.2021 № 273 "Об утверждении критериев отнесения объектов всех форм собственности, правообладателями которых являются организации, в отношении которых Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору осуществляет регулирование деятельности, к потенциально опасным объектам" (Зарегистрировано в Минюсте России 12.01.2022 № 66831).
20. Приказ Роспотребнадзора от 26.05.2022 № 278 "Об утверждении критериев отнесения объектов всех форм собственности, правообладателями которых являются Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека или организации, в отношении которых Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека осуществляет координацию и регулирование деятельности, к потенциально опасным объектам" (Зарегистрировано в Минюсте России 10.08.2022 № 69585).
21. Постановление Правительства РФ от 21.05.2007 № 304 "О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера" (ред. от 20.12.2019).
22. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 26.04.2010 № 40 "Об утверждении СП 2.6.1.2612-10 "Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)" (Зарегистрировано в Минюсте России 11.08.2010 № 18115) (ред. от 16.09.2013).
23. Постановление Правительства РФ от 14.08.2020 № 1225 "Об утверждении Правил разработки критериев отнесения объектов всех форм собственности к критически важным объектам".
24. Постановление Правительства РФ от 10.11.2022 № 2034 "Об утверждении Правил разработки и формы паспорта безопасности критически важного объекта".
25. Приказ Ростехнадзора от 03.11.2022 № 387 "Об утверждении Руководства по безопасности "Методические основы анализа опасности и оценки риска аварий на опасных производственных объектах".

Changes in information technology for the development of safety data sheets for potentially hazardous objects

S. Yu. YAKOVLEV, A. S. SHEMYAKIN

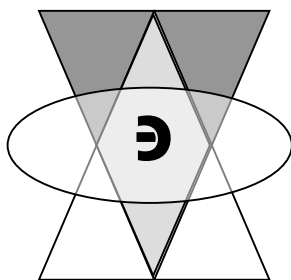
Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling — Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the RAS», Apatity, Murmansk region, Russia

The article deals with the issues of hazardous facilities safety certification. The description of the old and new regulatory framework is given, the problems of creating planning documents are formulated. The main attention is paid to information and analytical issues of development.

Keywords: industrial safety, safety data sheet, hazardous facilities.

Bibliography — 25 references.

Received March 20, 2023



УДК 911.3.33
DOI: 10.52190/2073-2589_2023_2_53
EDN: DKORWO

Состояние природной среды в зоне влияния медно-никелевого комбината "Североникель"

Е. Л. ВОРОБЬЕВСКАЯ, канд. геогр. наук; *А. В. ЕВСЕЕВ*, д-р геогр. наук;
Н. Б. СЕДОВА, канд. геогр. наук; *М. В. СЛИПЕНЧУК*, д-р эконо. наук
МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

Проведен анализ загрязнения тяжелыми металлами природной среды в центральной части Кольского полуострова в районе влияния комбината "Североникель", в окрестностях которого на протяжении многих лет наблюдается острая экологическая ситуация. Для выявления загрязнения в зимний период были использованы такие природные индикаторы, как снежный покров и мох-сфагнум. Проведенный анализ показал, что, как и ранее, комбинат продолжает оказывать значительное воздействие на окружающую среду, хотя и с гораздо меньшей интенсивностью. Максимальное загрязнение отмечается в окрестностях Мончегорского комбината (в радиусе 5 км от промплощадки) и в самом городе Мончегорске. Среди основных загрязнителей выделяются медь, никель и цинк. Данные биоиндикационных исследований подтверждают высокий уровень загрязнения природной среды в окрестностях медно-никелевого комбината, а также свидетельствуют о распространении загрязняющих веществ на значительном удалении от него (до 35–40 км).

Ключевые слова: состояние природной среды, Мончегорск, загрязнение, тяжелые металлы, металлургическое производство.

На протяжении многих лет авторами проводятся комплексные исследования, посвященные изучению состояния природной среды Мурманской области, которая является одним из самых развитых арктических регионов России. С 1930-х гг. природная среда Мурманской области подвергается воздействию металлургической, горнодобывающей промышлен-

ности, горно-обогатительного производства и других отраслей хозяйства. В результате в Мурманской области на ряде участков территории образовались так называемые импактные районы, где складывается неблагоприятная, местами кризисная, геоэкологическая обстановка [1, 2]. Под импактным районом понимается участок в пределах территориально-промышленного комплекса, на котором в результате антропогенного воздействия произошли негативные изменения природной среды, приведшие к появлению и развитию неблагоприятных экологических ситуаций [2].

Данное исследование посвящено выявлению загрязнения тяжелыми металлами одного из них: импактный район расположен в центральной части Кольского полуострова, где основным источником выбросов является комбинат "Североникель", входящий в акционерное общество "Кольская горно-металлургическая компания". АО "Кольская ГМК" —

Воробьевская Елена Леонидовна, старший научный сотрудник.
E-mail: lvorob@mail.ru
Евсеев Александр Васильевич, ведущий научный сотрудник.
E-mail: ecologmsu@gmail.com
Седова Наталья Борисовна, старший научный сотрудник.
E-mail: nsedova@mail.ru
Слипенчук Михаил Викторович, заведующий кафедрой.
E-mail: ecologmsu@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2023 г.

© Воробьевская Е. Л., Евсеев А. В., Седова Н. Б.,
Слипенчук М. В., 2023

один из ведущих производственных комплексов Мурманской области, созданный на базе старейших предприятий — комбинатов "Североникель", "Печенганикель", который представляет собой единое горно-металлургическое производство по добыче и переработке сульфидных медно-никелевых руд и производству цветных металлов. Горно-металлургическое предприятие полного цикла "Североникель" расположено в озерной котловине и с запада, востока и юга окружено невысокими хребтами — тунтури: Мончетундра, гора Нюд и др.

В процессе горно-металлургического производства в природную среду поступают диоксид серы, медь, никель, кобальт, окислы азота и углерода, формальдегид, пылевые частицы и др. [3, 4]. Загрязняющие вещества поступают в природную среду тремя основными путями: со сточными водами, с отходами, непроходящими достаточной очистки, со шлаками и с выбросами аэрозольных частиц.

Комбинат "Североникель" был основан в 1935 г., одновременно с этим началось строительство населённого пункта Мончегорск. Первый товарный никель комбинат дал в 1939 г. [5]. Комбинат до начала 1960-х гг. работал на местных медно-никелевых рудах, с 1963 г. перешел на руды Талнахского месторождения (г. Норильск), которые доставлялись по Северному морскому пути через Мурманск и Канда-лакшу. В 1970-х гг. объем выбросов SO_2 в атмосферу достиг 250—280 тыс. т, что вызвало образование кислотных осадков и деградацию таежных экосистем в окрестностях комбината. К середине 1980-х гг. его воздействие прослеживалось уже на расстоянии до 100 км и более [6]. В 1980—1984 гг. выбросы пылевых частиц "Североникеля" составляли 6—7 тыс. т в год, из которых на никель приходилось до 3600 т [7]. Такое воздействие вызвало здесь усыхание лесов и деградацию почвенного покрова, в частности, на территории Лапландского заповедника [8, 9]. В 1990-х гг. внедрение в производство новых технологий, закрытие цеха обогащения, снижение объемов переработки высокосернистой норильской руды, а также открытие цеха по производству серной кислоты привело к уменьшению количества выбросов токсичных веществ в атмосферу. Так, в 1999 г. количество выбросов диоксида серы снизилось до 46 тыс. т, а твердых веществ — до 6,0 тыс. т; в 2003 г. эти показатели составили соответственно 41,6 и 4,3 тыс. т [8, 10]. После разработанной технологии обжига никелевого концентрата с использованием кислорода, выбросы пылевых частиц сократились до 30—35 %, соответственно выбросы никеля в атмосферу снизились на 1500 т [3].

