

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»

ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

**ПРИКЛАДНАЯ ЭКОЛОГИЯ.  
УРБАНИСТИКА**

---

BULLETIN OF THE PERM NATIONAL  
RESEARCH POLYTECHNIC UNIVERSITY  
**APPLIED ECOLOGY.  
URBAN DEVELOPMENT**

№ 2 (34)

Издательство  
Пермского национального исследовательского  
политехнического университета  
2019

Освещаются экологические аспекты градостроительства и территориального планирования, архитектурного проектирования во взаимосвязи с проблемами обеспечения техносферной безопасности, сохранения качества городской среды и процессами общественного развития.

Журнал ориентирован на широкий круг специалистов в области проектирования территориальных поселений, городского хозяйства, градостроительной экологии и экономики, социально-экономических сфер деятельности, а также молодых ученых и студентов.

#### Редакционная коллегия

Главный редактор *Я.И. Вайсман*, д-р мед. наук, проф. кафедры «Охрана окружающей среды» ПНИПУ

Ответственный

секретарь

*Г.М. Батракова*, д-р техн. наук, проф. кафедры «Охрана окружающей среды» ПНИПУ

#### Члены редколлегии

*И.С. Глушанкова* (ПНИПУ)

*Г.Г. Кашеварова* (ПНИПУ)

*В.Н. Коротаев* (ПНИПУ)

*С.В. Максимова* (ПНИПУ)

*А.Б. Пономарев* (ПНИПУ)

*Л.В. Рудакова* (ПНИПУ)

*О.И. Ручкина* (ПНИПУ)

*И.М. Бернадина* (НИУ «Московский энергетический институт», г. Москва)

*Я.В. Казаков* (Северный (Арктический) Федеральный университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск)

*А.В. Кочетков* (Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов)

*И.В. Май* (ФГУН «ФНЦ медико-профилактических технологий управления рисками здоровья населения» Роспотребнадзора, г. Пермь)

*Н.Г. Максимович* (Естественнонаучный институт ПГНИУ, г. Пермь)

*Л.Н. Ольшанская* (Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов)

*К.Л. Чертес* (Самарский государственный технический университет, г. Самара)

*А.Н. Чусов* (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)

*Б.Е. Шенфельд* (ФГУ УралНИИ «Экология», г. Пермь)

*Г.Г. Ягафарова* (Уфимский нефтяной технический университет, г. Уфа)

*Дидье Ванкутсем* (Свободный университет Брюсселя, Бельгия)

*Гинтарас Денафас* (Технологический университет Каунаса, Литва)

*Кристоф Вюни* (Институт управления отходами и экономики замкнутого цикла, Дрезденский технический университет, Германия)

*Марко Ритцковски* (Гамбургский технический университет, Германия)

*Пиотр Збигнев Лоренц* (Гданьский университет технологии, Польша)

*Сандро Парринелло* (Факультет инженерного дела Павийского университета, Италия)

Журнал входит в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (письмо Департамента аттестации научных и научно-педагогических работников от 01.12.2015 №13-6518).

Журнал «Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика» зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), свидетельство ПИ № ФС77-59186 от 3.09.2014 г. Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» – 45008.

Периодическое печатное издание

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Адрес учредителя, издателя и редакции: 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский просп., д. 29.

Тел. (342) 2-391-482, e-mail: [vestnik.urbanistics@gmail.com](mailto:vestnik.urbanistics@gmail.com)

## СОДЕРЖАНИЕ

---

### **Ресурсосберегающие технологии**

*Ф.Х. Хакимова, О.А. Носкова, Е.А. Глезман, В.А. Житнюк,*

*М.Н. Спасенников, К.А. Синяев*

Вариант утилизации древесных отходов от подготовки технологической щепы для получения полуцеллюлозы ..... 5

### **Обращение с отходами производства и потребления**

*О.Н. Калинин*

Природоохранное обоснование ресурсосберегающей технологии совместной переработки компонентов твердых бытовых отходов и отходов коксохимических предприятий ..... 22

*М.С. Дьяков*

Стратегия обращения с твердыми отходами коммунальных очистных сооружений ..... 35

*Е.С. Чиглинцева, Л.З. Тельцова, З.Б. Бактыбаева, Г.Ф. Габидуллина, А.А. Назарова*

Механическая обработка полиэтилентерефталата из состава твердых коммунальных отходов ..... 49

### **Геоэкологические аспекты функционирования природно-технических систем**

*Т.В. Зазнобина, О.В. Иванова, Е.В. Алхименко*

Содержание тяжелых металлов в почвах пригородной зоны г. Красноярск ..... 59

*В.А. Голяткина, И.В. Могилевская, О.В. Колотова, Т.Е. Яшкина,*

*Е.А. Карасев, И.А. Голяткин*

Разработка биосорбента на основе карбонизата для очистки природных и сточных вод от нефтезагрязнений ..... 69

### **Экология в химии и нефтехимии**

*Л.А. Николаева, А.Н. Хуснутдинов*

Очистка коксового газа от сероводорода гранулированным карбонатным шламом ..... 81

*Л.Н. Ольшанская, Е.А. Татаринцева, М.А. Чернова, А.А. Тареева*

Магнитосорбенты на основе отходов стальной окалины для удаления разливов нефтепродуктов ..... 92

### **Комплексная оценка влияния промышленных объектов на природные системы**

*И.Р. Рахматуллина, З.З. Рахматуллин, Ф.Ф. Исхаков, О.В. Серова*

Динамика вегетационного индекса NDVI насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*) в условиях загрязнения уфимского промышленного центра ..... 106

*Д.В. Макаров, Е.А. Кантор, Р.Н. Вострова*

Применение статистических методов анализа в мониторинге содержания мутности скважинных вод юго-восточного региона Беларуси ..... 118

**Требования к материалам, представляемым к публикации ..... 128**

## CONTENTS

---

<i>F. Khakimova, O. Noskova, E. Glezman, V. Zhitnyuk, M. Spasennikov, K. Sinyaev</i> An Option of Utilization of Waste Wood from the Preparation of Technological Chips for Semi-chemical Pulp Production.....	5
<i>O. Kalinihin</i> Environmental Justification of a Resource-saving Technology of Joint Processing of Components of Municipal Solid Waste and Waste of By-product Coking Industry .....	22
<i>M. Dyakov</i> Strategy of Handling of Municipal Wastewater Treatment Facilities Sewage Sludge .....	35
<i>E. Chiglintseva, L. Teltsova, Z. Baktybaeva, G. Gabidullina, A. Nazarova</i> Mechanical Processing of Polyethylene Terephthalate from the Composition of Municipal Solid Waste.....	49
<i>T. Zaznobina, O. Ivanova, E. Alkhimenko</i> Heavy Metals Content in the Soils of Suburban Areas of the City of Krasnoyarsk .....	59
<i>V. Golyatkina, I. Mogilevskaya, O. Kolotova, T. Yashkina,</i> <i>E. Karasev, I. Golyatkin</i> Development of a Biosorbent Based on Carbonated Coal for Purifying Natural and Waste Water from Oil Pollution .....	69
<i>L. Nikolaeva, A. Khusnutdinov</i> Purification of Coke Gas of Hydrogen Sulphide With Granulated Carbonate Slime .....	81
<i>L. Olshanskaya, E. Tatarintseva, M. Chernova, A. Tareeva</i> Magnet Sorbents Based on Steel Scale Waste to Remove Petroleum Spills .....	92
<i>I. Rahmatullina, Z. Rahmatullin, F. Iskhakov, O. Serova</i> Dynamics of the NDVI Vegetation Index of Pine Forest Plantations ( <i>Pinus sylvestris L.</i> ) under Pollution in Industrial Center of Ufa .....	106
<i>D. Makarov, E. Kantor, R. Vostrova</i> Application of Statistical Methods of Analysis for Monitoring of the Content of Turbidity of Supply Wells' Waters in the South-eastern Region of Belarus.....	118

DOI 10.15593/2409-5125/2019.02.01

УДК 676.163.4

**Ф.Х. Хакимова, О.А. Носкова, Е.А. Глезман,  
В.А. Житнюк, М.Н. Спасенников, К.А. Синяев**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

### **ВАРИАНТ УТИЛИЗАЦИИ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ ОТ ПОДГОТОВКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЩЕПЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛУЦЕЛЛЮЛОЗЫ**

Работа направлена на решение актуальной проблемы – повышение комплексности использования древесного сырья путем утилизации отходов переработки древесины на целлюлозно-бумажных предприятиях. Объект исследования – березовые опилки, образующиеся в процессе подготовки технологической щепы для варки полуцеллюлозы.

Работа выполнена применительно к условиям Пермского ЦБК (ПЦБК). Исследовано получение нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы по непрерывной и периодической технологии. Варки проводили с производственным варочным раствором ( $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{NaOH}$  или  $\text{NH}_4\text{OH}$ ). Операции и условия непрерывной технологии соответствовали применяемым в настоящее время на предприятии при получении полуцеллюлозы на установке «Дефибратор».

Показано, что древесные отходы (опилки из березовой древесины) ПЦБК могут служить сырьем для получения нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы как по непрерывной, так и по периодической технологии. Процесс получения полуцеллюлозы трудностей не вызывает. Показатели качества получаемой полуцеллюлозы при оптимальных (по результатам исследований) условиях при выходе 75 % соответствуют показателям полуцеллюлозы ПЦБК из технологической щепы.

В процессе работы испытан и предлагается способ периодической варки нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы по сокращенному режиму без промежуточной стоянки для пропитки опилок.

Получены два образца нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы из березовых опилок ПЦБК, которые испытаны в исследовательской лаборатории предприятия на пригодность использования их в композиции бумаги для гофрирования и картона. Показано, что опытный

---

Вариант утилизации древесных отходов от подготовки технологической щепы для получения полуцеллюлозы / Ф.Х. Хакимова, О.А. Носкова, Е.А. Глезман, В.А. Житнюк, М.Н. Спасенников, К.А. Синяев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2019. – № 2. – С. 5–21. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.01

Khakimova F., Noskova O., Glezman E., Zhitnyuk V., Spasennikov M., Sinyayev K. An Option of Utilization of Waste Wood from the Preparation of Technological Chips for Semi-chemical Pulp Production. PNRPU. Applied Ecology. Urban Development. 2019. No. 2. Pp. 5-21. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.01

полуфабрикат из березовых опилок имеет высокие прочностные показатели и с успехом может быть применен в композиции бумаги для гофрирования и картона ПЦБК без снижения их прочностных характеристик.

**Ключевые слова:** древесные отходы, утилизация, нейтрально-сульфитная варка, полуцеллюлоза, размол, механические показатели, опытные испытания, композиция массы, бумага для гофрирования, картон.

Россия – одна из ведущих стран по объему заготавливаемой древесины, которая применяется в лесоперерабатывающей, целлюлозно-бумажной и гидролизной промышленности и экспортируется. При существующих способах переработки древесного сырья в целом по России используется около половины биомассы дерева [1].

Объем древесных отходов в стране чрезвычайно велик. Большие потери приходится на опилки и стружки – отходы лесопиления и подготовки древесины в производстве целлюлозы.

В лесопильном производстве количество опилок составляет примерно 10 % от объема распиливаемых круглых лесоматериалов, в подготовке древесины для получения полуфабрикатов бумажного производства – от 5 до 10 % [2].

Одна из главных задач лесной отрасли – сокращение отходов производства древесины и их переработка, уменьшение потерь от несовершенства технологий. Рациональное использование древесного сырья, вторичное использование древесных отходов, переориентация производства на ресурсосберегающий путь развития – все это видится важнейшим направлением развития отрасли, поскольку такие природные ресурсы, как леса, восстанавливаются медленно и с большим трудом [3].

Решению данной задачи отвечает комплексное использование древесного сырья, включающее максимальную утилизацию отходов лесозаготовок и переработки древесного сырья.

Для уменьшения количества отходов необходимо снижать их образование в процессе производства и потребления, внедрять ресурсосберегающие технологии, эффективно проводить рециклинг отходов, осуществлять комплексное управление отходами. Данная система управления нацелена на снижение вредного воздействия отходов на здоровье человека, компоненты окружающей среды, а также сохранение природных ресурсов.

Любые отходы можно рассматривать в качестве вторичных материальных ресурсов, причем главной особенностью таких ресурсов является их постоянная воспроизводимость в процессе материального и промышленного производства [3, 4].

В целлюлозно-бумажной промышленности значительную часть отходов переработки древесины составляют опилки, образующиеся при подготовке древесины для получения полуфабрикатов бумажного производства. Из всех кусковых древесных отходов опилки считаются самыми малоценными, однако они являются технологическим сырьем для целого ряда производств, их широко используют во всем мире в качестве топлива [5, 6]. Исследования в области полезного использования опилок и стружек ведутся не один десяток лет, однако проблема рационального использования древесных отходов сохраняет свою актуальность [5, 7, 8].

Важнейшим моментом ресурсосбережения, способствующим комплексному использованию древесного сырья, является сохранение от вырубок большей части лесных массивов, что позволяет также значительно улучшить ситуацию в экологической составляющей лесной отрасли [8, 9].

Идеальным считается стремление предприятий к безотходному производству, т.е. к возможно полному и рациональному использованию вовлекаемого в переработку древесного сырья, и отсутствию вредного воздействия на окружающую среду. К сожалению, в целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности России такие производства отсутствуют [9, 10].

Уровень потребления странами Запада бумажной продукции постоянно растет, что приводит к увеличению потребности в традиционном древесном сырье. За рубежом в последние десятилетия пристальное внимание уделяется проблеме утилизации древесных отходов и увеличению использования ресурсов биомассы древесины, что естественно и связано с ростом потребности в лесопродукции, а также с дефицитом и высокой стоимостью первичного сырья в виде стволовой древесины [11].

Замена первичного сырья (стволовой древесины) древесными отходами имеет наряду с экономическим и экологическое преимущество, за счет предотвращения ущерба, наносимого окружающей среде при неиспользовании отходов [4, 12].

Одним из основных потребителей древесных отходов в виде стружки и опилок является плитное производство. Опилки используются для производства древесной муки, древесно-композиционных материалов, в гидролизном и лесохимическом производстве, в промышленности строительных материалов [8, 13, 14].

В целом общие тенденции использования древесных отходов в России и за рубежом характеризуются топливно-энергетической направленностью [11]. И в то же время в России значительная часть древесных отходов до сих пор

вывозится на свалки. Наиболее очевидные негативные последствия накопления древесных отходов – это отчуждение территорий под складирование древесных отходов, пожароопасность древесных отходов.

Представляет большой интерес и является весьма перспективным использование опилок в качестве сырья в производстве полуфабрикатов высокого выхода для выработки бумаги и картона. Многие исследователи отмечают высокий потенциал древесных отходов как сырья для производства целлюлозы, древесно-стружечных и древесно-волоконистых масс. Например, получение волокнистого полуфабриката для картона возможно из стружек и опилок методом сброса давления (взрывной волокнистый полуфабрикат) [15].

Перспективно также использование опилок в качестве сырья для производства сульфатной целлюлозы, которую можно использовать при получении картона в смеси с целлюлозой из технологической щепы [9].

Многие исследователи продолжают разработку способов, технологий и режимов получения волокнистых полуфабрикатов из опилок и стружки. Положительные результаты получены в исследованиях по пероксидной варке древесных опилок разных пород [16], по получению целлюлозы из стружки еловой древесины методом катализируемой пероксидной варки в кислой среде с последующей щелочной экстракцией [17], а также из опилок древесины лиственницы делигнификацией смесью уксусной кислоты и пероксида водорода [18]. Следует отметить актуальность разработанной одноступенчатой перуксуснокислорварки хвойных древесных отходов деревообработки (опилок, стружки) [19].

В России есть опыт производства из древесных отходов (опилок) сульфатной целлюлозы для картона. Так, на Усть-Илимском ЛПК действует варочная установка непрерывного действия по варке сульфатной целлюлозы, но для реализации этого варианта необходимо было внедрение в практику лесопиления пил специального профиля, дающих крупные опилки в форме стружки. В этом случае опилки могут стать значительным источником древесного сырья для получения целлюлозы и полуцеллюлозы.

Наиболее освоенными в России являются запасы древесины Европейской части и Урала, и представляет интерес использование потенциала этих районов в плане безотходности. В настоящее время на Урале существуют предприятия, занимающиеся проблемой переработки древесных отходов. К ним можно отнести предприятия Пермского края, вплотную занявшиеся утилизацией древесных отходов с получением полезного продукта – полуфабриката для использования в производстве картона (Пермский ЦБК и ряд деревообрабатывающих комбинатов г. Перми и Пермского края).

Таким образом, актуальность, экономическая и экологическая целесообразность и эффективность утилизации древесных отходов целлюлозных производств не вызывают сомнений. Активное использование вторичных древесных ресурсов не только выступает важнейшим элементом ресурсосбережения, способствующим комплексному использованию древесного сырья и, в конечном счете, сохраняющим от вырубки значительные лесные массивы, но и призвано значительно улучшить экологическую составляющую лесной отрасли.

Цель данной работы состояла в разработке технологии утилизации древесных отходов (березовых опилок), образующихся при подготовке древесины (технологической щепы) для получения полуцеллюлозы.

Задача работы – получение нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы, пригодной для использования в композиции картона.

**Подготовка и анализ древесных отходов.** Для исследований использованы древесные опилки от получения технологической щепы для варки полуцеллюлозы на Пермском целлюлозно-бумажном комбинате (ПЦБК).

Предприятие представило для исследований два образца опилок – из свежей и зимней древесины.

С целью оценки качества древесных отходов по размерам определили фракционный состав сортированием через сита с круглыми отверстиями диаметром от 1 до 7 мм.

**Проведение варок древесных отходов с получением полуцеллюлозы.** Исследования проводились применительно к условиям ПЦБК. Для варки нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы (НСПЦ) использован производственный варочный раствор ( $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{NaOH}$  или  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) состава: всего  $\text{SO}_2$  6,7–7,7 %; связанного  $\text{SO}_2$  2,9–3,4 %; pH варочного раствора 10,17–10,58.

Нейтрально-сульфитные варки проводили в стационарном автоклаве вместимостью 2 л с электрообогревом без принудительной циркуляции.

Процесс варки полуцеллюлозы по непрерывной технологии включал следующие операции: в автоклаве – пропитка древесных опилок варочным раствором и варка; в центробежном размалывающем аппарате ЦРА – горячий и холодный размол полученной полуцеллюлозы, т.е. в периодически работающем оборудовании воспроизведены все процессы, их последовательность, режим и условия непрерывной варки ПЦБК на установке «Дефибратор»; промывку и сортирование полуцеллюлозы проводили в установке из двух сит: верхнее сито с диаметром отверстий 4 мм, нижнее – сетка № 40.

Процесс варки полуцеллюлозы по периодической технологии включал следующие операции: заливка древесных отходов варочным раствором (с температурой около 40 °С); подъем температуры до 156 °С (пропитка); стоянка (варка) при конечной температуре 156 °С, снижение давления и опорожнение автоклава; роспуск полученной полуцеллюлозы в дезинтеграторе на волокна и пучки волокон, промывка струей водопроводной воды и сортирование, размол в ЦРА. Таким образом, процесс варки проводили по упрощенной схеме (без промежуточной стоянки).

В работе использованы следующие стандартные методы анализа полуцеллюлозы: определение массовой доли влаги – ГОСТ 16932; подготовка образцов полуцеллюлозы к физико-механическим испытаниям – ГОСТ 14363.4; определение показателей механической прочности: сопротивления разрыву – по ГОСТ 1924-1-96, сопротивления продавливанию – по ГОСТ 13525.8; прочности на излом при многократных перегибах – по ГОСТ 13525.2; сопротивления плоскостному сжатию гофрированного образца бумаги – по ГОСТ 20682; сопротивления торцовому сжатию гофрированного образца бумаги – по ГОСТ 28686; разрушающего усилия при сжатии кольца в поперечном направлении – по ГОСТ 10711.

Показатели механической прочности отливок полуцеллюлозы определяли после размола в мельнице ЦРА до 24–33 °ШР. Степень помола массы определяли на аппарате СР-2. Образцы бумаги массой 100 г/м<sup>2</sup> получали на листоотливном аппарате ЛА-2 с вакуум-сушильной камерой.

Определение обезвоживаемости (скорости водоотдачи) бумажной и картонной массы проводили по методике, изложенной в источнике [20].

**Обсуждение результатов.** Объект исследования – древесные отходы подготовки технологической щепы для химической переработки на ПЦБК.

Березовые отходы представляют собой опилки – отходы от получения из балансовой березовой древесины технологической щепы для производства нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы.