Деятельность предприятия "Североникель" привела к существенной трансформации природной среды. Несмотря на то, что в настоящее время утилизация сернистого газа по плану достигает 80 % и за последние 10 лет наблюдается начало естественного восстановления экосистем, территория вблизи комбината до сих пор представляет собой техногенную пустошь (рис. 1), образовавшуюся в результате длительного функционирования предприятия (в основном, из-за преобладания в структуре атмосферных выбросов соединений серы и металлосодержащих аэрозолей) [4]. Следует отметить, что

воздействие предприятий подобного уровня для лесотундровых и северотаежных ландшафтов исследуемой территории весьма критично. Их ассимиляционный потенциал и способность к самовосстановлению крайне малы, поэтому территория в радиусе нескольких десятков километров вокруг комбината "Североникель" представляет собой типичный импактный район — растительный и почвенный покров местами сильнее всего образом деградированы, а в депонирующих средах накапливаются загрязняющие вещества [11]. Лесные массивы, прилегающие к производственным территориям, нарушены на 50 %, из которых 20 % — мертвый лес.



а



б

Рис. 1. Зона техногенной пустоши:

а — лето; б — зима

В последние десять лет сложившуюся ситуацию удалось частично изменить в лучшую сторону благодаря предпринятым "Кольской ГМК" мерам по модернизации производства и по рекультивации нарушенных в результате деятельности комбината территорий. Необходимость оценки этих мер как ключевых в вопросе восстановления экологического благополучия исследуемой территории обуславливает актуальность данного исследования.

Материалы и методы исследований

Авторами было проведено исследование влияния комбината "Североникель" на прилегающие и отда-

ленные территории в зимний период 2022 г. В задачи входило проведение геоэкологических исследований для выявления загрязнения окружающей среды аэротехногенными выбросами в результате деятельности медно-никелевого комбината "Североникель" с помощью природных индикаторов: снежного покрова и мха, которые позволяют отразить сезонные уровни накопления загрязняющих веществ. Данное исследование проводили на основе ранее применяемых методик [6, 12—15].

Для индикации атмосферного загрязнения использовали бриоиндикационный метод [4, 16, 17]. Для исследования выбран мох сфагнум (*Sphagnum fuscum*, *S. dalticum*), так как он чутко реагирует на присутствие в атмосферном воздухе вредных веществ и имеет высокую способность накопления тяжелых металлов. Мох сфагнум был собран в фоновом (условно чистом) районе, освобожден от посторонних включений, высушен и собран порциями в подвесные сети, которые развешивались в исследуемом районе в заранее намеченных точках на высоте около 1,5—2 м на разном удалении от комбината в зоне его предполагаемого воздействия и на прилегающих территориях. Ключевые участки опробования выбирались вблизи источников антропогенных выбросов и на удалении от них. Всего летом было вывешено 24 сеточки. Через полгода зимой сеточки со мхом были собраны и проанализированы в Москве в лаборатории атомной абсорбции на предмет выявления элементов-загрязнителей и их концентрации в образцах. Полученные результаты сравнивались с фоновой пробой.

Хорошим индикатором атмосферного загрязнения является снег. Как депонирующая среда, он обладает высокой сорбционной способностью и осаждает из атмосферы на земную поверхность значительную часть загрязнителей [18]. Изучение химического состава снежного покрова позволяет выявить пространственные ареалы загрязнения и количественно рассчитать реальную поставку загрязняющих веществ в ландшафты в течение периода с устойчивым снежным покровом [19]. На заранее намеченных участках методом конверта отбирали смешанную пробу. Снег отбирали на всю глубину его залегания. Последующий анализ проводили в Москве в лаборатории мониторинга водных систем кафедры рационального природопользования и лаборатории атомной абсорбции кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ. Оценивались концентрации в пробах таких элементов-загрязнителей, как Cu, Ni, Zn, Pb, Co, Cr, Cd. Результаты анализа проб снега сравнивали с усредненным значением данных по трем фоновым точкам, отобраным в условно чистых местах в Ловозерье.

Снег отбирали в тех же точках, где были вывешены сеточки со мхом. Для проведения исследования была выбрана трансекта, проходящая по долине озера Имандра на удалении в пределах 40 км в северном и южном направлениях от комбината и за пределами этой зоны в целях определения границ воздействия предприятия за исследуемый период времени. Более детально были обследованы окрестности города Мончегорск и промплощадки комбината. Размещение точек опробования обусловлено харак-

тером распространения антропогенных загрязнителей в соответствии с розой ветров, характером и распределением растительного покрова, размещения населенных пунктов и т. д. Точки отбора проб были размещены в соответствии с действующим Руководящим документом (РД) 52.44.2-94 от 1994 г., согласно которому пробы отбирали по основным румбам ветров на расстоянии 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30 и 40 км от источников загрязнения [20]. В городах пробы снега отбирали с учетом различных функциональных зон, с учетом этажности застройки, особенностей рельефа, розы ветров, распределения зеленых насаждений.

В целях суммарной оценки содержания тяжелых металлов в снежном покрове точек опробования был рассчитан коэффициент суммарного загрязнения Z_c [13, 21] для наиболее характерных для подобного производства элементов-загрязнителей — меди, никеля и цинка. Для сравнительной оценки степени загрязненности снежного покрова использовался коэффициент концентрации элемента в снеговой воде: $K_c = C_x / C_f$, где K_c — коэффициент концентрации; C_x — содержание элемента в конкретной пробе, мг/л; C_f — фоновое содержание элемента, мг/л [14, 21].

Полученные результаты

Проведенные исследования позволили оценить состояние природной среды в результате выбросов комбината "Североникель". На основании полученных в результате обработки проб данных были составлены графики по каждому элементу-загрязнителю. Ниже представлены результаты анализа снеговой воды по меди и никелю как основных загрязнителей комбината (рис. 2). По оси абсцисс показаны номера точек опробования, по оси ординат — концентрации загрязняющих веществ.

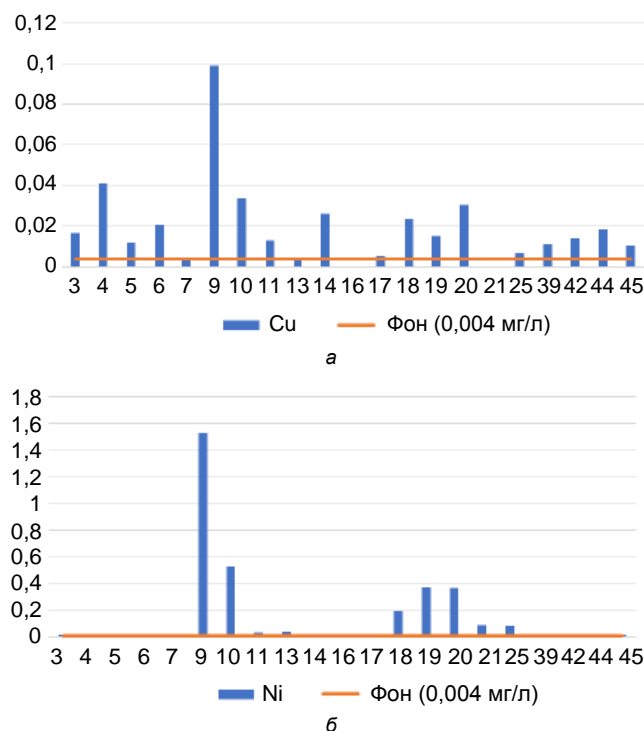


Рис. 2. Содержание меди (а) и никеля (б) в снеговой воде

Превышения фонового значения по меди отмечены практически во всех точках. Максимальные значения превышают фоновые значения в 25 раз, такое загрязнение снежного покрова выявлено в 2 км на юго-запад от комбината рядом с озером Сопчъявр (т. 9). По содержанию никеля наибольшее превышение отмечено в той же точке, расположенной рядом с озером Сопчъявр, — в 375 раз. Также точки с высоким содержанием меди и никеля отмечены около проходной комбината (т. 10) и в 2 и 5 км от комбината на юг (т. 19 и т. 20). Значительные превышения фона по меди также выявлены на участке в окрестностях пересечения трассы Кировск-Апатиты и трассы Санкт-Петербург-Мурманск (т. 4).

Полученные данные позволили провести комплексную оценку: был рассчитан коэффициент суммарного загрязнения Z_c для наиболее характерных для подобного производства элементов-загрязнителей — меди, никеля и цинка. Результаты анализа распределения загрязнения в зоне влияния комбината "Североникель" получили наглядное отражение на карте (рис. 3).

Наибольшее значение суммарного показателя загрязнения тяжелыми металлами (более 128) было зафиксировано на участке, расположенном в непо-

средственной близости от промышленной площадки Мончегорского металлургического комбината. Следует отметить, что такое высокое превышение показателя Z_c имеет место только в непосредственной близости от комбината. По мере удаления от него, значения этого показателя быстро снижаются.

По результатам анализа проб сфагнома было получено представление по содержанию элементов-загрязнителей (Cu, Zn, Ni, Pb) в пробах. Полученные данные были сопоставлены с фоновыми значениями накопления тяжелых металлов по каждому из элементов. В качестве примера представлена карта распределения поэлементного показателя концентрации загрязнения (K_c) по никелю в сфагнуме (рис. 4).

Результаты бριοиндикационных исследований показали значительное превышение фоновых концентраций по меди и никелю в 5-километровой зоне от промплощадки на юг и на север: обнаружены участки, где фоновые значения превышены более чем в 350 раз по никелю и в 50 раз по меди. Высокое азротехногенное загрязнение прослеживается на удалении от предприятия в 10 км на юг от комбината (т. 21). Следы медно-никелевой пыли нами также обнаружены и в дальних точках на расстоянии 35 и 45 км на юг от комбината (т. 6 и т. 5 соответственно).

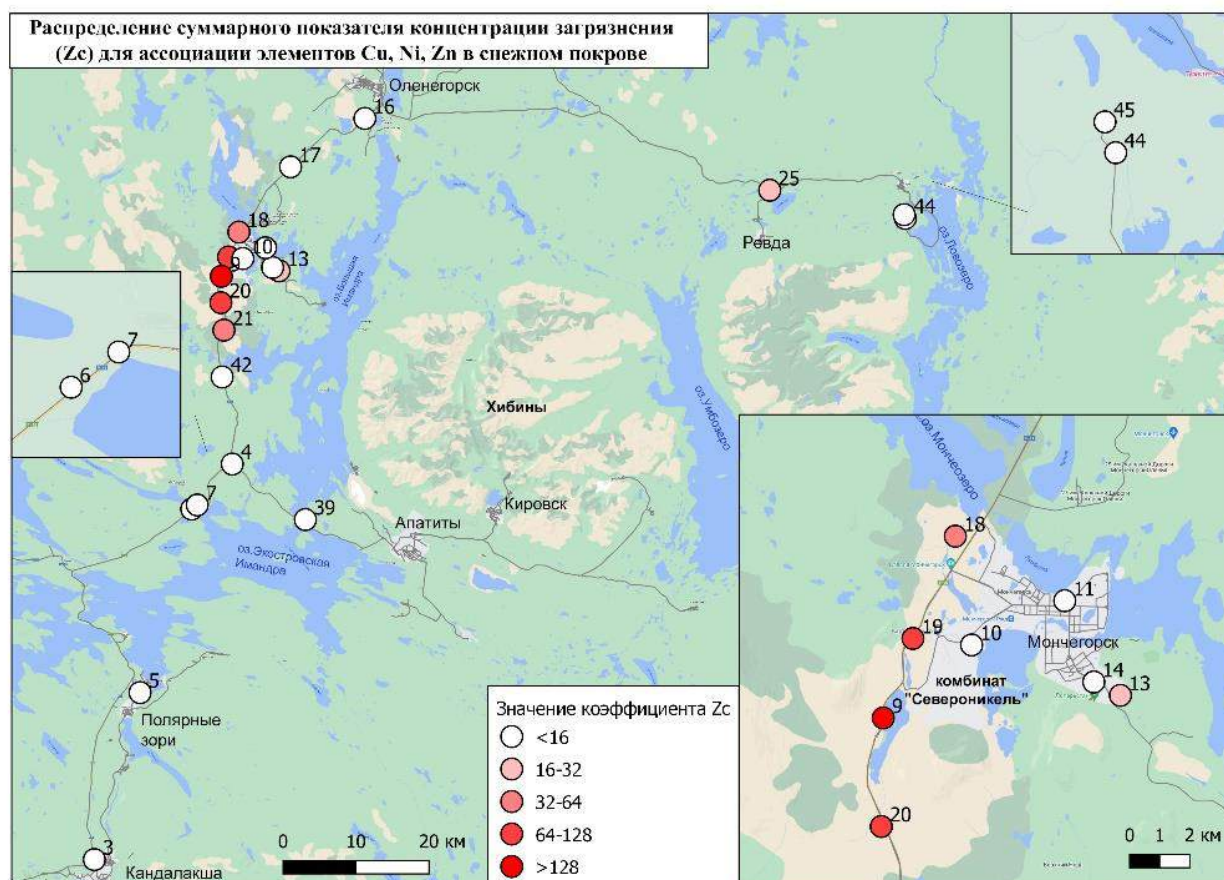


Рис 3. Суммарное загрязнение тяжелыми металлами снежного покрова в зоне влияния комбината "Североникель" [2]