Для характеристики качества древесных отходов определили их фракционный состав (табл. 1). Как следует из данных табл. 1, образец сырья 1 – довольно равномерного фракционного состава: количество основных фракций 2–4 в нем 95 %; очень мелкой фракции (поддон) в этом образце немного (0,7 %).

Опилки образца 2 из зимнего баланса не столь однородны – основных фракций 2–4 примерно 75 %. Опилки содержат много очень мелкой фракции – более 9 %.

Таблица 1

Фракционный состав использованных для получения полуцеллюлозы древесных отходов (опилок) – сортирование через сита с круглыми отверстиями

Номер фракции	Остаток на сите с диаметром отверстий, мм	Значения для древесных отходов	
		Образец 1 – березовые опилки из свежей древесины	Образец 2 – березовые опилки из зимнего баланса
1	7	0,4	0,3
2	5	13,5	7,6
3	3	51,1	34,7
4	2	29,6	32,5
5	1	4,7	15,7
6	Поддон	0,7	9,2

Древесные отходы были поставлены при влажности, при которой получается щепа для варки полуцеллюлозы на предприятии. Для использования в течение нескольких месяцев с целью предотвращения образования плесени и биологического разрушения древесины проводили подсушку опилок на воздухе до влажности 16–19 %.

Исследования по получению нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы из березовых опилок Пермского ЦБК проводили в двух направлениях – по непрерывной и периодической технологии. Операции непрерывной технологии соответствовали применяемым в настоящее время на предприятии при получении нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы на установке «Дефибратор».

Условия стадий варки березовых опилок по непрерывной технологии и полученные результаты приведены в табл. 2. Как следует из данных табл. 2, конечная температура варки в этой серии опытов (и в дальнейших исследованиях) составила 156 °С, т.е. это несколько ниже применяемой при непрерывной варке на предприятии. Объясняется это возможностями лабораторного автоклава – его предельная температура 156 °С.

По данным табл. 2 видно, что полученная полуцеллюлоза размалывается легко – в ЦРА 5,0–5,5 мин, что примерно в 4 раза меньше, чем для сульфитной и сульфатной целлюлозы (из опыта наших исследований). Выход полуцеллюлозы 65–68 %, т.е. ниже, чем нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы из щепы, так как полуцеллюлоза получена из очень мелкого сырья.

По механическим показателям все полученные образцы полуцеллюлозы удовлетворяют нормам ПЦБК для полуцеллюлозы из щепы.

Таблица 2

Результаты варки березовых опилок из свежей древесины (образец 1)  
по технологии непрерывной варки

Условия варки и показатели полуцеллюлозы	Номер образца					Нормы по регламенту ПЦБК для полуцеллюлозы из щепы
	1 (режим 1)	2 (режим 2)		3 (режим 3)		
Условия варки: пропитка: – подъем температуры до 100 °С, мин	60	50		40		
– стоянка при температуре 100 °С, мин	30	20		15		15–20 (пропарка), 10 (пропитка)
Собственно варка: – подъем температуры до 156 °С, мин	50	76		60		
– стоянка при температуре 156 °С, мин	40	30		20		32–40 (при температуре 168–175 °С)
– гидромодуль	7	7		5,5		
Продолжительность горячего размола, мин	20	20		20		
Степень помола после горячего размола, °ШР	13	13		14		
Продолжительность холодного размола, мин	10	3	5	5	5,5	
Показатели полуцеллюлозы: – выход полуцеллюлозы общий (непровара мало), % от абсолютно сухой древесины	62,4	64,6	64,6	67,9	67,9	Не менее 70
– степень помола, °ШР	48	23	29	24	29	24–33
– разрывная длина (100 г/м <sup>2</sup> ), м	9180	6810	7630	7400	8100	Не менее 5000

*Примечание:* в таблице приведены результаты (средние) двух параллельных варок.

При получении полуцеллюлозы по непрерывному способу режим 3 дает высокие результаты и по выходу, и по механическим показателям при соблюдении требований к степени помола. Этот режим может быть принят как оптимальный.

В настоящее время на ПЦБК нейтрально-сульфитная полуцеллюлоза получается в установках непрерывного действия высокой производительности (по 130 т/сут каждая). Представляет интерес возможность и целесообразность получения нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы из древесных отходов предприятия по периодическому способу, позволяющему изменять производительность потока в широких пределах.

Изучены режимы пропитки и варки опилок, холодного размола полученной полуцеллюлозы. Условия варок и результаты данной серии опытов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты варки березовых опилок (из свежей и зимней древесины)  
ПЦБК по графику периодической варки

Условия варки и показатели полуцеллюлозы	Полуцеллюлоза из опилок					Нормы по регламенту ПЦБК для полуцеллюлозы из щепы
	Из опилок свежей древесины (образец 1)				Из опилок зимней древесины (образец 2)	
Номер образца полуцеллюлозы	4	5	6	7	8	
Условия варки:						Варка непрерывная
– подъем температуры от 40 до 156 °С (пропитка), мин	*	85	85	85	80	
– стоянка при температуре 156 °С (варка), мин	80	30	30	30	30	
– общая продолжительность процессов пропитки и варки, мин	205	115	115	115	110	
– гидромодуль	7	6	6	6	6	
Продолжительность холодного размола, мин	10	10	5,0	5,5	7,0	
Показатели полуцеллюлозы:						Не менее 70
– выход полуцеллюлозы (общий), %	62,5	75,0	75,5	75,2	72,5	
– степень помола, °ШР	28	56	24	27	29	
– разрывная длина (100 г/м <sup>2</sup> ), м	5820	8590	8040	8090	7430	Не менее 5000

*Примечание.* \* Образец 4 получен по режиму бисульфитной варки: пропитка при температуре 125 °С, варка при температуре 156 °С.

Образец 4 получен по режиму периодической бисульфитной варки с пропиткой при температуре 125 °С. Образцы 5–8 получены по сокращенному режиму при предлагаемых нами условиях: подъем температуры до конечной 156 °С (пропитка), стоянка (варка) при температуре 156 °С.

Полученные результаты варок приведены в табл. 3.

Образец 4, полученный по режиму бисульфитной варки с предварительной пропиткой (стоянкой при температуре 125 °С), имеет низкие показатели выхода и разрывной длины (общая продолжительность процессов пропитки и варки максимальная). Таким образом, получение полуцеллюлозы из опилок по графику обычной бисульфитной варки дало неудовлетворительные результаты.

Варка по принятому нами сокращенному режиму дала весьма положительные результаты. Образцы полуцеллюлозы 5–7 из свежих опилок получены с высокими показателями выхода и разрывной длины. Показатели полуцеллюлозы образца 8 из опилок зимнего баланса несколько ниже. Однако показатель разрывной длины всех образцов полуцеллюлозы из опилок, полученных по сокращенному режиму варки, заметно превышает этот показатель полуцеллюлозы ПЦБК из технологической щепы.

Все образцы полуцеллюлозы размалываются легко (продолжительность размола до 24–29 °ШР составила 5–7 мин).

Таким образом, по результатам периодических варок березовых опилок ПЦБК режимы варок образцов 5–8 являются весьма эффективными.

Эффективность такой технологии с кратковременной варкой (30 мин) объясняется локализацией лигнина лиственной древесины в клеточной стенке – лигнин лиственной древесины практически полностью сосредоточен в срединной пластинке. Поэтому такой кратковременной варки достаточно для получения при дальнейшем размоле щепы полуцеллюлозы хорошего качества.

Для завершения работы необходимо было получить опытные образцы полуцеллюлозы из древесных отходов и проверить в опытных условиях целесообразность использования их в композиции картона. С целью ориентировочной оценки пригодности полученных образцов полуцеллюлозы для введения в композицию картона для двух образцов полуцеллюлозы (выборочно) определен более широкий набор показателей механической прочности (табл. 4).

Таблица 4

Показатели механической прочности некоторых образцов нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы (выборочно), полученных по предлагаемой периодической технологии

Показатели полуцеллюлозы	Полуцеллюлоза из опилок			Нормы по регламенту ПЦБК для полуцеллюлозы из щепы
	Образец из свежей древесины (образец опилок 1)	Образец из зимней древесины (образец опилок 2)	Образец из свежей древесины (образец опилок 1)	
Номер образца полуцеллюлозы	6	7	8	
Степень помола, °ШР	24	27	29	24–33
Механические показатели полуцеллюлозы: – разрывная длина (100 г/м <sup>2</sup> )	6630	7300	6060	Не менее 5000
– сопротивление продавливанию, кПа	288	323	283	Не менее 280
– сопротивление плоскостному сжатию, Н	222	187	260	Не менее 310
– сопротивление торцовому сжатию, кН/м	1,58	1,78	1,66	0,70–1,55 для марки Б-1

Из данных табл. 4 следует, что из березовых опилок ПЦБК получается полуцеллюлоза, которая по всем показателям, кроме сопротивления плоскостному сжатию, соответствует качеству полуцеллюлозы предприятия из щепы.

Исходя из изложенного, на данном этапе работы мы получили для опытных испытаний 2 образца полуцеллюлозы из березовых опилок ПЦБК – из свежей древесины и из зимней древесины. Каждый образец полуцеллюлозы являлся усредненной массой из пяти параллельных варок.

**Опытные испытания полуцеллюлозы из березовых опилок ПЦБК.**

В табл. 5 приведены механические показатели образцов полуцеллюлозы из опилок, представленных для опытных испытаний (показатели полуцеллюлозы определены в исследовательской лаборатории ПЦБК). Из данных табл. 5 следует, что оба образца полуцеллюлозы, полученные из опилок, по всем показателям качества соответствуют нормам по регламенту ПЦБК для полуцеллюлозы из технологической щепы.

Таблица 5

Механические показатели опытных образцов полуцеллюлозы из древесных (березовых) опилок ПЦБК

Показатель	Образец из свежей древесины (образец опилок 1)	Образец из зимнего баланса (образец опилок 2)	Нормы по регламенту ПЦБК для полуцеллюлозы из щепы
Степень помола, °ШР	32	32	24–33
Сопротивление продавливанию, кПа	484	433	Не менее 280
Разрывная длина, м	6310	6320	Не менее 5000
Удельное сопротивление разрыву, кН/м	8,47	8,36	Не менее 8,0
Сопротивление плоскостному сжатию, Н	362	380	Не менее 310
Сопротивление торцовому сжатию, кН/м	2,82	2,80	0,70–1,55 для марки Б-1
Разрушающее усилие при сжатии кольца, Н	387	353	–

Опытные испытания проведены в исследовательской лаборатории ПЦБК с использованием в композиции бумаги и картона, кроме полуцеллюлозы из опилок, полуфабрикатов из производственного потока ПЦБК.

Для проведения испытаний из технологического потока производства бумаги для гофрирования отбирали следующие полуфабрикаты: нейтрально-сульфитную полуцеллюлозу – ПЦ (в настоящее время целлюлоза высокого выхода – ЦВВ) и макулатурную массу (ММ) из макулатуры марки МС-5Б.

Цель данной работы состояла в определении возможности использования полуфабриката (полуцеллюлозы) из опилок в композиции бумаги и картона.

Образцы бумаги и картона для испытаний изготавливали на листоотливном аппарате. Предварительно полуфабрикат из опилок размалывали до 32 °ШР. Производственные полуфабрикаты отбирали из композиционного бумагоделательной машины (БДМ) в два этапа в разное время, т.е. получали по два варианта бумаги и картона, и в композицию каждого варианта бумаги и картона входила полуцеллюлоза из опилок. Во всех случаях эта полуцеллюлоза использована для замены макулатурной массы в композиции бумаги и картона.

Механические показатели отливок бумаги приведены в табл. 6, а отливок картона – в табл. 7. В обоих случаях в первом варианте отливок применена полуцеллюлоза из древесных опилок образца 1, во втором варианте – полуцеллюлоза из опилок образца 2 (см. табл. 5).

Таблица 6

## Механические показатели отливок бумаги из бумажной массы

Номер варианта-образца	Композиция	Степень помола массы, °ШР	Механические показатели (130 г/м <sup>2</sup> )					Обезвоживаемость (скорость водоотдачи) бумажной массы, с		
			Разрывная длина, м	Удельное сопротивление разрыву, кН/м	Сопротивление			300 мл	500 мл	700 мл
					Продавливанню, кПа	Плоскостному сжатию, Н	Торцовому сжатию, кН/м			
ГОСТ 53206 (125 г/м <sup>2</sup> ), не менее			–	8,0	320	310	1,35	–	–	–
1-1	ЦВВ – 80 %, ММ – 20 %	30	5310	7,2	489	319	2,71	3,7	14,8	36,4
1-2	ЦВВ – 80 %, ПЦ из опилок образца 1 – 20 %	32	5670	8,0	487	368	2,79	4,6	15,8	38,3
2-1	ЦВВ – 80 %, ММ – 20 %	29	5634	7,7	459	344	2,54	2,5	11,9	32,6
2-2	ЦВВ – 80 %, ПЦ из опилок образца 2 – 20 %	29	6330	8,4	448	380	2,8	3,1	13,7	35,0

Таблица 7

## Механические показатели отливок картона из картонной массы

Номер варианта-образца	Композиция	Степень помола массы, °ШР	Механические показатели (130 г/м <sup>2</sup> )			Обезвоживаемость (скорость водоотдачи) картонной массы, с		
			Сопротивление продавливанию, кПа	Прочность на излом, ч.д.п.	Разрушающее усилие при сжатии кольца, Н	300 мл	500 мл	700 мл
ТУ 5441-073-24086615–2014 (135 г/м <sup>2</sup> ), не менее			460	10	150	–	–	–
1-1	ММ – 100 %	27	303	53	259	3,0	11,4	28,3
1-2	ММ – 90 %, ПЦ из опилок образца 1 – 10 %	30	356	51	252	3,8	13,4	31,0
1-3	ММ – 80 %, ПЦ из опилок образца 1 – 20 %	30	363	44	256	3,5	13,9	32,3
2-1	ММ – 100 %	30	350	62	242	2,7	13,3	33,3
2-2	ММ – 90 %, ПЦ из опилок образца 2 – 10 %	31	355	60	268	3,4	14,6	34,9
2-3	ММ – 80 %, ПЦ из опилок образца 2 – 20 %	32	344	41	255	3,7	16,9	39,7

По результатам испытаний полуцеллюлозы отмечается, что по показателям качества отливок бумаги, полученных с применением в композиции полуцеллюлозы из опилок, в обоих вариантах опытов замена макулатурной массы полуцеллюлозой из березовых опилок способствует увеличению показателя «удельное сопротивление разрыву» и «сопротивление плоскостному сжатию» на 9–15 % без снижения других прочностных характеристик; остальные показатели качества оставались на прежнем уровне. Показатель обезвоживаемости (скорости водоотдачи на сетке) изменялся незначительно.

Результаты испытаний полуцеллюлозы из опилок с применением в композиции картона аналогичные (отмечается увеличение показателя «абсолютное сопротивление продавливанию»).

Выводы по испытаниям образцов полуцеллюлозы из березовых опилок:

– опытный полуфабрикат из березовых опилок ПЦБК имеет высокие исходные прочностные показатели за исключением показателя «прочность на излом при многократных перегибах»;

– показана возможность использования полуфабриката из опилок в композиции картона (КПС) и бумаги для гофрирования без снижения прочностных характеристик.

**Заключение.** Сделаем следующие выводы. Древесные отходы (опилки из березовой древесины) ПЦБК могут служить сырьем для получения нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы как по непрерывной, так и по периодической технологии. Процесс получения полуцеллюлозы трудностей не вызывает.

Показатели качества получаемой полуцеллюлозы при оптимальных (по результатам исследований) условиях при выходе 75 % соответствуют показателям полуцеллюлозы ПЦБК из технологической щепы.

В процессе работы испытан и предлагается способ периодической варки нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы по сокращенному режиму без промежуточной стоянки для пропитки опилок.

Получены два образца нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы из березовых опилок ПЦБК, которые испытаны в исследовательской лаборатории предприятия на пригодность к использованию их в композиции бумаги для гофрирования и картона (КПС).

Показано, что опытный полуфабрикат из березовых опилок имеет высокие прочностные показатели и с успехом может быть применен в композиции бумаги для гофрирования и картона ПЦБК без снижения их прочностных характеристик.

#### Библиографический список

1. Беловежец Л.А., Волчатова И.В., Медведева С.А. Перспективные способы переработки вторичного лигноцеллюлозного сырья // Химия растительного сырья. – 2010. – № 2. – С. 5–16.
2. Андреев А.А. Ресурсосбережение и использование отходов заготовки и переработки древесного сырья // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. – 2014. – № 10. – С. 148–155.
3. Комплексное устойчивое управление отходами. Деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность: учеб. пособие / Н.И. Альберг [и др.]; под ред. Н.И. Альберг. – М.: Издательский дом Академии естествознания, 2016. – 308 с.
4. Комплексная химическая переработка древесины / И.Н. Ковернинский, В.И. Комаров [и др.]. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2003. – 344 с.
5. Журавлева Л.Н., Девятловская А.Н. Основные направления использования древесных отходов // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2007. – № 18. – С. 96–99.
6. Гелес И.С. Древесное сырье – стратегическая основа и резерв цивилизации. – Петрозаводск, 2007. – 500 с.
7. Пен Р.З., Рязанова Т.В. Комплексная химическая переработка древесины. – Красноярск: Изд-во СибГТУ, 2012. – 158 с.
8. Современные направления переработки лесных ресурсов / Р.Г. Сафин, З.Г. Саттарова [и др.] // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 21. – С. 90–93.

9. Васильева Т.В. Некоторые аспекты использования древесных отходов // Лесной вестник. – 2002. – № 4. – С. 68–71.
10. Рациональное природопользование в условиях устойчивого развития экономики промышленных предприятий лесного комплекса / Ю.А. Безруких, С.О. Медведев, Ю.Д. Алашкевич, А.П. Мохирев // Экономика и предпринимательство. – 2014. – № 12-2. – С. 994–996.
11. Васильева Т.В. Обзор сложившихся тенденций использования древесных отходов за рубежом // Лесной вестник. – 2002. – № 4. – С. 71–73.
12. Гелес И.С., Коржицкая З.А. Биомасса дерева и ее использование. – Петрозаводск, 1992. – 230 с.
13. Никишов В.Д. Комплексное использование древесины: учебник для вузов. – М.: Лесная промышленность, 1985. – 264 с.
14. Иванов И.С. Развитие инновационных экотехнологий, базирующихся на использовании древесных отходов // Экономика и управление. – 2009. – № 12. – С. 64–69.
15. Зиятдинова Д.Ф., Сафин Р.Г., Зиятдинов Р.Р. Современное состояние техники и технологии производства древесной массы сбросом давления // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 7. – С. 53–57.
16. Низкотемпературная окислительная делигнификация древесины. 9. Пероксидная варка разных пород / Р.З. Пен, А.В. Бывшев, И.Л. Шапиро, И.В. Мирошниченко, В.Е. Тарабанько // Химия растительного сырья. – 2001. – № 3. – С. 11–15.
17. Низкотемпературная окислительная делигнификация древесины. 8. Пероксидная варка и щелочная экстракция / Р.З. Пен, А.В. Бывшев, И.Л. Шапиро, И.В. Мирошниченко, В.Е. Тарабанько // Химия растительного сырья. – 2001. – № 3. – С. 5–10.
18. Окислительная делигнификация древесины лиственницы в среде уксусная кислота – пероксид водорода – вода в присутствии катализатора  $H_2MoO_4$  / С.А. Кузнецова, О.В. Яценкова, В.Г. Данилов, Б.Н. Кузнецов // Химия растительного сырья. – 2005. – № 4. – С. 35–39.
19. Полюттов А.А., Пен Р.З., Бывшев А.В. Технология целлюлозы. Экологически чистое производство: монография. – Красноярск: Красноярский писатель, 2012. – 294 с.
20. Шабиев Р.О., Смолин А.С., Парамонова Л.Л. Изготовление и испытание лабораторных образцов бумаги и картона из вторичного сырья: учеб.-метод. пособие. – СПб.: Изд-во Санкт-Петерб. гос. технолог. ун-та растит. полимеров, 2013. – 66 с.

## References

1. Belovezhec L.A., Volchatova I.V., Medvedeva S.A. Perspektivnye sposoby pererabotki vtorichnogo lignocelljuloznogo syr'ja [Promising ways of processing recycled lignocellulosic raw materials]. *Khimija Rastitel'no go Syr'ja*. 2010, no. 2, pp. 5-16.
2. Andreev A.A. Resursoberezenie i ispol'zovanie othodov zagotovki i pererabotki drevesnogo syr'ja [Resource conservation and use of waste wood harvesting and processing of raw wood]. *Fundamental'nye i prikladnye issledovanija: problemy i rezul'taty*. 2014, no. 10, pp. 148-155.
3. Kompleksnoe ustojchivoe upravlenie othodami. Derevoobrabatyvajushhaja i celljulozno-bumazhnaja promyshlennost': ucheb. posobie red. N.I. Al'berg. [Resource conservation and use of waste wood harvesting and processing of raw wood]. Moscow. Izdatel'skij dom Akademii Estestvoznaniya, 2016, 308 p.
4. Koverninskij I.N., Komarov V.I. i dr. Kompleksnaja himicheskaja pererabotka drevesiny [Complex chemical processing of wood]. Arhangel'sk, AGTU, 2003, 344 p.
5. Zhuravljova L.N., Devjatlovskaja A.N. Osnovnye napravlenija ispol'zovanija drevesnyh othodov [The main uses of wood waste]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*. 2007, no. 18, pp. 96-99.
6. Geles I.S. Drevesnoe syr'e – strategicheskaja osnova i rezerv civilizacii [Wood raw materials – a strategic basis and a reserve of civilization]. Petrozavodsk, 2007, 500 p.
7. Pen R.Z., Rjazanova T.V. Kompleksnaja himicheskaja pererabotka drevesiny [Complex chemical processing of wood]. Krasnojarsk: SibGTU, 2012, 158 p.
8. Safin R.G., Sattarova Z.G. i dr. Sovremennye napravlenija pererabotki lesnyh resursov [Modern areas of processing of forest resources]. *Vestnik tehnologicheskogo universiteta*. 2015, vol. 18, no. 21, pp. 90-93.
9. Vasil'eva T.V. Nekotorye aspekty ispol'zovanija drevesnyh othodov [Some aspects of the use of wood waste]. *Lesnoj vestnik*. 2002, no. 4, pp. 68-71.
10. Bezrukih Ju.A., Medvedev S.O., Alashkevich Ju.D., Mohirev A.P. Racional'noe prirodopol'zovanie v uslovijah ustojchivogo razvitija jekonomiki promyshlennyh predpriyatij lesnogo

kompleksa [Rational environmental management in the conditions of sustainable economic development of industrial enterprises of the forest complex]. *Jekonomika i predprinimatel'stvo*. 2014, no. 12-2, pp. 994-996.

11. Vasil'eva T.V. Obzor slozhivshihsja tendencij ispol'zovanija drevesnyh othodov za rubezhom [Review of current trends in the use of wood waste abroad]. *Lesnoj vestnik*. 2002, no. 4, pp. 71-73.

12. Geles I.S., Korzhickaja Z.A. Biomassa dereva i ee ispol'zovanie [Biomass trees and its use]. Petrozavodsk, 1992, 230 p.

13. Nikishov V.D. Kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny: Uchebnik dlja vuzov [Complex use of wood]. Moscow. Forest industry, 1985, 264 p.

14. Ivanov I.S. Razvitie innovacionnyh jekotehnologij, bazirujushhihsja na ispol'zovanii drevesnyh othodov [The development of innovative eco-technologies based on the use of wood waste]. *Jekonomika i upravlenie*. 2009, no. 12, pp. 64-69.

15. Ziatdinova D.F., Safin R.G., Ziatdinov R.R. Sovremennoe sostojanie tehniki i tehnologii proizvodstva drevesnoj massy sbrosom davlenija [State-of-the-art technology and technology for the production of pulp by pressure release]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*. 2011, no. 7, pp. 53-57.

16. Pen R.Z., Byvshev A.V., Shapiro I.L., Miroshnichenko I.V., Taraban'ko V.E. Nizkotemperaturnaja oksilitel'naja delignifikacija drevesiny. Peroksidnaja varka raznyh porod [Low temperature oxidative delignification of wood. Peroxide cooking of different breeds]. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*. 2001, no. 3, pp. 11-15.

17. Pen R.Z., Byvshev A.V., Shapiro I.L., Miroshnichenko I.V., Taraban'ko V.E. Nizkotemperaturnaja oksilitel'naja delignifikacija drevesiny. Peroksidnaja varka i shhelochnaja jekstrakcija [Low temperature oxidative delignification of wood. Peroxide cooking and alkaline extraction]. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*. 2001, no. 3, pp. 5-10.

18. Kuznecova S.A., Jacenkova O.V., Danilov V.G., Kuznecov B.N. Okislitel'naja delignifikacija drevesiny listvennicy v srede uksusnaja kislota – peroksid vodoroda – voda v prisutstvii katalizatora  $N_2MoO_4$  [Oxidative delignification of larch wood in the environment acetic acid – hydrogen peroxide – water in the presence of a catalyst  $N_2MoO_4$ ]. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*. 2005, no. 4, pp. 35-39.

19. Poljutov A.A., Pen R.Z., Byvshev A.V. Tehnologija celljulozy. Jekologicheskii chistoe proizvodstvo [Pulp technology. Environmentally friendly production]. Krasnojarsk, Krasnojarskij pisatel', 2012, 294 p.

20. Shabiev R.O., Smolin A.S., Paramonova L.L. Izgotovlenie i ispytanie laboratornyh obrazcov bumagi i kartona iz vtorignogo syr'ja: ucheb.-metod. posobie [Production and testing of laboratory samples of recycled paper and paperboard]. Sankt Petersburg, 2013, 66 p.

Получено 17.12.2018

**F. Khakimova, O. Noskova, E. Glezman,  
V. Zhitnyuk, M. Spasennikov, K. Sinyayev**

## **AN OPTION OF UTILIZATION OF WASTE WOOD FROM THE PREPARATION OF TECHNOLOGICAL CHIPS FOR SEMI-CHEMICAL PULP PRODUCTION**

The work is aimed at solving the urgent problem of increasing the complexity of the use of wood raw materials by recycling waste wood on pulp and paper mills. The object of the study is birch sawdust generated in the preparation process of technological chips for semi-chemical pulp cooking.

The work is performed in the conditions of the Perm Pulp and Paper Mill (PPPM). Production of neutral sulfite semi-chemical pulp using continuous and periodic technology was researched. Cooking was done with industrial cooking solution ( $Na_2SO_3 + NaOH (NH_4OH)$ ). Operations and conditions of continuous technology were the same as those in the process currently applied at PPPM during the production of semi-chemical pulp on the Defibrator plant.

It is shown that waste wood (sawdust of birch wood) of PPPM can serve as a raw material for the production of neutral sulfite semi-chemical pulp for both continuous and periodic technology. The

process of semi-chemical pulp production does not cause difficulties. The quality of semi-chemical obtained pulp under optimal conditions (according to the research) with the product yield of 75% corresponds to the quality of semi-chemical pulp of PPPM produced from process chips.

During the research a method for the periodic cooking of neutral sulfite semi-chemical pulp under reduced mode without stage of sawdust impregnation was tested.

Two samples of neutral sulfite semi-chemical pulp from PPPM birch sawdust were produced. They were tested in the research laboratory of the mill for the applicability in the composition of fluting and cardboard. It is shown that the experimental semi-finished product from birch sawdust has high strength and can be successfully used in the composition of fluting and cardboard in PPPM without reducing strength characteristics.

**Keywords:** waste wood, utilization, neutral sulfite cooking, semi-chemical pulp, refine, mechanical strength, pilot tests, pulp composition, fluting, cardboard.

**Хакимова Фирдавес Харисовна** (Пермь, Россия) – д-р техн. наук, профессор, заслуженный работник высшей школы, профессор кафедры технологии полимерных материалов и порохов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: tcbp@pstu.ru).

**Носкова Ольга Алексеевна** (Пермь, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры химических технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: oa-noskova@mail.ru).

**Глезман Евгений Андреевич** (Пермь, Россия) – канд. экон. наук, исполнительный директор ООО «Прикамский картон» (614031, Пермь, ул. Бумажников, 1, e-mail: pcbk@pcbk.ru).

**Житнюк Виталий Анатольевич** (Пермь, Россия) – канд. техн. наук, главный технолог ООО «Прикамский картон» (614031, Пермь, ул. Бумажников, 1, e-mail: Vitaly.Zhitnyuk@pcbk.ru).

**Спасенников Михаил Николаевич** (Пермь, Россия) – заместитель исполнительного директора ООО «Прикамский картон» (614031, Пермь, ул. Бумажников, 1, e-mail: pcbk@pcbk.ru).

**Синяев Константин Андреевич** (Пермь, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры химических технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: sinyae83@mail.ru).

**Hakimova Firdaves** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Honourable worker of the Higher school, Professor of Department of Technology of Polymeric Materials and Gunpowder, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: tcbp@pstu.ru).

**Noskova Olga** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: oa-noskova@mail.ru).

**Glezman Eugene** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Economic Sciences, Executive director, "Prikamsky karton", LLC (614031, Perm, Bumazhnikov st., 1, e-mail: pcbk@pcbk.ru).

**Zhitnyuk Vitali** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Chief Technologist, "Prikamsky karton", LLC (614031, Perm, Bumazhnikov st., 1, e-mail: pcbk@pcbk.ru).

**Spasennikov Michael** (Perm, Russian Federation) – Deputy Executive Director, "Prikamsky karton", LLC (614031, Perm, Bumazhnikov st., 1, e-mail: pcbk@pcbk.ru).

**Sinyaev Konstantin** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: sinyae83@mail.ru).

# ОБРАЩЕНИЕ С ОТХОДАМИ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ

---

DOI 10.15593/2409-5125/2019.02.01

УДК 504.064.47: 662.8.053.3

**О.Н. Калинихин**

Донецкий национальный технический университет

## ПРИРОДООХРАННОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ СОВМЕСТНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ КОМПОНЕНТОВ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ И ОТХОДОВ КОКСОХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Рост производства и утилизации вторичного топлива на основе различных видов отходов производства и процессов потребления является устойчивым трендом развития ресурсосберегающих технологий в промышленно развитых странах мира. Отраслевые решения в данной сфере деятельности ориентированы прежде всего на максимальное извлечение ресурсного потенциала и минимизацию возможного негативного влияния на окружающую среду и здоровье человека.

Статья является логическим продолжением исследований автора, направленных на обоснование и последующее внедрение технологии совместной переработки компонентов твердых бытовых отходов и отходов коксохимических заводов с целью получения и последующей термической утилизации топливных композиций.

Представлены результаты природоохранного обоснования технологии совместной термической утилизации топливных составов на основе компонентов твердых бытовых отходов и отходов коксохимических заводов. Получена имитационная модель процесса совместной термической утилизации твердых бытовых отходов и отходов коксохимических заводов с последующим прогнозированием на ее основе состава продуктов сгорания и характера эмиссии загрязняющих веществ, образующихся при сжигании смесей отходов. На основе данных имитационного моделирования процесса рассеивания загрязняющих веществ на границе санитарно-защитной зоны предприятия по сжиганию смесей отходов дана оценка потенциального влияния на окружающую природную среду.

**Ключевые слова:** твердые бытовые отходы, смолистые отходы коксохимических предприятий, совместная переработка, топливные композиции, сжигание, имитационное моделирование, рассеивание примесей.

---

Калинихин О.Н. Природоохранное обоснование ресурсосберегающей технологии совместной переработки компонентов твердых бытовых отходов и отходов коксохимических предприятий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2019. – № 2. – С. 22–34. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.02

Kalinihin O. Environmental Justification of a Resource-saving Technology of Joint Processing of Components of Municipal Solid Waste and Waste of By-product Coking Industry. PNRPU. Applied Ecology. Urban Development. 2019. No. 2. Pp. 22-34. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.02

Важнейшим фактором, определяющим пригодность использования той или иной ресурсосберегающей технологии термической утилизации твердых бытовых отходов (ТБО), является ее природоохранный аспект. Очевидно, что он напрямую определяется характером продуктов термического распада, мигрирующих в окружающую среду и способных оказать на нее негативное воздействие. Следовательно, обоснование технологии производства и утилизации топливных композиций [1] должно в обязательном порядке предусматривать анализ состава термических продуктов распада топливных смесей и оценку характера их ассимиляции окружающей средой. При этом особый интерес представляет природоохранный аспект вовлечения вторичного топлива в энергетический баланс крупных перерабатывающих предприятий [2], в частности анализ влияния на количественный и качественный состав выбросов загрязняющих веществ мусоросжигающих заводов (МСЗ), процесса замены штатного потока ТБО на комплексные топливные смеси, содержащие как компоненты ТБО, так и побочные продукты коксохимического производства (КХП).

Цель данной работы – получение имитационной модели процесса совместной термической утилизации ТБО и отходов КХП с последующим прогнозированием на ее основе состава продуктов сгорания и характера эмиссии загрязняющих веществ, образующихся при сжигании смесей отходов.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- 1) на основе анализа сложившейся в мире практики термической утилизации ТБО определить основные технологические параметры предприятий по их сжиганию;
- 2) обосновать иерархическую структуру имитационной модели;
- 3) исходя из данных экспериментальных исследований, предложить начальные условия проведения имитационного моделирования;
- 4) получить на основе имитационной модели данные о рассеивании загрязняющих веществ на границе санитарно-защитной зоны предприятия по сжиганию смесей отходов с оценкой влияния на окружающую природную среду процесса совместной термической утилизации ТБО и отходов КХП.

Мировая практика показывает, что наилучшие и наиболее безопасные условия по переработке RDF обеспечивают мусоросжигательные заводы (МСЗ) [3]. Существует несколько типов МСЗ, но наибольшее распространение получили заводы, оборудованные топочными устройствами с обратно переталкивающими колосниковыми решетками [4, 5]. Технологическая схема МСЗ с мусоросжигательными котлами, оборудованными обратно переталкивающими колосниковыми решетками, приведена на рис. 1.

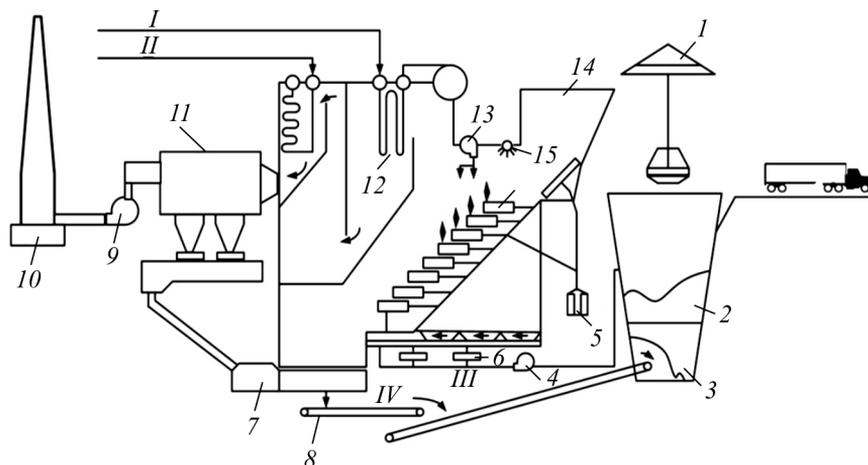


Рис. 1. Технологическая схема МСЗ: 1 – мостовой грейферный кран; 2, 3 – брикетный и шлаковый отсеки бункера-накопителя; 4 – вентилятор первичного дутьевого воздуха; 5 – станция гидропривода; 6 – паровые калориферы-воздухонагреватели; 7 – шлакоизвлекатель; 8 – ленточные транспортеры; 9 – дымосос; 10 – дымовая труба; 11 – электростатический фильтр; 12 – котел-утилизатор; 13 – вентилятор вторичного воздуха; 14 – загрузочный бункер; 15 – растопочная горелка; 16 – колосниковая решетка; I – пар; II – вода; III – воздух; IV – шлак

Основные технологические параметры МСЗ, используемые в процессе имитационного моделирования, соответствовали характеристикам Московского МСЗ № 2 (табл. 1) [6, 7].

Таблица 1

Технологические характеристики МСЗ

Показатель, единицы измерения	Значение	Значение, принятое при моделировании
Количество мусоросжигательных котлов, шт.	1–10	2
Количество природного газа, необходимое для сжигания 1 т ТБО, м <sup>3</sup>	80–120	90
Пропускная способность МСЗ по сжигаемым ТБО, т ТБО/ч	10–100	100
Предельный низший уровень теплоты сгорания ТБО, МДж/кг	6–7	7
Минимальный необходимый суточный запас ТБО, т	300–2500	2500
Отклонение величины топливной загрузки от проектной, %	3–5	5
Температура в топочном пространстве над колосниками, °С	850–1300	1100

Окончание табл. 1

Показатель, единицы измерения	Значение	Значение, принятое при моделировании
Минимальное время пребывания дымовых газов в зоне дожигания печи, с	2–4	2
Количество вырабатываемого тепла в год, тыс. Гкал	60–240	240
Количество вырабатываемого пара, т/ч	30–150	150
Количество вырабатываемой электроэнергии в год, кВт·ч	$1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$
Количество шлака, образующегося при сжигании 1 т ТБО, кг	200–300	300

Анализ технологических параметров Московского МСЗ № 2 и опыта использования методики расчета значения приземной концентрации при сжигании ТБО [8, 9] дали возможность разработать имитационную модель расчета значения приземной концентрации при сжигании смесей твердых бытовых отходов и смолистых отходов КХП.

Построение модели было основано на использовании файлов временных рядов, характеризующих исходные данные для моделирования переноса выбросов вредных веществ, а также на применении алгоритма оценки выбросов летучей золы, диоксидов серы и азота, оксида углерода (II). Реализация модели осуществлялась в системе компьютерной математики Matlab, являющейся признанным стандартом в процессах моделирования взаимодействия сложных технических систем с окружающей средой [10–12].

Структура имитационной модели была организована по иерархическому принципу. На верхнем уровне иерархии выделяются основные подсистемы: блок «Исходные данные», моделирующий блок «Моделирование выбросов» и блоки «Метеорологические показатели», «Перенос примесей». Структура компьютерной модели приведена на рис. 2.

Подсистема «Исходные данные» имитационной модели предполагала графическую компоновку входных параметров с учетом необходимого для моделирования выбросов вредных веществ перечня параметров (например, теплота сгорания, зольность, содержание общей серы, количество загруженных отходов, производительность). Данные параметры характеризовали процесс сжигания на заводе смеси ТБО и смолистых отходов КХП.

В процессе проведения вычислительного эксперимента моделирование исходных данных осуществлялось для трех вариантов сжигания смесей отходов: сжигание смеси ТБО и каменноугольных фусов (60+40 мас. %); сжигание смеси ТБО и кислой смолки (60+40 мас. %); сжигание ТБО (100 мас. %).

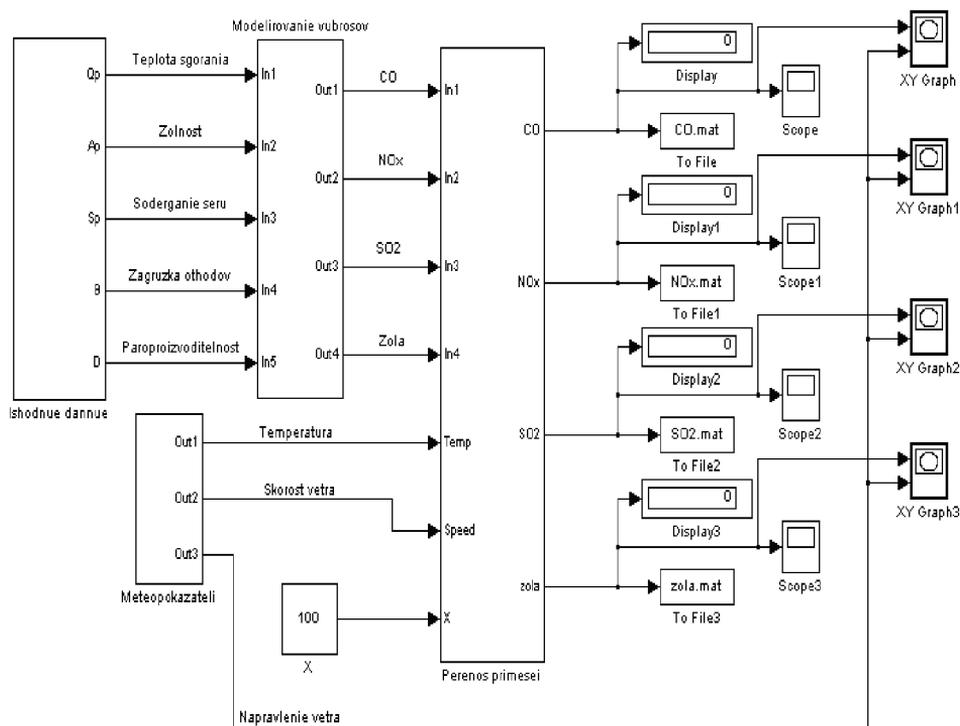


Рис. 2. Блок-схема компьютерной модели, выполненная средствами Simulink

Для случая величин паропроизводительности, величин загрузки смеси ТБО и отходов КХЗ применялись генераторы равномерного распределения, с этой целью использовались matlab-функции `unifrnd` [13, 14].