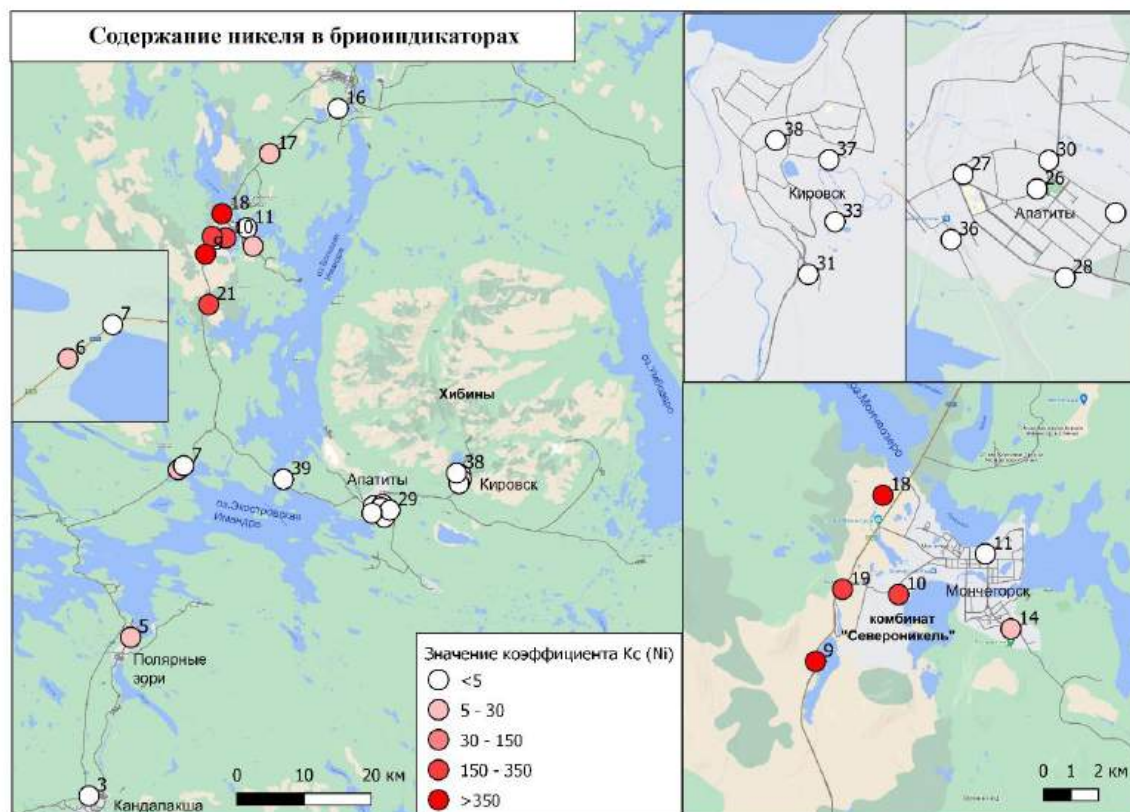


Рис. 4. Коэффициент концентрации никеля в бриоиндикаторах в зоне влияния комбината "Североникель"

Закключение

За длительный период (с 1930-х гг.) воздействия на компоненты природной среды горнодобывающей, горно-металлургической и горно-обогатительной промышленности на территории центральной части Кольского полуострова сформировался Центральнo-Кольский импактный район. Одну из зон повышенного воздействия на компоненты природной среды формирует медно-никелевый комбинат "Североникель". В его окрестностях на протяжении многих лет наблюдается острая экологическая ситуация, которая возникла в результате интенсивных выбросов аэротехногенных поллютантов (преимущественно ряда тяжелых металлов и SO_2).

Проведенный в работе анализ по выбранным индикаторам загрязнения природной среды (снег и мох-сфагнум) показал, что, как и ранее, комбинат продолжает оказывать значительное воздействие на окружающую среду, хотя и с гораздо меньшей интенсивностью по сравнению с периодом 30-летней давности. В настоящее время выбросы комбината еще более сократились по сравнению, например, с первым десятилетием 2000-х годов. Это обусловлено сокращением производства, сменой перерабатываемого сырья, более комплексной переработкой руды, модернизацией очистного оборудования и т. д. Все это отразилось на состоянии природных экосистем. В последние годы идет восстановление техногенной пустоши, в понижениях появилась береза и даже отдельные экземпляры подроста ели.

Тем не менее, согласно нашим исследованиям, в настоящее время в районе исследования наблюдается значительное загрязнение природной среды в

окрестностях Мончегорского комбината (в радиусе 5 км от промплощадки). Природные особенности данного участка исследований способствуют распространению загрязняющих веществ далеко на юг, через естественный природный барьер — гору Нюд, и почти беспрепятственно — на север (по имеющимся опубликованным данным — на 40 и более км). Загрязнение снежного покрова характерными загрязнителями комбината, хотя и в меньшем объеме, было выявлено и в снежном покрове города Мончегорска, чему способствует близость комбината к городу и особенности микроциркуляции атмосферы. Среди основных загрязнителей выделяется медь. По никелю и цинку также есть превышения в отдельных точках. В подавляющем большинстве точек опробования содержание других тяжелых металлов в снеге не превышало фоновых. Данные бриоиндикационных исследований подтверждают высокий уровень загрязнения природной среды в окрестностях медно-никелевого комбината, а также свидетельствуют о распространении загрязняющих веществ на значительном удалении от него (до 35—40 км).

Применяемые методы можно считать подходящими для проведения такого рода исследований: они дают возможность проследить распространение техногенных поллютантов в пространстве и во времени и оценить состояние природной среды.

Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова "Будущее планеты"

*и глобальные изменения окружающей среды"
и в рамках государственного задания
"Устойчивое развитие территориальных
систем природопользования"
(проект № 121051100162-6).*

ЛИТЕРАТУРА

1. Антропогенное воздействие на природу Севера и его экологические последствия (монографический сборник) / под ред. Изразля Ю. А. и др. — Апатиты: изд-во КНЦ РАН, 1999. — 313 с.
2. Евсеев А. В., Красовская Т. М. Закономерности формирования импактных зон в Арктике и Субарктике России // География и природные ресурсы. 1997. № 4. С. 19—24.
3. Даувальтер В. А., Даувальтер М. В., Салтан Н. В., Семёнов Е. Н. Химический состав атмосферных выпадений в зоне влияния комбината "Североникель" // Геохимия 2008. № 10. С. 1131—1136.
4. Евсеев А. В., Красовская Т. М. Рациональное природопользование на Кольском полуострове. М.: изд-во Моск. Ун-та, 1990. — 80 с.
5. Режим доступа: Сайт Кольской ГМК <http://www.kolagmk.ru>. [Электронный ресурс].
6. Опекунова М. Г., Елсукова Е. Ю., Чекушин В. А. и др. Мониторинг изменения состояния окружающей среды в зоне воздействия комбината "Североникель" с помощью методов биоиндикации // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2007. Вып. 1. С. 71—79.
7. Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Мат. Всероссийской научной конференции. Ч. 2. — Апатиты, Изд-во КНЦ РАН, 2008. С. 14—16.
8. Исаева Л. Г. и др. Изучение и охрана наземных экосистем Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. № 9. С. 6—33.
9. Цветков В. Ф. Повреждение лесов промышленными выбросами медно-никелевого комбината в Мурманской области // Проблемы лесоведения и лесной экологии. 1990. С. 618—621.
10. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области [электронный ресурс]. Режим доступа: https://gov-turman.ru/upload/iblock/4a3/Doklad_zh-2018-god_28-05-2019_ITOG.pdf.
11. Экологический атлас Мурманской области. — Москва — Апатиты, 1999.
12. Горшкова О. М., Горецкая А. Г., Корешкова Т. Н., Краснушкин А. В., Марголина И. Л., Потапов А. А., Пращкина Е. М., Шкиль А. Н. Методы лабораторных и полевых исследований: учеб.-метод. пособие. Изд. 3. — М.: Географический факультет МГУ, 2015. — 219 с.
13. Евсеев А. В. Геоэкологический мониторинг: учеб. пособие. — М.: Географический факультет, 2010. — 122 с.
14. Ревич Б. А., Сает Ю. Е., Смирнова Ю. Е. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве (Утв. 15 мая 1990 г. № 5174-90). — М.: ИМГРЖ, 1990. — 15 с.
15. Опекунова М. Г. Биоиндикация загрязнений. — СПб: С.-Петербург. ун-та, 2016. — 300 с.
16. Черненко Т. В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. — М.: Наука, 2002. — 190 с.
17. Harnes H. Monitoring of atmospheric deposition of heavy metals, nitrates and POPs in Europe using bryophytes. Maniroting manual. — Bangor: Environmental Center Wales, 2010.
18. Соловьева Н. Е., Олькова Е. А., Алябьева А. А., Краева О. В. Исследование талой воды (снега) как показатель загрязнения атмосферы урбанизированной среды // Молодой ученый. 2015. № 14. С. 668—672.
19. Сорокина О. И., Кошелева Н. Е., Касимов Н. С. и др. Тяжелые металлы в воздухе и снежном покрове Улан-Батора // География и природные ресурсы. 2013. № 3. С. 159—170.
20. РД 52.44.2-94. Методические указания. Охрана природы // Комплексное обследование загрязнения природных сред промышленных районов с интенсивной антропогенной нагрузкой. 1995. — 45 с.
21. Василенко В. Н., Назаров И. М. и др. Мониторинг загрязнения снежного покрова. — Л.: Гидрометеоздат, 1985. — 181 с.
22. Александрова Е. А. и др. Аэротехногенное загрязнение природной среды под воздействием комбината Североникель: сб. статей участников зимних студенческих экспедиций "Исследования молодых географов" / под ред. Савоскула М. С., Фролова Н. Л. — М., 2022. С. 129—137.

The state of the environment in the area of influence of copper-nickel combine "Severonickel"

E. L. VOROBIEVSKAYA, A. V. EVSEEV, N. B. SEDOVA, M. V. SLIPENCHUK
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The article analyzes the heavy metal pollution of the environment in the area of influence of the copper-nickel combine "Severonickel" (Monchegorsk, Murmansk Oblast), where an acute ecological situation has been observed for many years. To detect pollution in winter, natural indicators such as snow cover and sphagnum moss were used. The analysis showed that, as before, the plant continues to have a significant impact on the environment, although with a much lower intensity. The maximum pollution is noted in the vicinity of the combine Monchegorsk (within a radius of 5 km from the industrial site) and in the city of Monchegorsk itself. Among the main pollutants are copper, nickel and zinc. In the overwhelming majority of sampling points the content of other heavy metals in snow (chromium, cadmium, cobalt, lead) did not exceed the background ones. The data of bryoinidication studies confirm the high level of environmental pollution in the vicinity of the copper-nickel plant, and also indicate the spread of pollutants at a considerable distance from it (up to 35—40 km).

Keywords: state of the environment, Monchegorsk, heavy metal pollution, metallurgical production.

Bibliography — 22 references.

Received February 15, 2023

УДК 631.423

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_2_59

EDN: DOFQMC

Содержание тяжелых металлов в почвах агроэкосистем зоны воздействия предприятий Липецкой промышленной агломерации

Д. Н. КУРБАКОВ; В. К. КУЗНЕЦОВ, д-р биол. наук; Е. В. СИДОРОВА;
Н. В. НОВИКОВА; А. В. САРУХАНОВ; Н. В. ДЕМЕНТЬЕВА

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»,
г. Обнинск, Калужская обл., Россия

Изучены закономерности накопления и распределения тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных угодий и целинных участков зоны воздействия предприятий Липецкой промышленной агломерации. Установлено, что наибольшее количество тяжелых металлов сосредоточено в целинных почвах ближней зоны (2–5 км) в слоях 0–2 и 2–5 см, содержание которых в 1,9–10 раз выше, чем в материнской породе. Содержание тяжелых металлов в пахотных почвах во всех случаях не превышает ПДК. При этом какой-либо определенной закономерности пространственного распределения тяжелых металлов в почвах средней (7–15 км) и дальней (15–30 км) зон не выявлено.

Ключевые слова: почва, сельскохозяйственные угодья, промышленные предприятия, тяжелые металлы.

Экологическая обстановка в сфере сельскохозяйственного производства определяется интенсивностью воздействия деятельности человека. Выбросы загрязняющих веществ и, особенно, тяжелых металлов (ТМ) в атмосферу от транспорта и промышленных предприятий распространяются на прилегающую территорию, являясь одними из основных источников техногенного загрязнения почв сельскохозяйственных угодий [1]. Загрязнение почвенного покрова тяжелыми металлами отмечено практически во всех промышленно развитых областях России и особенно на территориях, прилегающих к крупным промышленным агломерациям, где расположены предприятия машиностроения, металлургического и химического производства [2]. Крупным источником загрязнения является Липецкая промышленная агломерация (ЛПА), в состав которой входят ПАО "Новолипецкий металлургический комбинат" (НЛМК), металлургический завод ООО "Липецкая трубная

компания "Свободный сокол", ОАО "Липецкий тракторный завод" (ЛТЗ), ЗАО "Липецкий цементный завод". На Липецкую область в 2021 г. приходилось наибольшее количество загрязняющих веществ от стационарных источников загрязнения в Центральном федеральном округе — 1593,6 тыс. т/год или более 68,5 % от общего объема выбросов в регионе [3]. В зоне воздействия промышленной агломерации основным видом загрязнения агроэкосистем является поступление ТМ, которые составляют от 70 до 95 % от всех техногенных источников загрязнения области.

Радиус воздействия промышленных предприятий изменяется от высоты выбросов, рельефа, природных особенностей территории, ветрового режима и достигает десятков километров [4]. Основная масса выбросов оседает вблизи источника загрязнения, быстро поступает на поверхность почвы и растений, выносятся и мигрируют с поверхностным и грунтовым стоком. При этом загрязнение окружающей среды вокруг предприятий черной металлургии в зависимости от господствующих ветров может ощущаться в радиусе до 50 км, а количество пыли на 1 м² прилегающей территории достигает 5 кг/сут [5, 6]. В результате выпадений образуются техногенные геохимические районы тяжелых металлов, происходит изменение компонентов природной среды, что обуславливает необходимость регулярного контроля и анализа содержания токсичных химических веществ в атмосфере, почвенном и растительном покрове.

Целью проводимых исследований является оценка загрязнения почв тяжелыми металлами предприятиями Липецкой промышленной агломерации на разном расстоянии и направлении от основных источников загрязнения.

Курбаков Дмитрий Николаевич, научный сотрудник.

E-mail: kurbakov007@gmail.com

Кузнецов Владимир Константинович, заведующий лабораторией.

E-mail: vkuzn@yandex.ru

Сидорова Елена Валентиновна, научный сотрудник.