Максимальные и минимальные значения параметров для имитационных расчетов при определении функций `unifrnd` приведены в табл. 2–4. В случае моделирования показателей «зольность», «массовая доля серы» и «рабочая теплота сгорания топлива» применялись нормально распределенные генераторы случайных чисел вида `normrnd`. Соответствующие исходные данные, характеризующие средние показатели и стандартные отклонения, приведены в табл. 2–4.

Таким образом, было рассмотрено шесть наборов различных исходных данных в достаточно широком диапазоне изменения параметров. Это позволило оценить всю область определения параметров, характеризующих процессы сжигания отходов. Варианты расчетов задавались путем изменения содержания блоков в подсистеме «Исходные данные».

Таблица 2

Диапазоны изменения исходных данных моделирования выбросов вредных веществ при сжигании смеси ТБО и каменноугольных фусов (60+40 мас. %)

Показатель	Минимум	Максимум	Среднее значение по испытаниям	Стандартное отклонение
Зольность пробы на рабочую массу $A^p$ , %	13,20	13,68	13,33	0,24
Массовая доля серы в рабочем топливе $S^p$ , %	2,54	2,76	2,64	0,19
Рабочая теплота сгорания топлива $Q^p$ , МДж/кг	13,92	15,44	14,44	0,69
Производительность теплоагрегата по сжигаемым отходам $B$ , т/ч	19	21	–	–

Таблица 3

Диапазоны изменения исходных данных моделирования выбросов вредных веществ при сжигании смеси ТБО и кислой смолки (60+40 мас. %)

Показатель	Минимум	Максимум	Среднее значение по испытаниям	Стандартное отклонение
Зольность пробы на рабочую массу $A^p$ , %	11,20	13,78	12,36	0,61
Массовая доля серы в рабочем топливе $S^p$ , %	4,14	4,81	4,51	0,34
Рабочая теплота сгорания топлива $Q^p$ , МДж/кг	13,05	14,01	13,64	0,52
Производительность теплоагрегата по сжигаемым отходам $B$ , т/ч	19	21	–	–

Таблица 4

Диапазоны изменения исходных данных моделирования выбросов вредных веществ при сжигании ТБО (100 мас. %)

Показатель	Минимум	Максимум	Среднее значение по испытаниям	Стандартное отклонение
Зольность пробы на рабочую массу $A^p$ , %	15,8	16,5	16,20	0,36
Массовая доля серы в рабочем топливе $S^p$ , %	1,23	1,43	1,30	0,10
Рабочая теплота сгорания топлива $Q^p$ , МДж/кг	3,67	5,11	4,43	0,72
Производительность теплоагрегата по сжигаемым отходам $B$ , т/ч	19	21	–	–

Подпрограмма «Моделирование выбросов» моделировала выбросы летучей золы, оксидов серы, оксидов азота и оксида углерода (II) в соответствии с алгоритмом методики. Подсистема позволяла производить ручную настройку количественного влияния на такие факторы, как процентное содержание кислой смолки и каменноугольных фусов в смеси, содержание серы, производительность котлоагрегата МСЗ. Подсистема «Метеорологические показатели» позволяла произвести подключение базы данных по метеорологическим показателям, характерным для г. Донецка (данные по температуре, скорости и направлению ветра). Для этого использовались блоки «Matlab-Function», где базы данных по перечисленным выше показателям были представлены в виде М-функций. М-функции характеризовали собой текущие данные среднесуточных показателей и обеспечивали связь объектной модели с базой данных о метеопоказателях г. Донецка, которые представлены в виде библиотеки Matlab. Метеорологические показатели были взяты за период 2016–2017 годов и представлены среднесуточными данными по температуре воздуха, направлению и скорости ветра. Пример данных относительно динамики температуры атмосферного воздуха на территории города Донецка в 2016–2017 годах представлен на рис. 3.

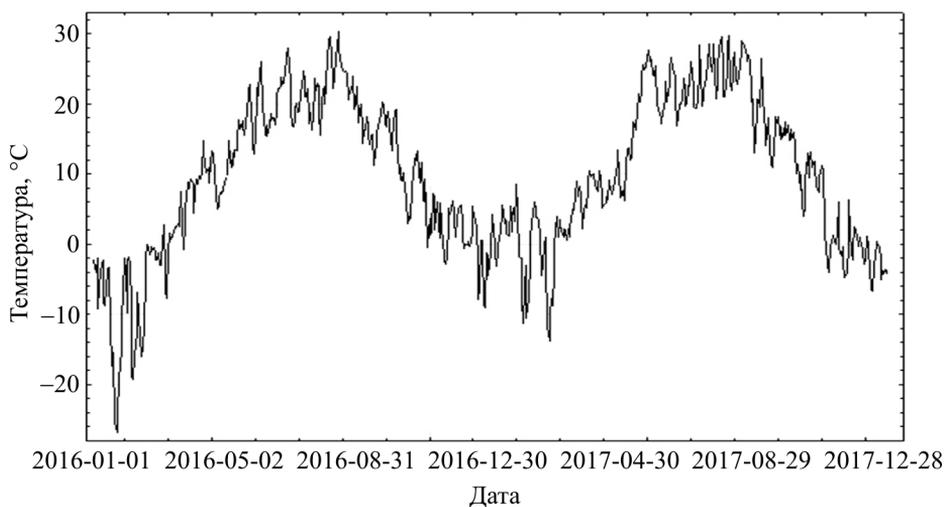


Рис. 3. Динамика температуры атмосферного воздуха на территории г. Донецка в 2016–2017 годах

Подсистема «Перенос примесей» производила моделирование загрязнения атмосферного воздуха на границе МСЗ в соответствии с методикой [9]. Результаты расчета записывались в файл, выводились на дисплей, представлялись в графическом и численном виде. Основными

функциями приведенной на рис. 2 компьютерной модели являлись перечисленные ниже процессы и операции.

1. Выбор варианта смеси ТБО и промышленных отходов и моделирование следующих данных: удельной теплоты сгорания топливной загрузки, МДж/кг; содержания золы в топливной загрузке, %; содержания общей серы в топливной загрузке, %; количества поступающих на сжигание отходов, т/ч.

2. Настройка и отображение входных параметров и визуализация переменных при различных сценариях протекания процесса с учетом заданных исходных данных.

3. Возможность графического построения моделей под конкретную конфигурацию технологии сжигания смесей отходов для оценки соответствующих выбросов вредных веществ.

4. Статистическое моделирование параметров и характеристик в процессе оценки выбросов с использованием генераторов случайных чисел.

5. Проведение расчетов по оценке выбросов вредных веществ для каждого сценария сжигания смесей твердых бытовых отходов и отходов коксохимических заводов.

6. Визуализация результатов в текстовом и графическом виде, возможность статистической обработки результатов моделирования.

7. Определение параметров выбросов и условий загрязнения атмосферного воздуха в процессе сжигания отходов на основе проведенных вычислительных экспериментов.

**Результаты и их обсуждение.** Таким образом, использование описанной выше имитационной модели позволило выполнить анализ загрязнения атмосферы в зоне воздействия МСЗ.

Мощность и параметры завода задавались в соответствии с табл. 1. Модель в каждом конкретном случае настраивалась под определенные условия сжигания отходов. Диапазоны изменения исходных данных при моделировании выбросов вредных веществ задавались в соответствии с табл. 2. Оценка достоверности модели осуществлялась путем настройки, проверки и визуализации данных по отдельным подпрограммам и модели в целом. Моделирование загрязнения атмосферы проводилось на границе санитарно-защитной зоны мусоросжигательного завода, размер которой принимался 1000 м. При моделировании метеорологические показатели и особенности микроклимата промышленно-городской территории принимались с учетом рекомендаций М.Е. Берлянда [15]. Среднесезонные и максимальные значения разности температуры воздуха принимались следующими: зима – среднее 1,0 °С (максимальное 6 °С); весна – соответственно 1,8 °С (9 °С); лето – 2,2 °С (11 °С) и осень – 1,4 °С (8 °С).

На рис. 4–5 приведен пример графиков распределения концентрации вредных веществ на границе санитарно-защитной зоны, полученных по результатам имитационного моделирования. Помимо графиков были получены числовые выборки данных значений приземной концентрации (50 000 значений) для различных вариантов сжигания смесей отходов.

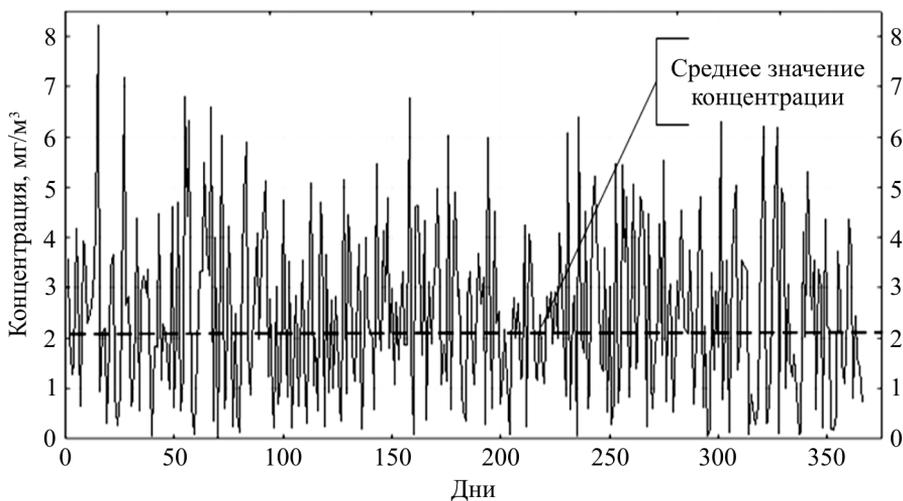


Рис. 4. Распределение концентрации оксида углерода (II) на границе санитарно-защитной зоны мусоросжигательного завода для сжигания смеси ТБО и каменноугольных фусов (60 + 40 мас. %)

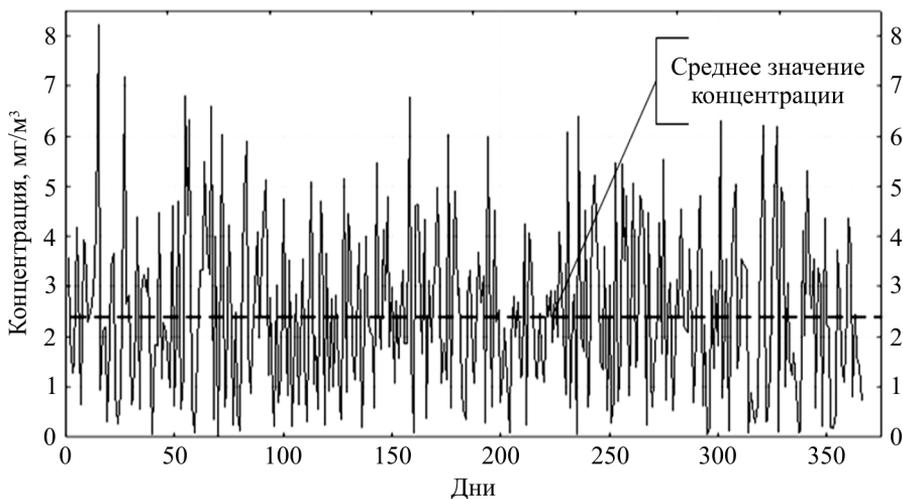


Рис. 5. Распределение концентрации оксида углерода (II) на границе санитарно-защитной зоны мусоросжигательного завода для сжигания смеси ТБО и кислой смолки (60 + 40 мас. %)

Как следует из данных обработки результатов моделирования (рис. 4, 5), на границе санитарно-защитной зоны наблюдается превышение предельно допустимой максимально-разовой концентрации по диоксидам азота и серы.

В случае проведения сжигания смеси ТБО и каменноугольных фусов (60 + 40 мас. %) уровень загрязнения атмосферы снижается по концентрации всех загрязняющих веществ, участвующих в процессе моделирования, в среднем на 10 %.

По условиям загрязнения атмосферы вариант сжигания ТБО и кислой смолки (табл. 2–4) занимает промежуточное положение между 1-м и 3-м вариантами подготовки смесей. Все это позволило сделать вывод, что в качестве рекомендуемого варианта сжигания смесей следует рассматривать вариант с добавлением каменноугольных фусов.

**Выводы.** По результатам проведенной работы была разработана имитационная модель оценки выбросов загрязняющих веществ комплекса по термической утилизации смесей ТБО и отходов КХП. Предложенная модель позволяет также проводить оценку загрязнения атмосферного воздуха в пределах зоны влияния мусоросжигательного предприятия. Принятый при моделировании подход, основанный на использовании графической среды Simulink, позволяет эффективно компоновать модели за счет использования стандартных модулей из графической библиотеки под конкретную схему термического сжигания твердых бытовых отходов. Полученная имитационная модель процесса сжигания смесей ТБО и отходов КХП отличается учетом стохастичности процессов эмиссии продуктов сгорания, а также использованием исходных данных по составу ТБО, представленных в виде вероятностных моделей. Результаты моделирования могут стать основой для разработки технологического регламента процесса совместной утилизации смеси ТБО и побочных продуктов КХП.

Исходя из анализа уровня загрязнения атмосферы в зоне воздействия предприятия по термической утилизации ТБО, установлено, что в качестве рекомендуемого варианта сжигания смеси следует рассматривать вариант со сжиганием смеси, содержащей ТБО в качестве углеродсодержащего компонента и смолистый отход коксохимических заводов (каменноугольные фусы) в качестве связующего вещества, при следующем соотношении компонентов – мас. %: ТБО – 60–65; каменноугольные фусы – 35–40. Рекомендуемой температурой сжигания является температура 1000 °С.

### Библиографический список

1. Калинин О.Н., Синенко Д.Э. Определение эффективного связующего топливной композиции на основе компонентов твердых бытовых отходов и отходов коксохимических заводов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2018. – № 2. – С. 33–46. – DOI: 10.15593/2409-5125/2018.02.03
2. Вайсман Я.И. Ретроспективный анализ и перспективы развития термических методов обезвреживания и утилизации термических методов обезвреживания и утилизации твердых бытовых отходов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2015. – № 1. – С. 6–23. – DOI: 10.15593/240985125/2015.01.01
3. Chandrappa R., Das D.B. Solid Waste Management, Environmental Science and Engineering. – London: Springer Heidelberg, 2015. – 414 p. – DOI: 10.1007/978-3-642-28681-0
4. Nicolas B., Oliver G. Municipal Waste Management in Europe: A Comparative Study in Building Regimes. – Paris: Seiten, 2010 – 232 p. – DOI: 10.1007/978-90-481-5292-6
5. Pawlowski L.V., Dudzinska M.R., Gonzalez M.A. Thermal Solid Waste Utilisation in Regular and Industrial Facilities. – New York: Springer International Publishing, 2000. – 474 p. – DOI: 10.1007/978-1-4615-4213-1
6. Малышевский А.Ф. Отходы – энергетический и материальный вторичный ресурс // Твердые бытовые отходы. – 2012. – № 10 (76). – С. 35–42.
7. Тугов А.Н., Родионов В.И. Энергетическая утилизация ТКО в России // Твердые бытовые отходы. – 2017. – № 8 (134). – С. 14–18.
8. Альтернативные топлива из твердых отходов: применение и легализация / В.В. Бушихин, О.Н. Кайгородов, Г.М. Полозов, О.Е. Федосеев // Экологический вестник России. – 2013. – № 5. – С. 42–45.
9. Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от мусоросжигательных и мусороперерабатывающих заводов: справ. пособие / науч. ред. Д.М. Беньямовский. – М.: Стройиздат, 1989. – 41 с.
10. Mensink C., Kallos G. Air Pollution Modeling and its Application XXV. – Cham: Springer International Publishing Switzerland, 2018. – 609 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-57645-9
11. Ekkehard H. Environmental Modeling Using MATLAB. Second Edition. – Berlin: Springer-Verlag Heidelberg, 2012. – 412 p. – DOI: 10.1007/978-3-642-22042-5
12. Shahab A. Data-Driven Modeling: Using MATLAB in Water Resources and Environmental Engineering. – Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2014. – 292 p. – DOI: 10.1007/978-94-007-7506-0
13. Kravivin F., Costas A., Soldatov V. New Ecoinformatics Tools in Environmental Science – Cham: Springer International Publishing Switzerland, 2015. – 903 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-13978-4
14. Branchini L. Waste-to-Energy Advanced Cycles and New Design Concepts for Efficient Power Plants. – Bologna: Springer International Publishing, 2015. – 143 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-13608-0
15. Berlyand M. Prediction and Regulation of Air Pollution. – Bonn: Kluwer Academic Publishers, 1991. – 312 p. – DOI: 10.1007/978-94-011-3768-3

### References

1. Kalinikhin O.N., Sinenko D.E. Opredeleniye effektivnogo svyazuyushchego toplivnoy kompozitsii na osnove komponentov tverdykh bytovykh otkhodov i otkhodov koksokhimicheskikh zavodov [Determination of effective binder for a fuel composition based on components of municipal solid waste and waste of coking plants]. *PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urban development*, 2018, no. 2 (30), pp. 33-46. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.02.03
2. Vaysman Ya.I. Retrospektivnyy analiz i perspektivy razvitiya termicheskikh metodov obezvrezhivaniya i utilizatsii termicheskikh metodov obezvrezhivaniya i utilizatsii tvordykh bytovykh otkhodov [Retrospective analysis and development prospects for the thermal waste neutralization and recycling]. *PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urban development*, 2015, no. 1 (16), pp. 6-23. DOI: 10.15593/240985125/2015.01.01

3. Chandrappa R., Das D.B. Solid Waste management, Environmental Science and Engineering. London: *Springer Heidelberg*, 2015, 414 p. DOI 10.1007/978-3-642-28681-0
4. Nicolas B., Oliver G. Municipal Waste Management in Europe: A Comparative Study in Building Regimes. Paris: *Seiten*, 2010, 232 p. DOI 10.1007/978-90-481-5292-6
5. Pawlowski L.V., Dudzinska M.R., Gonzalez M.A. Thermal solid waste utilisation in regular and industrial facilities. New York: *Springer International Publishing*, 2000, 474 p. DOI 10.1007/978-1-4615-4213-1
6. Malyshevskiy A.F. Otkhody – energeticheskiy i material'nyy vtorichnyy resurs [Waste – energy and material secondary resource]. *Tverdyye bytovyye otkhody*, 2012, no. 10 (76), pp. 35-42
7. Tugov A.N., Rodionov V.I Energeticheskaya utilizatsiya TKO v Rossii [Waste – energy and material secondary resource]. *Tverdyye bytovyye otkhody*, 2017, no. 8 (134), pp. 14-18
8. Bushihin V.V., Kaygorodov O.N., Polozov G.M., Fedoseev O.E. Alternativnyie topliva iz tverdyih othodov primenenie i legalizatsiya [Alternative fuels from solid waste application and legalization]. *Ekologicheskiy vestnik Rossii*, 2013, no. 5, pp. 42-45
9. Benyamovsky D.M. Metodicheskiye ukazaniya po raschetu vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu ot musoroszhigatel'nykh i musoropererabatyvayushchikh zavodov [Guidelines for calculating emissions of pollutants into the atmosphere from incinerators and recycling plants]. Moscow: *Stroyizdat*, 1989, 41 p.
10. Mensink C., Kallos G. Air Pollution Modeling and its Application XXV. Cham: *Springer International Publishing Switzerland*, 2018, 609 p. DOI: 10.1007/978-3-319-57645-9
11. Ekkehard H. Environmental Modeling Using MATLAB. Second Edition. Berlin: *Springer-Verlag Heidelberg*, 2012, 412 p. DOI: 10.1007/978-3-642-22042-5
12. Shahab A. Data-Driven Modeling: Using MATLAB in Water Resources and Environmental Engineering. Dordrecht: *Springer Science+Business Media*, 2014, 292 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7506-0
13. Krapivin F., Costas A., Soldatov V. New Ecoinformatics Tools in Environmental Science. Cham: *Springer International Publishing Switzerland*, 2015, 903 p. DOI: 10.1007/978-3-319-13978-4
14. Branchini L. Waste-to-Energy Advanced Cycles and New Design Concepts for Efficient Power Plants. Bologna: *Springer International Publishing*, 2015 – 143 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-13608-0
15. Berlyand M. Prediction and Regulation of Air Pollution. Bonn: *Kluwer Academic Publishers*, 1991, 312 p. DOI: 10.1007/978-94-011-3768-3

Получено 13.12.2018

**O. Kalinihin**

**ENVIRONMENTAL JUSTIFICATION  
OF A RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY OF JOINT PROCESSING  
OF COMPONENTS OF MUNICIPAL SOLID WASTE  
AND WASTE OF BY-PRODUCT COKING INDUSTRY**

The growth of production and recycling of secondary fuels based on various types of industrial and municipal solid waste is a steady trend in the development of resource-saving technologies in the industrialized countries of the world. Branch-wise solutions in this field of activity are focused primarily on maximizing resource potential and minimizing possible negative impact on the environment and human health. This article is a logical continuation of the author's research aimed at justifying and subsequent implementation of the technology of joint processing of components of municipal solid waste and waste of by-product coking industry with the aim of obtaining and subsequent thermal utilization of fuel compositions. The results of the environmental assessment of the technology of joint thermal utilization of fuel compositions based on components of municipal solid waste and

waste of by-product coking industry are presented. A simulation model of the process of joint thermal utilization of municipal solid waste and waste of by-product coking industry was developed, with subsequent prediction on its basis of the composition of the combustion products and the nature of the pollutants emissions from the incineration of waste mixtures. Based on the data of simulation modeling of the dispersion of pollutants at the boundary of the sanitary protection zone of the incineration plant, an assessment of the potential impact on the environment is given.