E-mail: sidelena@yandex.ru

Новикова Наталья Васильевна, младший научный сотрудник.

E-mail: N7K7N7@yandex.ru

Саруханов Артем Владимирович, младший научный сотрудник.

E-mail: mrrino2008@mail.ru

Дементьева Наталья Викторовна, руководитель лаборатории.

E-mail: nva2803@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 4 апреля 2023 г.

© Курбаков Д. Н., Кузнецов В. К., Сидорова Е. В., Новикова Н. В., Саруханов А. В., Дементьева Н. В., 2023

Методика проведения исследований

Полевые исследования проводили на сельскохозяйственных угодьях и целинных участках, входящих в 30-км зону воздействия Липецкой промышленной агломерации на разном удалении и разных направлениях от основных предприятий в 2017 и 2022 гг. Отбор проб почв проводили в соответствии с методическими рекомендациями по выявлению деградированных и загрязненных земель по 8 румбам с шагом 1—5 км [7]. Отбор точечных проб на каждом поле проводили почвенным буром по 2-м диагоналям. Смешанный образец составлялся из не менее чем 10—15 индивидуальных образцов, равномерно размещенных на участке. Индивидуальные пробы объединяли, тщательно перемешивали, затем брали смешанный образец весом не менее 0,5 кг. Глубина отбора индивидуальных и смешанных проб на пахотных угодьях составляла 0—20 см, а на природных сенокосах и пастбищах отбирали слой 0—10 см [8]. В качестве фоновых проб использовали образцы почв, отобранных на расстоянии более 30 км (рисунок).

Для изучения вертикальной миграции ТМ были заложены разрезы до глубины 120 см. Из каждого разреза проводили отбор почвенных проб по генетическим горизонтам и разным слоям почв в целях изучения распределения ТМ в почвенном профиле и влияния на этот процесс техногенного загрязнения.

Определение тяжелых металлов в почве проводили с использованием атомно-абсорбционного плазменного спектрометра "Sequential ICP AES Liberty AX Varian".

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты исследований показали, что содержание тяжелых металлов сосредоточено в основном в верхнем 0—40 см слое почвы и с глубиной их содержание снижается. Минимальное содержание элементов находится в материнской породе С (табл. 1). В связи с этим подстилающие породы не могут быть источниками загрязнения верхних слоев почвы.

Для целинных природных участков и многолетних лугов вблизи предприятий Липецкой промышленной агломерации характерна выраженная аккумуляция тяжелых металлов в верхних слоях почвы (табл. 2). При этом основное количество тяжелых металлов сосредоточено в слоях 0—2 и 2—5 см, содержание которых в 1,9—10 раз выше, чем в материнской породе (слой 100—120 см). Из полученных данных можно заключить, что основная часть загрязнения поступала аэральным путем в течение многих лет и сосредоточена в верхнем 10 см слое почвы.

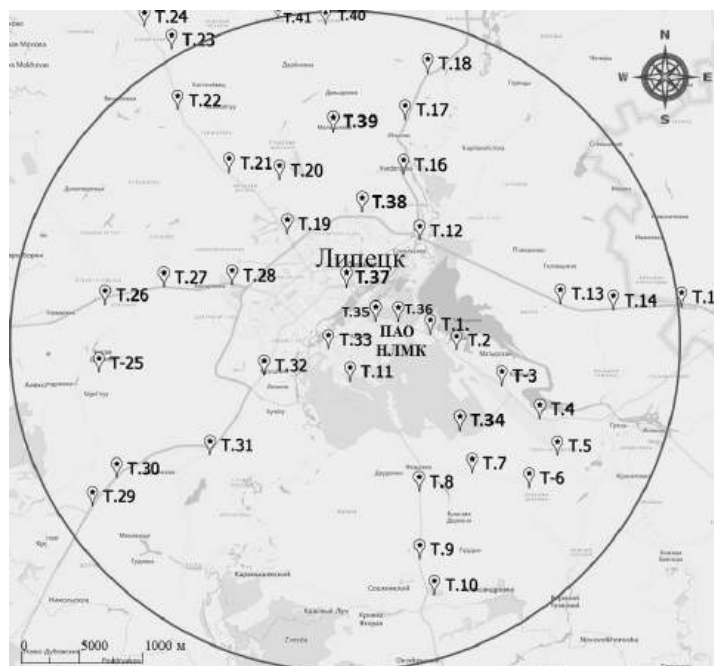


Схема отбора проб почвы на разном расстоянии и направлении от Липецкой промышленной агломерации

Таблица 1

Распределение ТМ по профилю чернозема выщелоченного тяжелосуглинистого, расположенного в с. Большая Кузьминка (15 км к северу от металлургического завода "Свободный Сокол")

Горизонт, см	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Fe	Zn
A (0—40)	0,26	6,5	19,5	10,0	16,8	8,5	13036	32,3
AB (40—60)	0,21	6,5	18,7	8,4	17,1	7,5	11322	28,0
B (65—75)	0,19	5,8	17,9	8,6	15,4	6,5	7289	23,9
BC (80—95)	0,18	5,7	17,1	8,4	15,6	5,7	1254	23,1
C (110—120)	0,16	5,5	17,0	8,2	15,7	5,8	980	22,7

Таблица 2

Содержание тяжелых металлов в профиле целинного выщелоченного чернозема в 2 км к юго-востоку от Липецкого тракторного завода, мг/кг

Слой почвы, см	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
0—2	2,0	13,7	52,3	33,1	37,7	27,1	115,3
2—5	1,6	14,1	57,1	27,4	43,4	31,5	121,4
5—10	1,2	8,2	27,5	14,3	16,5	16,0	59,0
10—20	0,7	8,1	21,1	13,2	14,3	11,1	31,2
20—40	0,4	8,0	20,3	12,1	13,7	9,1	27,5
40—60	0,3	7,7	20,2	12,3	13,8	8,2	26,4
60—80	0,2	7,5	20,1	12,2	13,9	8,0	25,0
80—100	0,2	7,5	19,7	11,8	14,0	7,9	25,2
100—120	0,2	7,4	19,8	12,0	13,7	7,8	25,0

В результате механической обработки происходит перемешивание тяжелых металлов в пахотных почвах, что приводит к равномерному распределению их концентраций в слоях 0—20 см. При этом большинство сельскохозяйственных угодий находится на значительном удалении от основных промышленных предприятий, в связи с чем достаточно сложно оценить накопление тяжелых металлов в пахотных горизонтах в зависимости от степени удаленности от источников

загрязнения. Вместе с тем отбор проб на бывших дачных участках южного направления вблизи Липецкого тракторного завода показал, что содержание Cd, Ni, Pb, Cr и Zn в верхних слоях почв в 1,5—3,5 раза больше, чем на расстоянии 15—20 км (табл. 3). В дальнейшем характер распределения тяжелых металлов существенно различается в зависимости от направления, вида предприятий и подстилающей поверхности, влияющей на процессы переноса газопылевых выбросов.

Таблица 3

Содержание тяжелых металлов в почве в зависимости от направления и расстояния от основных предприятий ЛПА, 2017—2022 гг.

№ пробы	Расстояние, км	Содержание тяжелых металлов, мг/кг									
		Cd	Co	Cu	Ni	Pb	Cr	Zn	Fe	Mn	
Восток											
T.35	2	0,35	7,5	22,3	26,5	29,8	50,4	99,1	18781	708	
T.36	5	0,12	2,5	6,9	4,1	4,4	3,5	18,9	3984	175	
T.1	8	0,30	5,5	15,9	6,9	9,8	31,6	37,3	14523	503	
T.2	10	0,30	5,8	8,5	6,0	7,7	30,4	23,3	1515	360	
T.13	20	0,21	4,8	7,5	12,2	5,0	17,3	24,9	6771	351	
Юго-восток											
T.34	10	0,19	4,2	11,2	14,3	6,5	8,2	20,4	5825	283	
T.3	15	0,27	2,2	12,3	14,1	8,3	6,0	22,8	4825	230	
T.7	16	0,13	6,0	8,7	15,8	7,2	18,3	24,9	9346	422	
T.4	19	0,11	4,5	7,3	10,9	6,0	11,3	24,6	7184	236	
T.6	21	0,34	2,5	3,4	5,6	3,1	6,0	11,9	2705	206	
T.5	22	0,30	3,3	5,2	7,4	5,0	8,7	15,8	6477	203	
Юг											
T.11	3	0,34	6,4	9,5	45,3	34,9	20,4	61,7	13231	348	
T.8	15	0,15	5,9	9,7	12,9	16,6	13,5	30,6	8086	491	
T.9	20	0,15	3,2	18,9	15,8	17,5	11,3	35,6	16137	230	
T.10	24	0,22	2,8	18,6	8,0	11,4	5,2	15,6	1728	195	
Юго-Запад											
T.31	15	0,26	6,1	14,6	16,1	8,2	16,4	32,4	9663	336	
T.30	23	0,21	9,0	13,9	24,1	11,9	20,5	36,0	13207	476	
T.29	27	0,27	8,3	13,0	21,5	11,3	20,3	33,7	12794	457	
Север											
T.37	5	0,33	9,8	9,2	19,8	19,1	24,6	42,2	21254	445	
T.38	11	0,25	10,6	13,8	27,8	12,2	24,5	42,8	14331	524	
T.20	15	0,28	9,8	11,8	26,4	0,5	7,8	45,9	1528	537	
T.39	20	0,16	6,9	9,2	21,4	19,8	23,2	39,9	22018	551	
T.40	27	0,16	6,1	8,6	19,8	19,4	21,2	42,0	18350	353	
T.41	30	0,11	6,7	9,4	19,4	17,8	24,6	37,1	14077	488	
Северо-восток											
T.12	11	0,21	5,6	14,7	26,7	9,2	16,8	35,0	16271	366	
T.16	16	0,16	7,4	12,9	28,5	13,2	15,8	36,9	11319	429	
T.17	21	0,20	8,4	10,4	20,4	9,6	19,2	38,3	12161	466	
T.18	25	0,22	10,0	12,8	25,2	11,4	23,5	38,2	14125	539	
Запад											
T.33	7	0,20	9,1	13,0	24,5	9,6	21,3	33,2	10716	456	
T.32	22	0,20	9,1	11,3	23,6	10,6	21,2	33,6	12286	444	
T.25	33	0,21	8,5	13,5	22,3	14,9	25,7	29,4	14343	482	
Северо-Запад											
T.28	11	0,22	9,3	13,2	23,8	11,7	24,8	37,2	14757	505	
T.27	16	0,19	8,7	9,3	20,5	9,3	17,3	27,5	9935	447	
T.21	18	0,26	10,1	14,6	26,8	12,2	26,2	44,2	17115	525	
T.26	21	0,21	9,2	12,5	25,7	9,92	24,8	35,1	12431	597	
T.22	25	0,22	8,8	15,9	22,2	11,9	21,3	39,6	16163	488	
T.23	30	0,20	8,3	9,9	20,9	8,90	20,0	26,1	11512	352	

В восточном направлении залежные угодья непосредственно примыкают к промышленной площадке агломерационной фабрики Новолипецкого металлургического комбината. По розе ветров это направление является преобладающим для распространения загрязняющих веществ.

В этом направлении максимальные значения всех изученных тяжелых металлов выявлены в почве залежных земель на расстоянии 2 км от агломерационной фабрики, а с дальнейшим увеличением расстояния до 5 км содержание ТМ в почве снижается (табл. 3). Данный факт можно объяснить тем обстоятельством, что наиболее тяжелые фракции промышленных выбросов выпадают вблизи промышленных предприятий [9], а за счет эффекта теневого воздействия высоты трубы на распространение аэрозольных выпадений происходит снижение накопления тяжелых металлов в почве прилегающей территории. Кроме того, на данных участках наблюдаются различия в гранулометрическом составе почв, что может оказывать влияние на динамику содержания макро- и микроэлементов, в том числе и тяжелых металлов в зоне наблюдения, так как уменьшение глинистой фракции обуславливает и уменьшение микро- и макроэлементного состава почвенно-поглощающего комплекса.

В юго-восточном и южном направлениях основные сельскохозяйственные угодья расположены на расстоянии примерно 10 км от крупных промышленных предприятий, которыми являются Липецкий тракторный завод и НЛМК. Примыкающее к ним пространство занято крупным лесным массивом. Почвы этих полей содержат сопоставимое с восточными угодьями количество тяжелых металлов.

В северном, северо-восточном и северо-западном направлениях пробы почвы отбирали на расстоянии от 5 до 30 км. В северо-восточном направлении ближайшие сельскохозяйственные угодья расположены

на расстоянии примерно 11 км, а прилегающая к заводу "Свободный Сокол" территория занята лесом и Матырским водохранилищем. Результаты исследований показали, что содержание ТМ в почве сельскохозяйственных угодий на этих направлениях по своим значениям сравнимы с аналогичными показателями пахотных почв восточного направления.

В настоящее время разработана градация эколого-токсикологической оценки почв по содержанию валовых форм некоторых тяжелых металлов в зависимости от кислотности и гранулометрического состава (табл. 4). В качестве предельно допустимой концентрации (ПДК) ТМ в почвах принято считать верхний предел содержания химических элементов во 2-й группе загрязненности. Почвы, отнесенные к первым трем группам агроэкологической оценки, пригодны для возделывания всех сельскохозяйственных культур, однако на почвах, отнесенных к третьей группе, вся продукция растениеводства должна систематически контролироваться на содержание тяжелых металлов. Почвы, относящиеся к зонам чрезвычайной (4-я группа) и катастрофической (5-я группа) экологической ситуации, пригодны для возделывания только технических культур по специальной технологии.

Предприятия Липецкой промышленной агломерации расположены в южной природно-сельскохозяйственной зоне. Основным типом почв являются выщелоченные средне- и тяжелосуглинистые черноземы, на долю которых приходится более 90 % площади. Вместе с тем имеет место проявление пятнистого характера гранулометрического состава почв, выражающегося в чередовании почв легкого и среднесуглинистого мехсостава. В среднем по Липецкой обл. обменная кислотность почв сельскохозяйственных угодий (pH_{KCl}) составляет 5,4, при этом 35% почв угодий имеют pH более 5,5, что позволяет отнести их к группе нейтральных или близких к нейтральным [11].