**Keywords:** municipal solid waste, resinous waste of by-product coking industry, co-processing, fuel compositions, incineration, simulation, dispersion of impurities.

**Олег Николаевич Калинихин** (Донецк, Украина) – канд. техн. наук, доцент кафедры «Прикладная экология и охрана окружающей среды», Донецкий национальный технический университет (83001, Донецк, ул. Артема, 58, e-mail: kalinihin@gmail.com).

**Kalinihin Oleg** (Donetsk, Ukraine) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Ecology and Environment Protection, Donetsk National Technical University (83001, Donetsk, Artema st., 58, e-mail: kalinihin@gmail.com).

DOI 10.15593/2409-5125/2019.02.03

УДК 628.336.7

**М.С. Дьяков**

Уральский государственный научно-исследовательский институт  
региональных экологических проблем

## **СТРАТЕГИЯ ОБРАЩЕНИЯ С ТВЕРДЫМИ ОТХОДАМИ КОММУНАЛЬНЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Рассмотрены методы обращения с твердыми отходами коммунальных очистных сооружений, направления переработки и утилизации, реализованные за рубежом и в России. Дана оценка существующим стратегиям обращения с осадками сточных вод и перспективным направлениям их переработки и утилизации, обеспечивающих снижение экологической нагрузки на объекты окружающей среды, использования их ресурсного и энергетического потенциала экологически безопасными, технически возможными и экономически доступными методами.

Предложена классификация населенных пунктов в зависимости от численности населения, структуры промышленности, реализованной на той или иной урбанизированной территории. Выявлена зависимость состава сточных вод и осадка, образующегося в процессе их очистки, от масштабов урбанизированных территорий. Определены критерии выбора технологии обращения с осадком сточных вод при реализации стратегии развития предприятий коммунального хозяйства.

Установлено, что для крупных мегаполисов наиболее приемлемым методом переработки осадков сточных вод (ОСВ) будут служить термические методы с перспективными направлениями использования продуктов переработки. Малые населенные пункты и средние города в силу низкой токсичности образующихся твердых отходов коммунальных очистных сооружений могут их использовать в качестве удобрений согласно действующему законодательству. Приведенные в публикации данные позволят предприятиям коммунального хозяйства снизить риски выбора низкоэффективной и экономически нецелесообразной технологии при переходе на новый уровень обращения с ОСВ.

**Ключевые слова:** осадки сточных вод, избыточный активный ил, ресурсный и энергетический потенциал, перспективные направления переработки, сжигание, пиролиз, сбраживание, удобрения, утилизация.

Процесс очистки коммунальных сточных вод сопровождается образованием твердых отходов, которые представляют собой многокомпонентные системы. К твердым отходам коммунальных очистных сооружений согласно общепринятой классификации относятся отходы первичных отстойников – сырой первичный осадок и отходы вторичных отстойников – избыточный

---

Дьяков М.С. Стратегия обращения с твердыми отходами коммунальных очистных сооружений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2019. – № 2. – С. 35–48. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.03

Dyakov M. Strategy of Handling of Municipal Wastewater Treatment Facilities Sewage Sludge. PNRPU. Applied Ecology. Urban Development. 2019. No. 2. Pp. 35-48. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.03

активный ил. Первичный осадок образуется на стадии механической очистки (первичного осветления) и является, таким образом, результатом применяемого способа физического отделения осаждающихся веществ от воды. Цвет такого осадка – от серо-черного и серо-коричневого до желтого. Осадок содержит преимущественно легкораспознаваемые составные вещества, такие как фекалии, остатки фруктов, бумага, туалетная бумага и пр. После забора из системы в нем быстро начинается процесс брожения, сопровождающийся соответствующим запахом. Органический отход, накапливающийся на биологической стадии очистки, называется также вторичным или избыточным осадком и образуется вследствие увеличения численности микроорганизмов в процессе очистки сточных вод. Такой осадок имеет буроватый цвет, при этом он отличается большей гомогенностью, нежели первичный осадок [1].

В процессе обращения с твердыми отходами коммунальных очистных сооружений, как правило, их смешивают, при этом образуется смесь осадков сточных вод и избыточного активного ила. В дальнейшем полученную смесь подвергают процессу обезвоживания с использованием механического или термического воздействия с последующей ее утилизацией или размещением в окружающей среде [2]. С целью исключения терминологического противоречия смесь осадка и избыточного активного ила будем называть осадком сточных вод (ОСВ). Вследствие негетерогенного характера таких смесей и сильных различий в отношении содержания их составных частей найти или определить единый стандартный состав осадков сточных вод не представляется возможным, можно лишь представить состав типового осадка сточных вод, который образуется на типовых коммунальных очистных сооружениях.

ОСВ – сложный комплекс, который состоит на 60 % (в пересчете на сухое вещество) из органической части и на 40 % из минеральной составляющей. Органическая часть представляет собой биомассу, включающую частично окисленные загрязняющие вещества сточных вод, а также биогенные элементы, такие как азот- и фосфорсодержащие соединения, соли калия. Наряду с питательными веществами для растений ОСВ содержит органические вредные вещества, фармакологические группы препаратов (гормональные вещества, антибиотики и др.), тяжелые металлы, патогенные организмы и иные компоненты, оказывающие существенное влияние на выбор метода обращения с данным видом отхода [3].

Рост объемов образования ОСВ и содержания в них опасных загрязняющих веществ в количествах, которые могут формировать неприемлемо высокий уровень экологической техногенной нагрузки на объекты окружающей среды и население, привели к эволюции стратегий обращения с ними.

В настоящее время существует широкий спектр методов переработки ОСВ. Основное распространение в мировой и отечественной практике получили следующие методы:

- термические (сжигание, пиролиз, газификация);
- сбраживание (аэробное и анаэробное);
- получение удобрений;
- размещение на иловых картах или илонакопителях;
- совместное размещение на полигонах с твердыми коммунальными отходами;
- компостирование.

До второй половины прошлого века в нашей стране и европейских странах традиционно ОСВ достаточно широко использовали после относительно малозатратных методов обработки в качестве заменителя натуральных удобрений, материалов для кондиционирования почв, а при отсутствии спроса на них избыточное количество ОСВ направлялось на захоронение. Действительно, осадки являются ценным сырьевым материалом, который содержит в своем составе необходимые для растений биогенные элементы питания, такие как азот, фосфор и калий, а также значительное количество органического вещества и микроэлементов, необходимых для повышения плодородия почв [4]. Применение описанного подхода по отношению к ОСВ можно также объяснить развитием промышленности, малоизученностью отхода и отсутствием методологических подходов к комплексному анализу риска для населения и природной среды.

В настоящее время в Российской Федерации и ряде европейских стран существует ряд ограничений на депонирование ОСВ и их использование в качестве удобрений. Накладываемые ограничения связаны с требованиями санитарных норм к эпидемиологической и токсикологической безопасности ОСВ<sup>1</sup>. Нормы внесения осадков устанавливаются в зависимости от их удобрительной ценности и содержания тяжелых металлов в почвах и осадках. Запрещается внесение осадков, если содержание тяжелых металлов в них превышает нормы, установленные ГОСТ Р 54651–2011 «Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия». Директивные документы ЕС регламентируют применение ОСВ в зависимости от способа их переработки в следующих областях (табл. 1).

Европейский Союз вносит изменения в директиву 86/278/ЕС по охране окружающей среды, особенно почв, при использовании ОСВ в сельском хозяйстве в сторону ужесточения норм и правил [5]. Наблюдаемая тенденция

---

<sup>1</sup> СанПиН 2.1.7.573–96. «Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения».

в перспективе может привести к ограничению возможности применения ОСВ в качестве удобрения или даже полностью исключит ее. Так, непосредственное применение ОСВ в сельском хозяйстве в качестве удобрения или вывоз для захоронения на полигоны твердых коммунальных отходов во многих странах будут запрещены. Проблема использования ОСВ в качестве удобрений усугубляется еще тем, что их неорганический состав предугадать очень сложно, так как он зависит от степени загрязнения поступающих сточных вод и от условий процесса биологической очистки.

Таблица 1

Направления использования ОСВ в зависимости  
от глубины его переработки

№ п/п	Области применения	Степень переработки
1	Пастбища, кормовые культуры	Высокая
2	Сельскохозяйственные поля, выращивание фруктов и овощей, сады, виноградники	Высокая
3	Парки, зоны отдыха	Средняя
4	Леса, восстанавливаемые территории	Низкая

Еще одним продуктивным направлением переработки ОСВ является сбраживание в метантенках. В результате сбраживания достигаются три основные цели: стабилизация, обеззараживание осадка и уменьшение его объема [6]. Кроме того, процесс сбраживания ОСВ сопровождается образованием биогаза, при сжигании которого может быть получена тепловая и электрическая энергия. Биогаз более чем наполовину состоит из метана, примерно на 60 %, кроме того, в нем содержится диоксид углерода, около 35 %, а также другие газы – водяной пар, сероводород, монооксид углерода, азот и пр. При анаэробном сбраживании происходит разложение органической составляющей ОСВ под действием анаэробных бактерий, микроорганизмов. Следует отметить, что деятельность анаэробных бактерий развивается при определенных благоприятных условиях, которые должны обеспечиваться на протяжении всего периода переработки отхода (температура, химический состав ОСВ, содержание в нем токсичных веществ, влажность, содержание ионов тяжелых металлов) [7].

Осадок, сброженный в термофильных условиях, может использоваться в качестве удобрений как в жидком, так и в обезвоженном состоянии. Реализация технологии переработки ОСВ методом сбраживания в мегополисах традиционно заканчивается вывозом сброженного осадка на полигоны твердых коммунальных отходов или его размещением на иловых

картах или илонакопителях. Подобная реализация метода переработки ОСВ связана с тем, что ионы тяжелых металлов способны ингибировать процессы биохимической деструкции и значительно замедлять скорость их протекания. Процесс деструкции ОСВ сопровождается уменьшением его органической составляющей, следовательно, происходит концентрирование ионов тяжелых металлов в единице массы отхода. В результате такого процесса переработки полученный продукт обладает высокой токсичностью и становится непригоден для использования в качестве удобрения для сельского хозяйства, озеленения городской территории или лесовосстановительных работ. Положительным аспектом реализации данной технологии в мегаполисах является выработка метана, который может использоваться для нужд самого предприятия коммунального хозяйства, например для постоянного подогрева самого осадка. Теплотворная способность газа в среднем составляет  $21 \text{ МДж/м}^3$ , что существенно ниже любого из традиционных видов топлива [7].

Наиболее распространенный метод переработки ОСВ, получивший внедрение на территории Российской Федерации, заключается в утилизации осадка путем его размещения на иловых картах и/или илонакопителях, а также совместном складировании на полигонах с твердыми коммунальными отходами. Данный подход к обращению с ОСВ не отвечает современным требованиям и приводит к задалживанию значительных земельных ресурсов, безвозвратной потере энергетического и ресурсного потенциала, а также загрязнению объектов окружающей среды. Существуют сложности с переработкой ОСВ как вновь образующихся, так и накопленных в разные годы эксплуатации очистных сооружений. Осложняет проблему переработки накопленных осадков сточных вод факт использования разных технологических приемов и реагентного хозяйства в разные годы эксплуатации очистных сооружений. Также в процессе длительной биodeградации отхода происходит концентрирование ионов тяжелых металлов в единице массы отхода, что снижает вероятность использования его в качестве удобрения, технического грунта или рекультивационного материала.

Наибольший интерес в настоящее время представляют методы термической переработки ОСВ, позволяющие использовать ресурсный и энергетический потенциал отхода [8]. Следует отметить, что основными направлениями термической переработки ОСВ является пиролиз (низкотемпературный и среднетемпературный), газификация (высокотемпературный пиролиз) и окислительное обезвреживание (сжигание).

С использованием многолетнего опыта обращения с ОСВ сформировалась мировая практика применения наиболее оптимального метода его переработки – огневое обезвреживание (сжигание). Данный метод широко используется в странах с развитой и дифференцированной экономикой, максимально использующих все доступные им ресурсы и при этом старающихся заботиться об окружающей среде [9]. Метод сжигания ОСВ является наиболее надежным и отработанным термическим методом переработки данного вида отхода. В мировой практике используется широкая номенклатура установок сжигания осадков, в основном процесс проводят в реакторах с псевдооживленным слоем, или еще их называют реакторы с «кипящим» слоем. Данный метод переработки ОСВ позволяет использовать задолженный энергетический потенциал отхода путем преобразования тепла отходящих газов посредством силовых агрегатов различной конструкции в электрическую энергию. Также встречается и использование тепла отходящих газов в качестве агента-теплоносителя для отопления районов города и собственных нужд [10, 11].

Еще одним продуктом переработки ОСВ методом сжигания является зола утилизации. В настоящее время зола, получаемая на заводах сжигания, в основном вывозится на полигоны твердых коммунальных отходов или складывается совместно с отходами производства и потребления. Зольный продукт, полученный при сжигании осадков сточных вод, представляет собой пылевидную фракцию, в состав которой входят следующие соединения: двуокись кремния, оксидные формы пниктогенов, тяжелые металлы, которые относятся к приоритетным загрязняющим веществам. Токсичность золы зависит от состава ОСВ, а следовательно, от качества самих сточных вод, поступающих на очистку. При этом доминирующую роль играет промышленный сектор, располагающийся на конкретной урбанизированной территории и осуществляющий отвод сточных вод на городские очистные сооружения, аналогичное влияние может оказывать и малый бизнес. Примером может служить снижение поступления ртути и кадмия, что объясняется уменьшением использования этих веществ в различных изделиях, например внедрением сепараторов амальгамы в стоматологических клиниках (рис. 1), ратификацией Минаматской конвенции о ртути.

Процесс сжигания ОСВ реализован на территориях Российской Федерации, имеющих соответствующие объемы финансирования, а также целевые программы и возможность получения международных грантов. К таким территориям можно отнести города федерального значения, которые, в свою очередь, являются самостоятельными административными

единицами верхнего уровня наряду с республикой, краем, автономным округом и областью. Известен опыт Санкт-Петербурга, построившего заводы с привлечением источников финансирования Европейского Союза в рамках программы по снижению уровня загрязнения акватории Балтийского моря. Построенная заводская конъюнктура по утилизации ОСВ на территории Санкт-Петербурга позволяет решить важную проблему утилизации осадка, но не решает проблему использования отхода сжигания – зольного остатка [12].

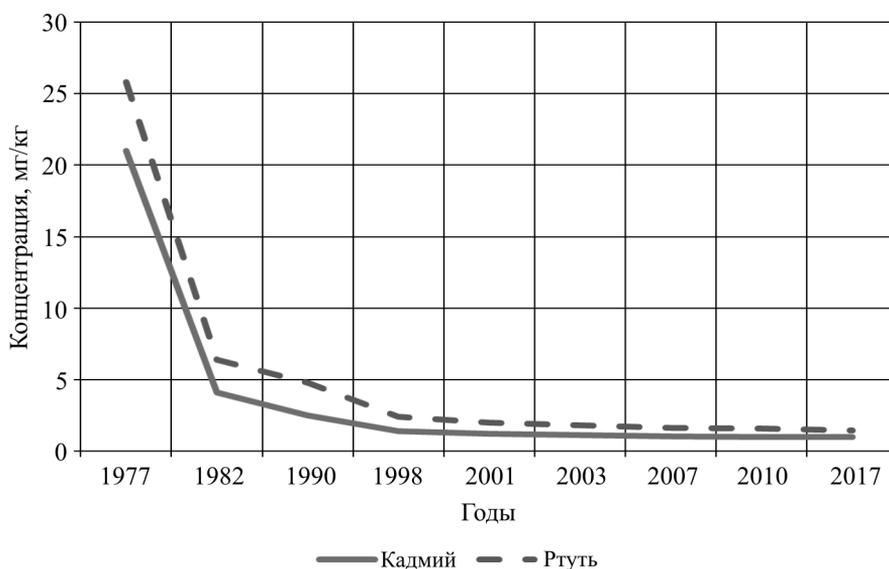


Рис. 1. Показатели концентрации кадмия и ртути в осадках сточных вод за период 1977–2017 годов

Описанный термический метод переработки осадков сточных вод позволяет решить проблему утилизации отхода путем снижения объема и частичного использования его энергетического потенциала. В свою очередь, одновременно с уменьшением объема перерабатываемого ОСВ происходит концентрирование ионов тяжелых металлов в единице массы золы, что значительно ограничивает возможные области ее применения. Также утилизация ОСВ методом прямого сжигания или газификации отхода является капиталоемким и энергозатратным процессом. Метод окислительного обезвреживания ОСВ позволяет решить проблему его утилизации регионам, имеющим соответствующее финансирование. В дотационных регионах, на наш взгляд, может найти свое применение перспективный термический метод утилизации ОСВ – пиролиз.

Несмотря на тот факт, что пиролиз осадков сточных вод – это хорошо исследованный процесс, не создано ни одной точной схемы механизма реакции. Причиной этого является очень сложная природа термического разложения ОСВ, которая состоит из множества взаимосвязанных реакций с большим количеством реагентов, промежуточных соединений, полупродуктов и продуктов реакции [13]. Основным продуктом пиролиза является карбонизат, который обладает сорбционными свойствами и может быть использован в качестве сорбента. Также остаточное количество углерода в карбонизате позволяет использовать его в качестве альтернативного твердого топлива. Еще одним продуктом пиролиза является конденсат, который по составу близок к печному топливу. Имеются наработки по улучшению его качественных характеристик. Также при пиролизе образуется большое количество неконденсирующихся газов, обладающих калорийностью и позволяющих вести процесс в автотермическом режиме.

Как видно из представленных данных, существует широкий спектр различных методов обращения с ОСВ, но отсутствует алгоритм и методология выбора конкретного метода для конкретной территории. В настоящей статье будут описаны лишь концептуальные подходы к выбору эффективного и экономически целесообразного метода переработки ОСВ.

Собственные исследования и анализ научно-технических данных, опубликованных в отечественных и зарубежных источниках, позволили установить зависимость состава осадков сточных вод, образующихся на коммунальных очистных сооружениях, от численности населения, проживающего на конкретной урбанизированной территории. Автором предлагается следующая классификация населенных пунктов Российской Федерации по численности населения:

- крупные и сверхкрупные города (население 1 млн человек и более);
- большие и крупные города (население от 250 тыс. человек до 1 млн человек);
- средние города (население от 50 тыс. человек до 100 тыс. человек);
- малые города и поселки (население менее 50 тыс. человек).

Малые города и поселки, как правило, не имеют централизованных очистных сооружений и представляют собой частный сектор, который не в полной мере снабжен выгребными ямами или септиками. Отходы, образующиеся в результате жизнедеятельности, вывозятся в места размещения отходов и на очистные сооружения, располагающиеся в близлежащих средних городах. В связи с этим в дальнейшем данные населенные пункты рассматривать нецелесообразно.

Средние города, находясь на удалении от крупных и сверхкрупных городов, технически развитых городов, как правило, имеют аналогичные системы очистки сточных вод. Однако осадки сточных вод, образующиеся на этих очистных сооружениях, по составу, характеру загрязнений и бактериальной обсемененности значительно отличаются. ОСВ, образующиеся в таких городах, как правило, относятся IV–V классу опасности, и объемы их образования незначительные. На рис. 2 представлен состав ОСВ малых населенных пунктов.

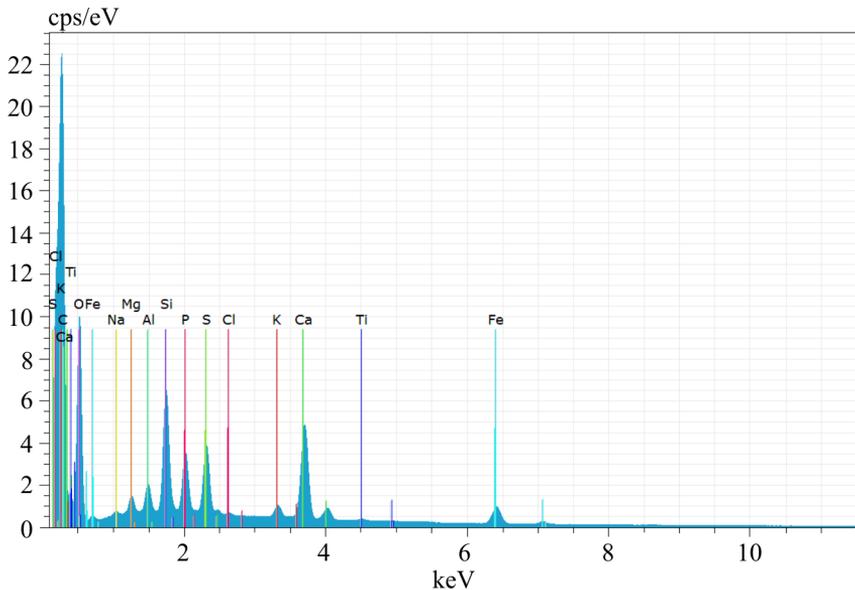


Рис. 2. Элементный состав ОСВ малых населенных пунктов

Как видно из рис. 2, элементный состав ОСВ малых населенных пунктов представлен незначительной номенклатурой тяжелых металлов в концентрациях, не превышающих ПДК/ОДК, установленных для почв. Следовательно, данные ОСВ могут быть использованы в качестве удобрения после предварительного обезвоживания или предварительной обработки методом сбраживания. Известно, что содержание тяжелых металлов в осадках носит лимитирующий характер при использовании ОСВ в качестве удобрения для сельского хозяйства.

Большие и крупные города можно разделить по следующему основанию:

- с участием промышленного сегмента в формировании состава сточных вод,
- без участия промышленного сегмента.

Осадки, получаемые от очистки сточных вод, формируемых, в том числе, промышленными предприятиями, имеют большое количество микроорганизмов, яиц гельминтов, тяжелых металлов в концентрациях значительно превышающих ПДК, установленных для почв (табл. 2).

Таблица 2

## Состав типового осадка сточных вод больших и крупных городов

№ п/п	Показатель	Единица измерения	Значение	
			ОСВ текущего выхода	
2	Массовая доля влаги	%	78	
3	Массовая доля сухого вещества	%	22	
4	Реакция среды	pH	7,3	
5	Массовая доля золы (минеральные вещества)	% на сухое в-во / % фактической влажности	34/7,48	
6	Потери при прокаливании (органические вещества)		66/14,52	
7	Массовая доля общего азота		3,1/0,68	
8	Массовая доля общего фосфора		3,6/0,79	
9	Массовая доля общего кремния		16,4/3,61	
10	Массовая доля общего алюминия		2,59/0,57	
11	Массовая доля общего магния		1,12/0,25	
12	Массовая доля общего кальция		4,55/1,0	
13	Массовая доля общего калия		0,47/0,10	
14	Массовая доля общего железа		2,69/0,59	
15	Массовая доля натрия		0,39/0,09	
16	Массовая доля титана		0,19/0,04	
17	Массовая доля марганца		0,063/0,01	
18	Ртуть		0,5/0,000 1	
19	Хром		510/0,011 2	
20	Свинец		45/0,001	
21	Кадмий		20/0,000 04	
22	Никель		140/0,003 1	
23	Медь		1300/0,028 6	
24	Цинк		780/0,017 2	
25	Мышьяк		4,4/0,000 1	
26	Удельная активность техногенных радионуклидов		Относительные единицы	< 1
27	Эффективная активность естественных радионуклидов		Бк/кг	9,9 ± 6,6
28	Бактерии группы кишечной палочки, индекс		Клеток/г	100
29	Патогенные микроорганизмы, в том числе сальмонеллы		Клеток/г	Не обнаружены
30	Жизнеспособные яйца гельминтов и цисты простейших	Экземпляров/100 г	Не обнаружены	

Окончание табл. 2

№ п/п	Показатель	Единица измерения	Значение
			ОСВ текущего выхода
31	Наличие жизнеспособных личинок и куколок синантропных мух	Экземпляров с площади 20·20 см	Не обнаружены
32	БПК <sub>п</sub> водной вытяжки (1:1)	мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	8300
33	ХПК водной вытяжки (1:1)	мг/дм <sup>3</sup>	13 400
34	Нефтепродукты	г/кг сухого в-ва / % фактической влажности	4,57/0,1
35	Класс опасности		IV

Тяжелые металлы, поступающие в почву, ухудшают ее биологические, химические показатели и нарушают гомеостаз. Кроме того, металлы способны аккумулироваться в организмах и растениях и, как следствие, передаваться в возрастающих количествах по трофической цепи. Особенно опасны ртуть, цинк, свинец, кадмий, мышьяк, так как они, поступая с пищей в организм человека и высших животных, могут вызвать угнетение живого организма. Коэффициент материальной кумуляции колеблется у них от сотен до нескольких тысяч [14, 15]. Преимущественно такие ОСВ должны перерабатываться термическими методами с получением полупродуктов, вовлекаемых в процесс производства строительных материалов и конструкций.

Если сточные воды больших и крупных городов образованы преимущественно бытовыми стоками, то осадки, получаемые при их очистке, могут быть использованы в качестве удобрений для озеленения городской среды (парков, скверов) и лесовосстановительных работ.

Что касается крупных и сверхкрупных населенных пунктов, то они претерпевают административно-территориальное деление на административные округа, районы и поселения. В связи с этим устанавливаются несколько аэрационных станций, которые представляют собой очистные сооружения, по производительности сравнимые с очистными сооружениями больших и крупных городов. Соответственно, и методы обращения с ОСВ для данной категории населенных пунктов будут схожи с методами, реализуемыми в больших и крупных городах.

Для данных урбанизированных территорий наиболее приемлемыми методами переработки ОСВ являются термические, позволяющие минимизировать объем образующегося отхода. В настоящее время имеется широкий спектр исследований, направленных на доведение продуктов термической переработки ОСВ до товарных продуктов или полупродуктов, имеющих свои рыночные ниши.

Выбор конкретной стратегии развития предприятия коммунального хозяйства должен также основываться на критериальном подходе. Автором предлагается ряд критериев, которые должны учитываться при разработке стратегии обращения с вновь образованными и накопленными осадками сточных вод, а именно:

1. Объемы образования ОСВ на предприятии коммунального хозяйства.
2. Качественный и количественный состав ОСВ.
3. Наличие рынка сбыта продуктов и полупродуктов, получаемых в результате переработки ОСВ.
4. Наличие нормативной правовой базы для использования продуктов и полупродуктов переработки ОСВ.
5. Инвестиционная привлекательность реализуемого проекта.
6. Перспективы развития конкретной территории Российской Федерации.
7. Наличие соответствующего объема финансирования, позволяющего реализовать выбранную стратегию.

**Заключение.** В настоящее время распространенным методом обращения с ОСВ в Российской Федерации остается временное размещение на илонакопителях или иловых картах с целью глубокого обезвоживания и дальнейшее размещение на полигонах ТКО. Еще одним общеприменимым методом является метод сбраживания, однако твердый остаток (сброженный ОСВ) вывозится также на полигон ТКО. Подобное обращение не отвечает современным экологическим требованиям и стандартам. В настоящей статье рассмотрен ряд перспективных технологий переработки ОСВ с получением товарных продуктов и полупродуктов, имеющих рыночные ниши и ценовой сегмент ниже аналогов. Предложен критериальный подход выбора той или иной технологии в зависимости от плотности населения урбанизированной территории, развития промышленного сегмента.

#### Библиографический список

1. Водоотведение / Ю.В. Воронов, Е.В. Алексеев [и др.]. – М.: АСВ, 2014. – 413 с.
2. Effect of ultrasound pretreatment on sludge digestion and dewatering characteristics: Application of Particle Size Analysis / E.J. Martínez, J.G. Rosas, A. Morán, X. Gómez // Water. – 2015. – Vol. 7 (11). – P. 6483–6495.
3. Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland / B. Wiechmann, C. Dienemann, Dr. C. Kabbe, S. Brandt, Dr. I. Vogel, Dr. A. Roskosc. – Publisher Umweltbundesamt, 2013. – 164 p.
4. Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland / Dr. I. Vogel, Dr. A. Roskosc // Broschürenbestellung Anschrift: Umweltbundesamt c/o GVP Postfach 30 03 61 | 53183 Bonn.
5. Дрозд Г.Я., Хвортова М.Ю. Биотехнологические вопросы утилизации осадков сточных вод // Агротехника и энергосбережение. – 2014. – № 3. – С. 112–126.
6. Основные результаты промышленных испытаний технологии сбраживания осадка с рециклом биомассы / М.Н. Козлов, М.В. Кеврина, Г.А. Колбасов, А.М. Агарев, П.С. Шашкина // Водоснабжение и санитарная техника, 2015. – № 5. – С. 60–65.

7. Ветошкин А.Г. Переработка промышленных и бытовых отходов (Технология и техника защиты литосферы): учеб. пособие-практикум для вузов. – М.: АСВ, 2015. – 189 с.
8. Рязанцев А.А., Глазков Д.В., Просьяников Е.Д. Очистка биогаза от сероводорода // Вестник Сибирского государственного университета путей и сообщений. – 2016. – № 3. – С. 19–24.
9. Хорева П.В., Бернадинер И.М., Степанова Т.А. Эффективная технология высокотемпературного обезвреживания осадков сточных вод // Экология энергетики – 2017: тр. междунар. науч. конф. молодых ученых и специалистов. – М., 2017. – С. 92–93.
10. Алексашина В.В. Экология города. Мусоросжигательные заводы // Градостроительство. – 2014. – № 4. – С. 77–86.
11. Хаустов А.П., Редина М.М. Отходы – в энергию: оценка экологических последствий с учетом супертоксичных выбросов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2015. – № 1. – С. 18–24.
12. Рублевская О.Н., Пробриский М.Д. Реконструкция завода сжигания осадков на центральной станции аэрации Санкт-Петербурга // Водоснабжение и санитарная техника. – 2017. – № 1. – С. 52–57.
13. Долина Л.Ф., Машихина П.Б. Осадки сточных вод: проблемы и решения. – Днепропетровск: Континент, 2014. – 213 с.
14. Басуров В.А., Зазнобина Н.И. Химическая безопасность. – Н. Новгород: Изд-во Национ. иссл. Нижегор. гос. ун-та им. Н.И. Лобачевского, 2016. – 98 с.
15. Ибрагимова Б.Б., Юсубов Ф.В. Математическое моделирование процесса адсорбции тяжелых металлов из сточных вод // Химия, физика, биология, математика: теоретические и прикладные исследования: сб. ст. по материалам IX–X междунар. науч.-практ. конф. – 2018. – № 3-4 (5). – С. 61–64.

#### References

1. Voronov Yu.V., Alekseev E.V. i dr., Vodootvedenie [Water removal]. Moscow: Izdatel'stvo ASV, 2014, pp. 413.
2. Elia Judith Martínez, Jose Guillermo Rosas, Antonio Moránand Xiomar Gómez. Effect of ultrasound pretreatment on sludge digestion and dewatering characteristics: Application of Particle Size Analysis // *Water* 2015, 7(11), pp. 6483-6495.
3. Benjamin Wiechmann, Claudia Dienemann, Dr. Christian Kabbe, Simone Brandt, Dr. Ines Vogel, Dr. Andrea Roskosch., Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. – Publisher Umweltbundesamt, 2013, p. 164.
4. Dr. Ines Vogel, Dr. Andrea Roskosch KLÄRSCHLAMM ENTSGUNG IN DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND Broschürenbestellung Anschrift: Umweltbundesamt c/o GVP Postfach 30 03 61 | 53183 Bonn.
5. Drozd G.Ya., Hvortova M.Yu. Biotekhnologicheskie voprosy utilizacii osadkov stochnyh vod [Biotechnological issues of disposal of sewage sludge] // *Agrotehnika i ehnergoberezhenie*. 2014, no. 3, pp. 112-126.
6. Kozlov M.N., Kevbrina M.V., Kolbasov G.A., Agarev A.M., Shashkina P.S. Osnovnye rezul'taty promyshlennyh ispytaniy tekhnologii sbrazhivaniya osadka s reciklom biomassy [The key results of the full-scale studies of sludge digestion technology with biomass recycle]. *Water supply and sanitary technique*. 2015, no. 5, pp. 60-65.
7. Vetoshkin A.G. Pererabotka promyshlennyh i bytovykh othodov (Tekhnologiya i tekhnika zashchity litosfery) [Processing of industrial and household waste (Technology and technology of protection of the lithosphere)]: uchebnoe posobie-praktikum dlya vuzov. Moscow: Izd-vo ASV, 2015, pp. 189.
8. Ryazancev A.A., Glazkov D.V., Prosyaniikov E.D. Ochistka biogaza ot serovodoroda [Biogas purification from hydrogen sulfide]. *Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej i soobshchenij*. 2016, no. 3, pp. 19-24.
9. Horeva P.V., Bernadiner I.M., Stepanova T.A. EHfektivnaya tekhnologiya vysokotemperaturnogo obezvezhivaniya osadkov stochnyh vod [Efficient technology of high-temperature disposal of sewage sludge] // *Trudy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii molodyh uchennyh i specialistov "EHKOLOGIYA EHNERGETIKI – 2017"*. Izdatel'skij dom MEHI. Moscow, 2017, pp. 92-93.
10. Aleksashina V.V. EHkologiya goroda. Musoroszhigatel'nye zavody [Ecology of the city. Incinerators]. *Gradostroitel'stvo*. 2014, no. 4, pp. 77-86.

11. Haustov A.P., Redina M.M. Othody – v ehnergiyu: ochenka ehkologicheskikh posledstvij s uchytom supertoksichnyh vybrosov [Waste – to energy: environmental impact assessment with supertoxic emissions]. *Ehnergobezopasnost' i ehnergoberezhenie*, 2015, no. 1, pp. 18-24.

12. Rublevskaya O.N., Probirskij M.D. Rekonstrukciya zavoda szhiganiya osadkov na central'noj stancii aehracii Sankt-peterburga [Reconstruction of the incineration plant at the central aeration station of St. Petersburg]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*, no. 1, 2017, pp. 52-57.

13. Dolina L.F., Mashihina P.B., Osadki stochnyh vod: Problemy i resheniya [Sewage Sludge: Problems and Solutions]. Dnepropetrovsk.: Izdatel'stvo «Kontinent», 2014, p. 213.

14. Basurov V.A., Zaznobina N.I. Himicheskaya bezopasnost' [Chemical safety] Nizhnij Novgorod: Izdatel'stvo Nacional'nyj issledovatel'skij Nizhegorodskij gosudarstvennyj universitet im. N.I. Lobachevskogo, 2016, pp. 98.

15. Ibragimova B.B., Yusubov F.V. Matematicheskoe modelirovanie processa adsorbicii tyazhelyh metallov iz stochnyh vod. [Mathematical modeling of the process of adsorption of heavy metals from wastewater]. *Sbornik statej po materialam IX-X mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Himiya, fizika, biologiya, matematika: teoreticheskie i prikladnye issledovaniya»*, 2018, no. 3-4 (5), pp. 61-64.

Получено 28.03.2019

**M. Dyakov**

## **STRATEGY OF HANDLING OF MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT FACILITIES SEWAGE SLUDGE**

The methods of handling of sewage sludge of municipal wastewater treatment plants, as well as the directions of its processing and disposal implemented abroad and in Russia are examined. An assessment has been made of existing strategies for the treatment of sewage sludge and the promising areas of its treatment and disposal, allowing reducing the burden on environmental objects, using sewage sludge's resource and energy potential by means of environmentally safe, technically feasible and economically available methods.

A classification of settlements is proposed depending on the size of the population and the industrial segment implemented in a particular urbanized area. The dependence of the composition of wastewater and sediment formed in the process of its treatment on the scale of urbanized areas has been defined. Criteria for the selection of sewage sludge treatment technology are identified when implementing the development strategy of municipal engineering facilities.

It was established that for large megalopolises the most acceptable method for the sewage sludge treatment will be thermal methods with promising directions for the use of treatment products. Small settlements and medium-sized cities due to the low toxicity of solid waste generated at municipal wastewater treatment plants can be used as fertilizers in accordance with the current legislation. The data presented in the publication will allow municipal engineering facilities reducing the risks of choosing low-efficient and economically inexpedient technology when moving to a new level of the treatment of sewage sludge.

**Keywords:** sewage sludge, surplus active sludge, resource and energy potential, promising treatment areas, incineration, pyrolysis, digestion, fertilizers, utilization.

**Дьяков Максим Сергеевич** (Пермь, Россия) – канд. техн. наук, заместитель директора по научной работе, Уральский государственный научно-исследовательский институт региональных экологических проблем (614039, Пермь, Комсомольский пр., 61а, e-mail: max072007@yandex.ru).

**Dyakov Maksim** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Deputy Director for Science, Ural State Research Institute of Regional Environmental Problems (614039, Perm, Komsomolsky av., 61a, e-mail: max072007@yandex.ru).

DOI 10.15593/2409-5125/2019.02.04

УДК 504.054

**Е.С. Чиглинцева<sup>1</sup>, Л.З. Тельцова<sup>1</sup>, З.Б. Бактыбаева<sup>2,1</sup>,  
Г.Ф. Габидуллина<sup>1</sup>, А.А. Назарова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Башкирский государственный университет

<sup>2</sup>Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека

<sup>3</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет

## **МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА ИЗ СОСТАВА ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ**

Рассмотрена проблема увеличения объема потребления полимерных материалов, приводящая к накоплению отслуживших свой срок пластмассовых изделий. Основной удельный вес в общей массе полимерных отходов занимает полиэтилентерефталат (ПЭТ), объем отходов составляет более 10 млн т. Рассмотрены направления переработки и известные технологии обработки вторичного полимерного сырья и сырья из смешанных отходов. Отмечено, что слабым звеном в процессе организации обработки отходов потребления являются сбор и сортировка отходов. Сбор отслуживших изделий из полиэтилентерефталата у населения является сложным мероприятием с организационной точки зрения. Представлена технологическая линия утилизации отходов ПЭТ-материалов, которая включает этапы сбора отходов, сортировку, измельчение, первичную мойку, мойку с флотацией, промывку, сепарацию от воды, сушку, измельчение, воздушную сепарацию и упаковку. В настоящее время ПЭТ, полученный методом механической обработки, используется для производства синтетических нитей, одежды, предметов текстиля, и прежде всего – новой упаковки в пищевой промышленности. Рациональное использование отходов полиэтилентерефталата, внедрение новых технологий их обработки и работа с населением способствуют сохранению ценного химического сырья и предотвращению негативного влияния на окружающую среду.

**Ключевые слова:** обработка, утилизация, полиэтилентерефталат, отходы, пластиковая бутылка, грануляция.

Одной из самых актуальных современных проблем в области экологии является предотвращение накопления отходов. Загрязнение окружающей среды отходами человеческой деятельности в некоторых странах достигло масштабов экологической катастрофы, нередко приводящей к гибели живых организмов. Увеличение объема потребления полимер-

---

Механическая обработка полиэтилентерефталата из состава твердых коммунальных отходов / Е.С. Чиглинцева, Л.З. Тельцова, З.Б. Бактыбаева, Г.Ф. Габидуллина, А.А. Назарова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2019. – № 2. – С. 49–58. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.04

Chiglintseva E., Teltsova L., Baktybaeva Z., Gabidullina G., Nazarova A. Mechanical Processing of Polyethylene Terephthalate from the Composition of Municipal Solid Waste. PNRPU. Applied Ecology. Urban Development. 2019. No. 2. Pp. 49-58. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.04

ных материалов ведет к накоплению неразлагающегося мусора из отслуживших свой срок пластмассовых изделий, что в итоге приводит к загрязнению воздуха, почвенного покрова и грунтовых вод продуктами неполного разложения [1, 2].