Таблица 4

Группировка почв по валовому содержанию тяжелых металлов, мг/кг [10]

Элемент	Группы почв и градации уровней загрязненности				
	1-я	2-я	3-я	4-я	5-я
Почвы песчаного и супесчаного гранулометрического состава					
Pb	<16,0	16,0—32,0	32,1—64,0	64,1—96,0	>96
Zn	<27,0	27,1—55,0	55,1—110	110,1—165	>165
Cd	<0,25	0,25—0,5	0,6—1,0	1,1—1,5	>1,5
Cu	<16,0	16,1—33,0	33,1—165	165,1—330	>330
Ni	<10,0	10,1—20,0	20,1—100	100,1—200	>200
Cr ³⁺	<50	50,0—100	101,0—500	500,1—1000	>1000
Почвы суглинистого и глинистого гранулометрического состава pH менее 5,5					
Pb	<32	32—65	66—130	131—195	>195
Zn	<55	55—100	111—220	221—330	>330
Cd	<0,5	0,5—1,0	1,—2,0	2,1—3,0	>3
Cu	<33	33—66	67—330	331—660	>660
Ni	<20	20—40	41—200	201—400	>400
Почвы суглинистого и глинистого гранулометрического состава с pH более 5,5					
Pb	<65	65—130	130—260	261—390	>390
Zn	<110	110—220	221—400	401—660	>660
Cd	<1,0	1,0—2,0	2,1—4,0	4,1—6,0	>6
Cu	<66	66—132	133—660	661—1320	>1320
Ni	<40	40—80	81—400	401—800	>800

Обследование сельскохозяйственных угодий, находящихся в зоне возможного воздействия выбросов ПАО "НЛМК", в 2017 и 2022 гг. показало, что содержание ТМ в пахотных почвах во всех случаях не превышает ПДК. Содержание тяжелых металлов в почве в большинстве случаев соответствует нормативным значениям 1-й группы и нижней границы 2-й группы суглинистых почв с $pH < 5,5$ (табл. 4). С точки зрения уровней содержания тяжелых металлов в почвах нет опасности производства сельскохозяйственной продукции с превышением нормативов. Вместе с тем наблюдаемое в ближней зоне накопление тяжелых металлов в верхних слоях почв целинных участков обуславливает необходимость контроля за процессами распределения и поведения химических загрязнителей в системе почва—растение.

Заключение

В результате исследований, целью которых являлась оценка степени воздействия выбросов предприятий Липецкой промышленной агломерации на загрязнение почв, установлено, что накопление тяжелых металлов в почвенном покрове обуславливается комплексом факторов, среди которых наиболее важными являются: вид предприятия, мощность и характер производственной деятельности, расстояние и направление от источников загрязнения, подстилающая поверхность и специфика распространения аэрозольных выбросов в атмосфере, свойства почвенного покрова. Максимальное содержание тяжелых металлов в почве наблюдается вблизи промышленных предприятий (до 5 км). С увеличением расстояния в ряде случаев происходит снижение содержания Cd, Ni, Pb, Cr и Zn в верхних слоях почв в 1,5—3,5 раза относительно пахотных угодий на дистанции 15—20 км. При этом какой-либо определенной закономерности пространственного распределения тяжелых металлов в почвах средней (7—15 км) и дальней (15—30 км) зон не выявлено. Содержание ТМ в пахотных почвах во всех случаях не превышает ПДК.

На целинных участках ближней зоны (2—5 км) наблюдается выраженная аккумуляция тяжелых ме-

таллов в верхних слоях почвы. При этом основное количество тяжелых металлов сосредоточено в слоях 0—2 и 2—5 см, содержание которых в ряде случаев в 1,9—10 раз выше, чем в материнской породе (слой 100—120 см).

Установленные особенности накопления и распределения тяжелых металлов в почвах пахотных угодий и целинных участков определяют необходимость мониторинга за содержанием химических загрязнителей в почвенно-растительном покрове района расположения предприятий Липецкой промышленной агломерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Санжарова Н. И., Цыгвинцев П. Н., Анисимов В. С. и др. Тяжелые металлы в агроценозах: миграция, действие, нормирование / под ред. Санжаровой Н. И., Цыгвинцева П. Н. — Обнинск: ФГБУ ВНИИАЭ, 2019. — 398 с.
2. Санжарова Н. И., Кузнецов В. К., Исамов Н. Н. и др. Методы организации и ведения агроэкологического мониторинга сельскохозяйственных угодий в зонах техногенного загрязнения и оценка экологической обстановки в сельском хозяйстве в регионах размещения атомных электростанций и аварий ЧАЭС / под ред. Санжаровой Н. И. — Обнинск: ВНИИАЭ, 2010. — 276 с.
3. Государственный доклад "О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. — М.: Минприроды России. МГУ им. М. В. Ломоносова, 2022. — 684 с.
4. Безкопальный И. Н. Некоторые методические подходы к изучению воздействия факторов окружающей среды на здоровье населения в зоне территориально-производственного комплекса // Гигиеническая санитария. 1984. № 11. С. 24—27.
5. Metals and the environment // Swedish Environ. Protect. Agency. 1993. Report 4245, 185 p.
6. Курбаков Д. Н., Кузнецов В. К., Сидорова Е. В., Саруханов А. В., Деметиева Н. В., Новикова Н. В. Сравнительная оценка загрязнения тяжелыми металлами снежного покрова предприятиями черной металлургии // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 8. С. 59—65.
7. Методические рекомендации по выявлению деградированных и загрязненных земель. — М.: Кодекс, 1995. — 28 с.
8. ГОСТ 17.4.3.01-2017 Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. — М.: Стандартинформ, 2018. — 5 с.
9. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 272 с.
10. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. — М.: АО "Кодекс", 2021. — 1025 с.
11. Сискевич Ю. И. Агрохимический мониторинг при кадастровой оценке пахотных земель в зонах интенсивного земледелия: дис. на соиск. уч. ст. канд. геогр. наук: Землеустройство, кадастр и мониторинг земель (25.00.26). — Воронеж, ВГПУ, 2007. — 22 с.

The content of heavy metals in the soils of agroecosystems of the zone of influence of enterprises of the Lipetsk industrial agglomeration

D. N. KURBAKOV, V. K. KUZNETSOV, E. V. SIDOROVA, N. V. NOVIKOVA,
A. V. SARUKHANOV, N. V. DEMENTIEVA

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Kaluga region, Russia

The regularities of accumulation and distribution of heavy metals in the soils of agricultural lands and virgin areas of the impact zone of enterprises of the Lipetsk industrial agglomeration have been studied. It was found that the largest amount of heavy metals is concentrated in virgin soils of the near zone (2—5 km) in layers 0—2 and 2—5 cm, the content of which is up to 10 times higher than in the parent rock. The content of heavy metals in arable soils in all cases does not exceed the MPC. At the same time, no definite pattern of spatial distribution of heavy metals in the soils of the middle (7—15 km) and distant (15—30 km) zones has been revealed.

Keywords: soil, agricultural land, industrial enterprises, heavy metals.

Bibliography — 11 references.

Received April 4, 2023

Экология промышленного производства: Межотр. науч.-практ. журнал / ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2023. Вып. 2. С. 1—64.

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

Подписано в печать 22.05.2023.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 7,4. Уч.-изд. л. 7,6.

Тираж 250 экз. Заказ 2015.

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.