Основной удельный вес (примерно 25 %) в общей массе полимерных отходов занимает полиэтилентерефталат (ПЭТ) – синтетический линейный термопластичный полимер, принадлежащий к классу полиэфиров, продукт поликонденсации терефталовой кислоты и этиленгликоля. ПЭТ используется для изготовления различных пленок, упаковок и емкостей. Из-за высоких потребительских свойств тары, изготовленной из ПЭТ, с каждым годом увеличивается рост производства упаковок из этого материала. К началу XXI века объемы отходов ПЭТ только в России составили 10,2 млн т. Большую часть отходов ПЭТ составляют изделия, выбывшие из употребления (товары широкого потребления, упаковка, бутылки для различных жидкостей) [2–4]. В настоящее время выпуск большинства пищевых продуктов в России увеличивается в рамках импортозамещения, следовательно, можно спрогнозировать дальнейший рост производства всех видов упаковочных материалов, в том числе из ПЭТ [5, 6].

Стойкость пластиков, попавших в отходы, и содержание в них токсичных добавок оборачивается серьезной экологической проблемой. При сжигании пластикового мусора в атмосферный воздух попадают вещества, наносящие вред окружающей среде и здоровью человека [7]. Так, при открытом горении полиэтилентерефталата удельный выброс бенз(а)пирена составляет  $38 \cdot 10^{-6}$  т/т, сажи – 0,055 т/т, монооксида углерода – 0,12 т/т. Как известно, бенз(а)пирен и сажа отличаются канцерогенной активностью, а монооксид углерода является токсичным и относится к IV классу опасности [8].

Более выгодным и безопасным является обработка отходов ПЭТ для их вторичного использования в дальнейшем. Разработанные отечественными учеными уникальные технологии обработки вторичного полимерного сырья и сырья из смешанных отходов оставались долгое время невостребованными. Распад СССР откинул решение вопросов утилизации отходов на несколько десятилетий назад. Темпы, характер и результаты обработки отходов в России существенно отстают от реальных потребностей экономического развития страны [9].

Переработка полимерных отходов в республике Башкортостан ведется на 29 предприятиях (ООО «Вториндустрия», ГК «Чистый город»), объем перерабатываемого количества полимерных отходов увеличился за последние 5 лет почти в два раза. Однако всего лишь около 7 % из образо-

вавшихся полимерных отходов подвергаются переработке на территории Республики Башкортостан, остальное направляется в Татарстан, Удмуртию и другие регионы [10].

Выделяют несколько основных направлений обработки вторичного ПЭТ, которые можно разделить на три основные группы: химические, термические и механические [11]. Рециклинг отходов из полиэтилентерефталата посредством механической обработки является наиболее рентабельным способом утилизации, так как данный метод не только экологически безопасен, но и экономически выгоден. Закупаемый Россией за рубежом ПЭТ-гранулят является достаточно дорогостоящим продуктом, а получаемый путем вторичной обработки почти не отличается по физико-механическим и теплофизическим свойствам от первичного ПЭТ [12].

Развитие технологий производства вторичного полиэтилентерефталата должно осуществляться по экономически аргументированному принципу с усовершенствованием всех циклов процесса сбора и обработки первичного сырья.

Целью исследования являлась разработка технологической линии утилизации отходов потребления полиэтилентерефталата, которая позволит выпускать продукцию (гранулят), соответствующую санитарным нормам для повторного использования в пищевой промышленности – изготовления тары для жидкостей.

Предлагаемая схема процесса механической обработки ПЭТ-тары включает следующие основные этапы: сбор отходов, сортировка, измельчение, первичная мойка, мойка с флотацией, промывка, сепарация от воды, сушка, измельчение, воздушная сепарация и упаковка. Отличительной особенностью данной линии утилизации является наличие и последовательность нескольких моющих аппаратов, очищающих сырье от всех видов загрязнений, полученных в процессе сбора и сортировки.

Следует отметить, что наиболее слабым звеном в процессе организации обработки отходов потребления являются сбор и сортировка отходов ПЭТ [13]. Тем не менее на протяжении последних нескольких лет в городах России на площадках для сбора мусора устанавливаются специальные контейнеры-сетки для пластиковой тары. Также в местах для отдыха (торгово-развлекательных центрах, парках, аллеях) можно встретить контейнеры для раздельного сбора отходов. Основной проблемой раздельного сбора отходов является недостаточная осведомленность граждан о необходимости данной процедуры, а также о различии состава материалов изделия, выбывшего из употребления. Таким образом, социальная реклама селективного сбора отходов, внедрение уроков экологического воспита-

ния в учебных заведениях, проведение открытых экологических семинаров позволит повысить процент участия в раздельном сборе пластиковых отходов [14].

Перед транспортировкой сырье в виде ПЭТ-бутылок предварительно отсортировывают по цвету и прессуют специальными прессами в компактные кипы. Разбиение кип из прессованных ПЭТ-бутылок – первая технологическая стадия в системе их обработки на заводах. Для автоматического разбиения кип из сырья используются различные кипоразбиватели. Автоматический кипоразбиватель предназначен для создания непрерывного равномерного потока отдельных бутылок из прессованных тюков. Он оборудован подвижной лентой, по которой кипа движется к вращающимся барабанам с зубцами. Зубцы служат для дополнительно сцепления тары между барабанами. Пропущенная между барабанами кипа распадается на отдельные бутылки, которые отправляются в просеиватель.

Принципиальная технологическая схема линии утилизации пластиковых одноразовых бутылок представлена на рисунке.

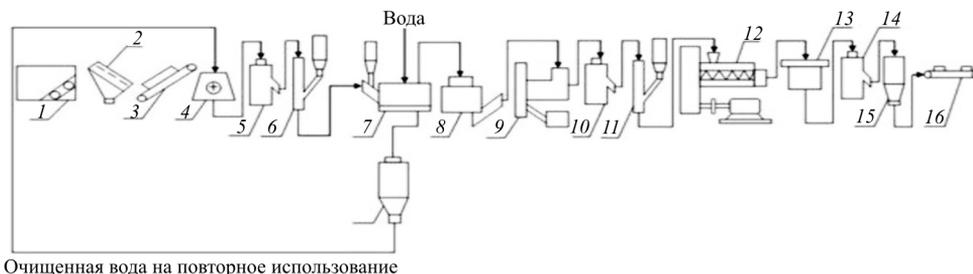


Рис. Принципиальная технологическая схема линии утилизации пластиковых одноразовых бутылок: 1 – кипоразбиватель; 2 – грохот; 3 – ленточный конвейер; 4 – мощная дробилка; 5 – центрифуга; 6 – воздушный пазделитель; 7 – ванна флотации; 8 – мойка подогреваемая; 9 – мойка интенсивная; 10 – центрифуга; 11 – воздушный разделитель; 12 – экструдер; 13 – ванна охлажденная; 14 – центрифуга; 15 – бункер-накопитель; 16 – стол для упаковки изделий в мешки; 17 – гидроциклон для очистки воды

Сырье из кипоразбивателя попадает в грохот, основной рабочей частью которого является вращающийся барабан, выполненный из перфорированного стального материала. Через отверстия песок и другие посторонние частицы ссыпаются вниз в специальный лоток, который по мере наполнения очищается вручную. Пластиковые бутылки движутся в направлении продольной оси барабана и попадают на ленточный транспортер. Грохот позволяет значительно снизить риск выхода из строя оборудования из-за попадания внутрь инородных включений, повысить качество сырья и обеспечить качественную и непрерывную работу.

Для транспортировки бутылок в дробилку используется ленточный конвейер на основе ленты из поливинилхлорида. К транспортирующей ленте предъявляются такие требования, как надежность ткани, из которой ее изготавливают, и возможность ее замены при потере рабочих качеств. К достоинствам данного аппарата можно отнести возможность регулирования количества подаваемого сырья, времени работы (без перерывов или с перерывами с установленной продолжительностью). Лента армирована и прорезинена, оборудована лопатками, которые не дают пластиковому сырью скатиться обратно вниз.

В дальнейшем происходит дробление полимерных отходов для формирования частиц подходящего размера и формы. Свойства полимеров, которые подлежат обработке, определяют особые условия к измельчительной технике. Ключевыми факторами в достижении необходимого размера частиц являются твердость, чувствительность к теплу и эластичность материала. Самым распространенным оборудованием для измельчения ПЭТ-бутылок являются роторные дробилки, обладающие высокой производительностью и эффективностью. Измельчение полимерного материала происходит в результате нанесения быстрых ударов ножей, закрепленных на роторе. Неподвижная часть дробилки также оборудована ножами. Между движущимися и неподвижными ножами происходит измельчение сырья. Под дробильной камерой, в которой происходит резка, установлено сито. Его отверстия определяют размер дробленого материала. Снизить шум и увеличить продолжительность пригодности ножей к работе позволяет использование воды. Также вода частично очищает сырье от грязи, этикетки и т.п. Конструкция ротора позволяет дробилке с водяным охлаждением подшипников работать до 24 ч в сутки.

Для сушки полученных хлопьев применяется центрифуга, основной рабочей деталью которой является вращающийся ротор, оснащенный специальными лопатками для выгрузки очищенного сырья. При вращении ротора поток воды с хлопьями также начинает вращаться. Под действием центробежных сил вода с загрязняющими частицами отбрасывается к перфорированным стенкам аппарата и через перфорацию попадает в ванну очистки. Очищенные хлопья ПЭТ при помощи специальных лопаток продвигаются вверх вдоль оси ротора и выгружаются через верхний патрубок.

Далее сырье из центрифуги попадает в воздушный разделитель, принцип работы которого основан на разности масс хлопьев ПЭТ (тяжелая фракция) и этикеток (легкая фракция). Отделившиеся кусочки бумаги и этикеток попадают в циклон-накопитель, а дробленый полимерный материал направляется в ванну флотации для дальнейшей очистки. В трубе

воздуховода легкая фракция попадает в воздушный поток, создаваемый вытяжным вентилятором, и удаляется в верхней части аппарата, а сырье под действием силы тяжести падает вниз.

В дальнейшем сырье в виде хлопьев поступает в ванну флотации, которая изготавливается из углеродистой стали, что гарантирует долговечность оборудования. Для защиты от коррозии на ванну наносится специальный состав с содержанием цинкового порошка. Дробленый материал опускается на дно ванны и транспортируется шнеком в другой конец аппарата, где установлен второй шнековый транспортер, направляющий очищенные водой хлопья в следующую мойку. Части пробок, колец, полиэтиленовых и полипропиленовых этикеток и другие частицы с удельной плотностью менее единицы всплывают на поверхность и уносятся потоком воды из аппарата через специальный патрубок.

Подогреваемая мойка хлопьев ПЭТ подразумевает добавление моющих средств в воду и предназначена для отмывки от грязи, клея и т.д. Сырье загружается в аппарат и при вращении лопастей ворошителя движется хаотично, что способствует отделению загрязняющих частиц. Конструкция данного аппарата также включает тройной утепленный корпус и электронагреватели. Отделившаяся легкая фракция (жиры, масла, этикетка и т.п.) в процессе мойки удаляется через переливную трубу.

Из подогреваемой мойки сырье поступает в интенсивную мойку. При вращении основной рабочей детали – ротора – происходит перемешивание и перетирание хлопьев между собой, в результате чего от них отделяются различные загрязнения. Вода и мелкие посторонние частицы выводятся через отверстия перфорированного корпуса в сливной кожух. Во время интенсивной мойки сырье находится внутри определенный промежуток времени при заданном коэффициенте трения. Температура воды в мойке поддерживается в пределах 75–95 °С, что позволяет эффективно отделить все загрязнения от сырья.

Технологический процесс экструзии заключается в последовательном перемещении материала вращающимся шнеком в его зонах: питания, пластикации, дозирования расплава, продвижения расплава в каналах формирующей головки и охлаждения полученного расплавленного термопласта. Загрузка бункера экструдера осуществляется при помощи пневмотранспорта. Питание шнека зависит от формы частиц сырья и их плотности. Здесь материал продавливается через головку экструдера с отверстиями. После выхода из головки в виде жгутов (диаметр 2 мм, количество 70 шт.) материал сразу режется специальным устройством на гранулы. Гранулы, полученные резкой заготовки на горячей решетке гранулятора, не имеют

острых углов и ребер, и следовательно, обладают лучшей сыпучестью. Гранулы, которые получены холодной рубкой прутка-заготовки, имеют острые углы, плоское сечение среза, что способствует их сцеплению и ухудшению сыпучести.

Гранулы сначала падают в ванну охлаждения. Далее они сушатся в центробежной сушилке, остывают и попадают в бункер-накопитель. Из бункера гранулы поступают на упаковку в мешки. Полученные гранулы в дальнейшем перерабатывают в изделия.

В настоящее время полиэтилентерефталат, полученный методом механической обработки, используется для производства синтетических нитей, одежды, предметов текстиля, и прежде всего – новой упаковки в пищевой промышленности [15, 16].

Расчет расхода сырья производится по выбранным параметрам технологического процесса и потерям, принятым для производства данного вида изделия. Он может быть выполнен как для производства в целом, так и по отдельным его стадиям – технологическим переходам. Расчет необходим для оценки возможных потерь в процессе производства и корректировки материальных потоков сырья, вспомогательных материалов и готовой продукции, планирования запасов сырья на складе, упрощения калькуляции себестоимости конечного изделия.

Таким образом, предлагаемые авторами последовательность и количество аппаратов технологической линии наиболее выгодно и эффективно помогут обработать полимерный материал на основе ПЭТ. В предложенном процессе учитываются и соблюдаются все технологические параметры, необходимые для обработки пластиковых бутылок. Аппараты для предложенной линии утилизации изготавливаются компанией «Станкополимер» (Москва). Уникальная система повышенной очистки в виде нескольких ступеней мойки, флотационного отделения, полоскания и сушки позволит изготовить качественный продукт для производства новой пластиковой тары для пищевой промышленности.

#### Библиографический список

1. Колычев Н.А. Оптимизация обращения с твердыми бытовыми и близкими к ним по составу промышленными отходами в крупных и средних населенных пунктах России // Биосфера. – 2013. – Т. 5, № 4. – С. 393–418.
2. Митрофанов Р.Ю., Чистякова Ю.С., Севедин В.П. Переработка отходов полиэтилентерефталата // Твердые бытовые отходы. – 2006. – № 6. – С. 12–13.
3. Супрун Л.В., Романенко С.В., Цыганкова Т.С. Анализ и решение проблемы утилизации и вторичной переработки полиэтилентерефталата (ПЭТ) отходов в городе Томске // Вестник науки Сибири. – 2012. – № 4 (5). – С. 107–112.

4. Экологические аспекты производства полиэтилентерефталата – современного упаковочного полимера / Г.Г. Ягафарова, Л.Р. Акчурина, Ю.А. Федорова, У.Р. Урманцев // Экология и промышленность России. – 2013. – № 12. – С. 46–49.
5. Андриянова П. Летом будет лучше? [Электронный ресурс]. – URL: <https://article.unipack.ru/69336/> (дата обращения: 31.10.2018).
6. Астратова Г.В., Фролова Н.Ю. К вопросу о формировании современного рынка отходов из упаковки потребительских товаров // Отходы и ресурсы: интернет-журнал. – 2018. – № 1. – URL: <https://resources.today/PDF/04NZOR118> (дата обращения: 30.10.2018).
7. Лапова Е.В., Нор П.Е. Способы применения биотехнологий в процессе утилизации отходов // Безопасность городской среды: матер. междунар. науч.-практ. конф. (21–23 ноября 2017 г.). – Омск, 2017. – С. 124–128.
8. Белых Л.И., Халтурина Д.А., Мухамедьянова Р.Р. Мониторинг выбросов бенз(а)пирена в атмосферу при открытом и печном горении различных материалов // XXI век. Техносферная безопасность. – 2017. – Т. 2, № 1. – С. 23–37.
9. Любешкина Е. Обратная сторона упаковки [Электронный ресурс] // Наука и жизнь. – 2007. – № 3. – URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/9315/> (дата обращения: 29.10.2018).
10. Савоськина Р.Р., Бахонина Е.И. Анализ сложившейся системы управления и обращения с твердыми коммунальными отходами на территории Республики Башкортостан // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2016. – № 1 (21). – С. 20–38.
11. Полиэтилентерефталат: новые направления рециклинга [Электронный ресурс] / А.Ю. Беданок, Б.З. Бештоев, М.А. Микитаев, А.К. Микитаев, В.В. Сазонов. – URL: <http://www.doc.knigi-x.ru/22raznoe/21044-1-polietilentereftalat-novie-napravleniya-reciklinga-bedanokov-beshtoev-mikitaev-mikitaev.php> (дата обращения: 25.10.2018).
12. Техника и технология переработки и утилизации отходов / С.М. Найман, Н.Х. Газеев, А.Н. Глебов, Д.В. Фролов. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2011. – 418 с.
13. Глотов Д.С. Селективный сбор твердых коммунальных отходов – залог экологической безопасности страны // Управление городом: теория и практика. – 2017. – № 3 (26). – С. 66–70.
14. Абрамов В.В., Чалая Н.М. Вторичная переработка полимерных отходов: анализ существующих методов // Твердые бытовые отходы. – 2012. – № 1. – С. 21–24.
15. Чупрова Л.В., Муллина Э.Р. Технологические особенности производства упаковки из вторичного полиэтилентерефталата (ПЭТ) // Молодой ученый. – 2013. – № 5. – С. 123–125.
16. Ragaert K., Delva L., Van Geem K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste // Waste Management. – 2017. – Vol. 69. – P. 24–58.

## References

1. Kolychev N.A. Optimizaciya obrasheniya s tverdymi bytovymi i blizkimi k nim po sostavu promyshlennymi othodami v krupnyh i srednih naseleennyh punktah Rossii. Biosfera. [Optimization of the treatment of solid household and similar in composition industrial waste in large and medium-sized settlements of Russia]. *Biosphere*. 2013, vol. 5, no. 4, pp. 393–418.
2. Mitrofanov R.Yu., Chistyakova Yu.S., Sevodin V.P. Pererabotka othodov polietilentereftalata. Tverdye bytovye othody. [Recycling of polyethylene terephthalate.]. *Municipal solid waste*. 2006, no. 6, pp. 12–13.
3. Suprun L.V., Romanenko S.V., Cygankova T.S. Analiz i reshenie problemy utilizacii i vtorichnoj pererabotki polietilentereftalata (PET) othodov v gorode Tomske. Vestnik nauki Sibiri. [Analysis and solution of the problem of recycling and recycling of polyethylene terephthalate (PET) waste in the city of Tomsk]. *Bulletin of science of Siberia*. 2012, no. 4 (5), pp. 107–112.
4. Yagafarova G.G., Akchurina L.R., Fedorova Yu.A., Urmancev U.R. Ekologicheskie aspekty proizvodstva polietilentereftalata – sovremennogo upakovochnogo polimera. Ekologiya i promyshlennost Rossii. [Environmental aspects of the production of polyethylene terephthalate – a modern packaging polymer]. *Ecology and Industry of Russia*. 2013, no. 12, pp. 46–49.

5. Andriyanova P. Summer will be better? available at: <https://article.unipack.ru/69336/>, (date of access: 31.10.2018).
6. Astratova G.V., Frolova N.Yu. To the question of the formation of the modern market of waste from the packaging of consumer goods. *Waste and resources*, 2018, no. 1, available at <https://resources.today/PDF/04NZOR118>, (date of access: 30.10.2018).
7. Lapova E.V., Nor P.E. Sposoby primeneniya biotekhnologij v processe utilizacii othodov [Method of application of biotechnology in the process of waste disposal]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Bezopasnost gorodskoj sredy»* (21-23 november 2017 year). Omsk, 2017, pp. 124-128.
8. Belyh L.I., Halturina D.A., Muhamedyanova R.R. Monitoring vybrosov benz(a)pirena v atmosferu pri otkrytom i pechnom gorenii razlichnyh materialov XXI vek. Tehnosfernaya bezopasnost. [Monitoring of benzo (a) pyrene emissions in the atmosphere with open and furnace burning of various materials], *XXI century. Technosphere safety*. 2017, vol. 2, no. 1, pp. 23-37.
9. Lyubeshkina E. The reverse side of the package. *Science and Life*, 2007, no. 3, available at: <https://www.nkj.ru/archive/articles/9315/>, (date of access: 29.10.2018)
10. Savoskina R.R., Bahonina E.I. Analiz slozhivshejsya sistemy upravleniya i obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi othodami na territorii Respubliki Bashkortostan [Analysis of the existing system of management and treatment of municipal solid waste in the territory of the Republic of Bashkortostan]. *Bulletin of the Perm national research politekhnich universiy. Applied ecology. Urban development*. 2016, no. 1 (21), pp. 20-38.
11. Bedanokov A.Yu., Beshtoev B.Z., Mikitaev M.A., Mikitaev A.K., Sazonov V.V. Polietilentereftalat: novye napravleniya reciklinga [Polyethylene terephthalate: new recycling directions], available at: <http://www.doc.knigi-x.ru/22raznoe/21044-1-polietilentereftalat-novie-napravleniya-reciklinga-bedanokov-beshtoev-mikitaev-mikitaev.php>, (date of access: 25.10.2018).
12. Najman S.M., Gazeev N.H., Glebov A.N., Frolov D.V. Tehnika i tehnologiya pererabotki i utilizacii othodov. [Technique and technology of waste processing and disposal]. Kazan: Kazan State technological university, 2011. 418 p.
13. Glotov D.S. Selektivnyj sbor tverdyh kommunalnyh othodov – zalog ehkologicheskoy bezopasnosti strany. City Management: [Selective collection of municipal solid waste is the key to the country's environmental safety]. *Theory and Practice*. 2017, no. 3 (26), pp. 66-70.
14. Abramov V.V., Chalaya N.M. Vtorichnaya pererabotka polimernyh othodov: analiz sushestvuyushih metodov. Tverdye bytovye othody. [Polymer Waste Recycling: Analysis of Existing Methods.]. *Municipal Solid Waste*. 2012, no. 1, pp. 21-24.
15. Chuprova L.V. Tehnologicheskie osobennosti proizvodstva upakovki iz vtorichnogo polietilentereftalata (PET) [Technological features of the production of packaging from recycled polyethylene terephthalate (PET)]. *Molodoj uchenyj*. 2013, no. 5, pp. 123-125.
16. Ragaert K., Delva L., Van Geem K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*. 2017, vol. 69, pp. 24-58.

Получено 13.01.2019

**E. Chiglintseva, L. Teltsova, Z. Baktybaeva,  
G. Gabidullina, A. Nazarova**

## **MECHANICAL PROCESSING OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE FROM THE COMPOSITION OF MUNICIPAL SOLID WASTE**

The increase in consumption of polymeric materials leads to the accumulation of overage plastic products, the decomposition of which in the soil takes more than a hundred years. The main share in the total mass of polymer waste is polyethylene terephthalate. A technological line for utilization of polyethylene terephthalate waste is presented, which includes the following main stages: waste col-

lection, sorting, grinding, primary washing, washing with flotation, rinsing, separation from water, drying, grinding, air separation and packaging. The weakest link in the process of arranging the processing of municipal solid waste is the collection and sorting of waste from polyethylene terephthalate. Collection of overage products made of polyethylene terephthalate from the population is an extremely complex procedure from the organizational point of view and in our country it is being remained at the stage of permanent improvements. Currently, polyethylene terephthalate obtained by mechanical processing is used for the production of synthetic yarns, clothing, textiles and new packaging in the food industry. Rational use of waste polyethylene terephthalate, an introduction of new technologies for its processing and working with the public contribute to the preservation of valuable chemical raw materials and prevent negative impacts on the environment.

**Keywords:** processing, utilization, polyethylene terephthalate, waste, plastic bottle, granulation.

**Чиглинцева Елена Сергеевна** (Уфа, Россия) – магистрант, кафедра «Экология и безопасность жизнедеятельности», Башкирский государственный университет (450076, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Заки Валиди, 32, e-mail: elenaschiglintseva@mail.ru).

**Тельцова Луиза Загитовна** (Уфа, Россия) – канд. биол. наук, доцент, заведующая кафедрой «Экология и безопасность жизнедеятельности», Башкирский государственный университет (450076, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Заки Валиди, 32, e-mail: aluisa@mail.ru).

**Бактыбаева Зульфия Булатовна** (Уфа, Россия) – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник отдела медицинской экологии, кафедра «Экология и безопасность жизнедеятельности», Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека, Башкирский государственный университет (450076, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Заки Валиди, 32, e-mail: baktybaeva@mail.ru).

**Габидуллина Гузель Фаилевна** (Уфа, Россия) – канд. биол. наук, доцент, кафедра «Экология и безопасность жизнедеятельности», Башкирский государственный университет (450076, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Заки Валиди, 32, e-mail: gabidullinag@mail.ru).

**Назарова Альмира Азаматовна** (Уфа, Россия) – магистрант, кафедра «Транспорт и хранение нефти и газа», Уфимский государственный нефтяной технический университет (450062, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Космонавтов, д. 1, e-mail: almiranazarova24@mail.ru).

**Chiglintseva Elena** (Ufa, Russian Federation) – Undergraduate Student, Department of Ecology and Life Safety, Bashkir State University (450076, Republic of Bashkortostan, Ufa, Zaki Validy st., 32, e-mail: elenaschiglintseva@mail.ru).

**Teltsova Luiza** (Ufa, Russian Federation) – Ph.D. in Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Department, Department of Ecology and Life Safety, Bashkir State University (450076, Republic of Bashkortostan, Ufa, Zaki Validy st., 32, e-mail: aluisa@mail.ru).

**Baktybaeva Zulfia** (Ufa, Russian Federation) – Ph.D. in Biological Sciences, Senior Researcher, Medical Ecology Department, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Department of Ecology and Life Safety, Bashkir State University (450076, Republic of Bashkortostan, Ufa, Zaki Validy st., 32, e-mail: baktybaeva@mail.ru).

**Guzel Gabidullina** (Ufa, Russian Federation) – Ph.D. in Biological Sciences, Associate Professor, Department of Ecology and Life Safety, Bashkir State University (450076, Republic of Bashkortostan, Ufa, Zaki Validy st., 32, e-mail: gabidullinag@mail.ru).

**Nazarova Almira** (Ufa, Russian Federation) – Undergraduate Student, Department of Transport and Storage of Oil and Gas, Ufa State Petroleum Technological University (450062, Republic of Bashkortostan, Ufa, Kosmonavtov st., 1, e-mail: almiranazarova24@mail.ru).

# ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

---

DOI 10.15593/2409-5125/2019.02.05

УДК 631.416.8

**Т.В. Зазнобина<sup>1</sup>, О.В. Иванова<sup>1</sup>, Е.В. Алхименко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Красноярский научно-исследовательский институт животноводства –  
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

<sup>2</sup>ФГБУ ГЦАС «Красноярский»

## СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ ПРИГОРОДНОЙ ЗОНЫ Г. КРАСНОЯРСКА

Одной из актуальных проблем современной экологии является загрязнение почв тяжелыми металлами, отражающееся практически на всех компонентах биосферы. Целью исследований являлось изучение содержания тяжелых металлов в почвах пригородной зоны г. Красноярск. Для этого были выбраны 6 сельскохозяйственных предприятий, расположенных в двух районах пригородной зоны г. Красноярск: СПК «Зыковский», СПК «Березовский» и птицефабрика «Бархатовская» Березовского района, ОАО «Солонцы», ЗАО «Шуваевское» и ЗАО «Элита» Емельяновского района. В результате исследований установлено, что наименьшее количество Mn, Zn, Co и Ni накапливалось в почвах СПК «Березовский», наименьшее количество Mn, Cu, Zn, Co, Cr и Ni – в почвах ЗАО «Элита». В почвах хозяйств Березовского и Емельяновского районов содержание Mn, Cu, Pb и Hg находилось ниже ПДК на 50–99 % и 42–99 % соответственно, концентрации Zn и Co – выше нормируемых значений на 20–118 % и 32–127 %; содержание в почвах Cr и Ni в 3–6 раз превышало ПДК. Тяжелые металлы были ниже своих кларковых значений на 41–80 % в Березовском районе и на 30–84 % в Емельяновском районе. Полученные результаты говорят о необходимости проведения мероприятий по снижению содержания Zn, Co, Cr и Ni в почвах данных районов, поскольку повышенные концентрации этих металлов могут оказывать отрицательное воздействие, в первую очередь на плодородие почв, затем на трофические уровни пищевой цепи, создавая в конечном итоге угрозу здоровью населения, а также экологической ситуации в целом.

**Ключевые слова:** тяжелый металл, почва, предельно допустимая концентрация, кларк, окружающая среда.

В связи с повышением внимания к экологическим проблемам, связанным с загрязнением биосферы, важное практическое значение приоб-

---

Зазнобина Т.В., Иванова О.В., Алхименко Е.В. Содержание тяжелых металлов в почвах пригородной зоны города Красноярск // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2019. – № 2. – С. 59–68. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.05

Zaznobina T., Ivanova O., Alkhimenko E. Heavy Metals Content in the Soils of Suburban Areas of the City of Krasnoyarsk. PNRPU. Applied Ecology. Urban Development. 2019. No. 2. Pp. 59-68. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.05

ретает оценка состояния окружающей среды, а также оценка загрязнения почв тяжелыми металлами, отражающегося практически на всех компонентах биосферы [1–3].

Основными источниками загрязнения почвенного покрова являются предприятия черной и цветной металлургии, горнодобывающей и перерабатывающей промышленности, тепловые электростанции, автомобильный транспорт [2, 4, 5]. Кроме того, тяжелые металлы могут попадать в почву с атмосферными осадками, сточными водами, удобрениями и пестицидами [6].

Следует отметить, что металлы сравнительно быстро накапливаются в почве и крайне медленно из нее удаляются [7, 8]. Загрязнение почв тяжелыми металлами является запускающим механизмом для ряда последовательных реакций деградации почв, которые имеют такое же экологическое значение, как и само содержание тяжелых металлов. Это изменение рН среды, микробиологической и ферментативной активности, гумусированности, структурообразования и последующих реакций [9].

Из почвы тяжелые металлы попадают в организм человека не только со вдыхаемым воздухом и почвенной пылью, но и через продукты питания, производимые на загрязненных сельскохозяйственных угодьях. Пагубное влияние тяжелых металлов на человека состоит в том, что ряд их соединений характеризуется высокой токсичностью и канцерогенностью [10, 11].

Для оценки степени концентрации химических элементов в почве в качестве эталона широко используются их кларки – средние содержания химических элементов в земной коре или какой-либо ее части [12].

Целью исследований было изучение содержания тяжелых металлов в почвах пригородной зоны г. Красноярска.

**Материал и методы исследований.** Концентрацию тяжелых металлов в почвах изучали по пробам сельскохозяйственных предприятий Березовского (СПК «Зыковский», СПК «Березовский», птицефабрика «Бархатовская») и Емельяновского районов (ОАО «Солонцы», ЗАО «Шуваевское», ЗАО «Элита») Красноярского края, расположенных в пригородной зоне г. Красноярска, являющегося одним из крупнейших промышленных центров Восточной Сибири и занимающего первое место в рейтинге самых загрязненных городов на планете (по данным Sibnovosti.ru и приложения AirVisual – мировой онлайн-карты мониторинга загрязнения воздуха) [13].

Исследование почв проводилось в 2009 и 2015 годах аккредитованной испытательной лаборатории ФГБУ ГЦАС «Красноярский». Пробы отбирали в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02–84<sup>1</sup>. Полученные данные срав-

---

<sup>1</sup> ГН 2.1.7.2041–06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы. – Введ. 01.04.2006. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. – 15 с.

нивались с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) химических веществ в почвах<sup>2</sup> и со значениями кларков химических элементов по Н.А. Григорьеву [14].

**Результаты и их обсуждение.** Результаты исследований по содержанию тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных предприятий представлены в таблице.

Содержание тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных предприятий, мг/кг

Сельскохозяйственное предприятие	Тяжелый металл								
	Mn	Cu	Zn	Co	Cd	Pb	Cr	Ni	Hg
<i>Березовский район</i>									
СПК «Зыковский»	414,20	14,98	41,25	10,11	0,13	7,74	20,61	25,20	0,02
СПК «Березовский»	336,40	13,87	38,05	6,01	0,13	6,25	18,57	16,68	0,02
Птицефабрика «Бархатовская»	347,20	13,37	50,05	8,68	0,13	5,77	28,04	23,84	0,02
В среднем по району	365,93	14,07	43,12	8,27	0,13	6,59	22,41	21,91	0,02
<i>Емельяновский район</i>									
ОАО «Солонцы»	408,30	17,50	52,20	8,10	0,11	9,90	24,90	23,60	0,02
ЗАО «Шуваевское»	451,40	16,70	47,80	9,00	0,10	9,50	27,00	25,20	0,02
ЗАО «Элита»	403,3	12,6	39,6	6,60	0,10	10,60	17,1	19,50	0,03
В среднем по району	421	15,6	46,5	7,9	0,10	10	23	22,77	0,02
ПДК с учетом фона (кларка)	1500	30	23	5	–	32	6	4	2,1
Кларковое значение	770	39	75	17	0,64	17	92	50	0,065

Анализируя Березовский район, установили, что в почвах СПК «Березовский» концентрация Mn была ниже, чем в других хозяйствах этого района, на 10,80–77,80 мг/кг, Zn – на 3,20–12,00 мг/кг, Co – на 2,67–4,10 мг/кг, Cr – на 2,04–9,47 мг/кг, Ni – на 7,16–8,52 мг/кг. В почвах ПФ «Бархатовская» количество Cu было ниже, чем в других хозяйствах, на 0,5–1,61 мг/кг, Pb – на 0,48–1,97 мг/кг.

В Емельяновском районе в почвах ЗАО «Элита» содержание Mn было ниже, чем в других хозяйствах этого района, на 5,0–48,1 мг/кг, Cu – на 4,10–4,90 мг/кг, Zn – на 8,20 мг/кг, Co – на 1,5–2,4 мг/кг, Cr – на 7,8–9,9 мг/кг, Ni – на 4,1–5,70 мг/кг. Наименьшее количество Pb было зафиксировано в почвах ЗАО «Шуваевское» (на 0,4–1,1 мг/кг по сравнению с другими хозяйствами).

<sup>2</sup> ГОСТ 17.4.4.02–84. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – Введ. 1986-01-01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 9 с.

Наиболее загрязненными Mn, Cu, Co, Pb и Ni в Березовском районе были почвы СПК «Зыковский». Так, Mn в них аккумулировалось больше на 67,00–77,80 мг/кг, Cu – на 1,11–1,61, Co – на 1,43–4,10, Pb – на 1,49–1,97, Ni – на 1,36–8,52 мг/кг. В почвах ПФ «Бархатовская» количество Zn было больше, чем в других хозяйствах, на 8,80–12,00 мг/кг, Cr – на 7,43–9,47 мг/кг.

В Емельяновском районе в почвах ЗАО «Шуваевское» содержание Mn было больше, чем в других хозяйствах этого района, на 43,1–48,1 мг/кг, Co – на 0,9–2,4, Cr – на 2,1–9,9, Ni – на 1,6–5,7 мг/кг, в почвах ОАО «Солонцы» Cu – на 0,8–4,9, Zn – на 4,4–12,6 мг/кг.

Следует отметить, что по содержанию в почвах Cd и Hg хозяйства Березовского и Емельяновского районов различались незначительно: показатели Cd находились на уровне 0,10–0,13 мг/кг, Hg – 0,02–0,03 мг/кг.

При сравнении средних количеств элементов между районами выявлено, что наименьшее содержание всех изученных тяжелых металлов, за исключением Co и Cd, было в почвах Березовского района.

Результаты сопоставления содержания тяжелых металлов в почвах двух районов с их ПДК и кларками представлены на рис. 1–5.

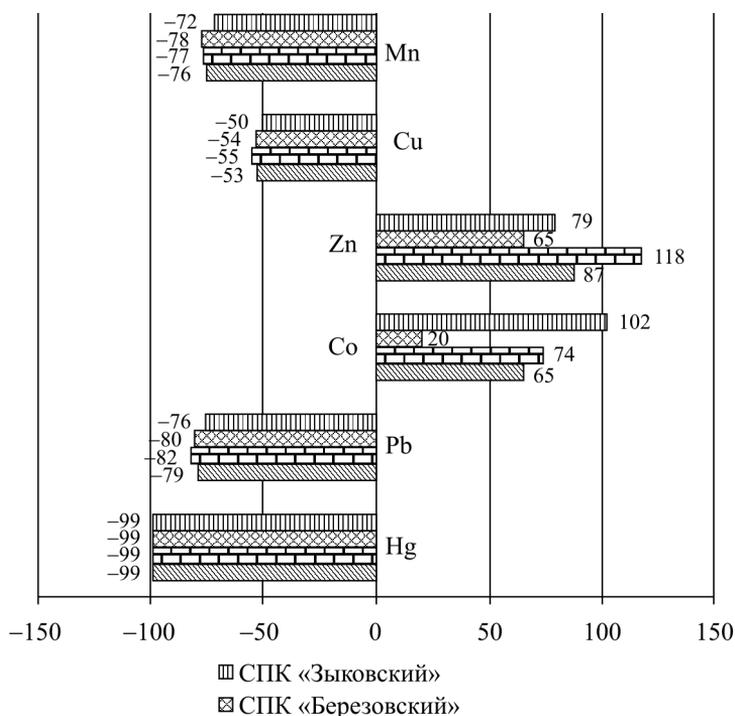


Рис. 1. Отклонение от ПДК содержания Mn, Cu, Zn, Co, Pb и Hg в почвах сельхозпредприятий Березовского района, %

Содержание Mn, Cu, Pb и Hg в почвах Березовского района было ниже ПДК на 50–99 %, в почвах Емельяновского района – на 42–99 %, а уровень Zn и Co, напротив, превышал норму в этих районах на 20–118 % и 32–127 % соответственно (рис. 1, 3).

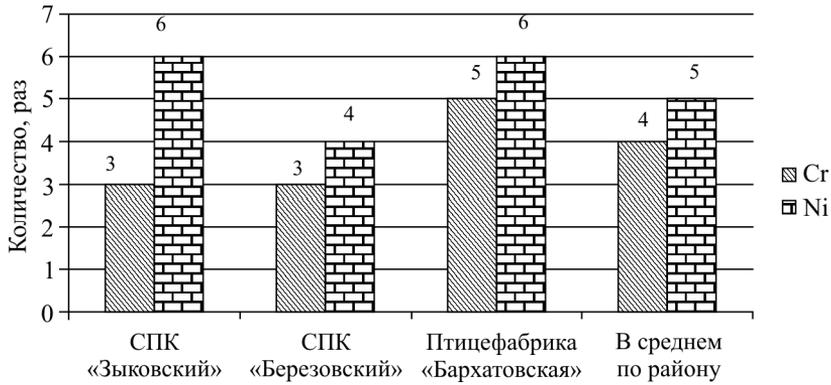


Рис. 2. Отклонение от ПДК содержания Cr и Ni в почвах сельхозпредприятий Березовского района, раз

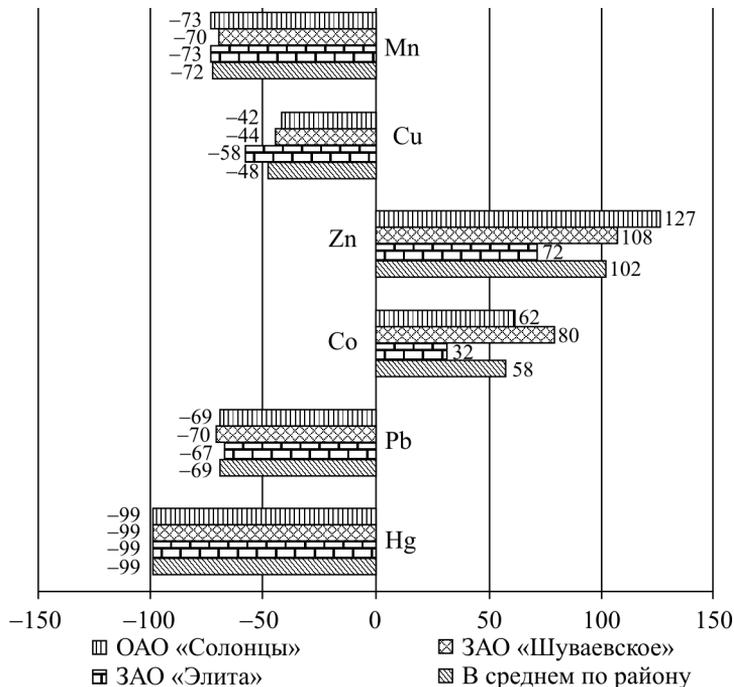


Рис. 3. Отклонение от ПДК содержания Mn, Cu, Zn, Co, Pb и Hg в почвах сельхозпредприятий Емельяновского района, %

Содержание Cr в Березовском и Емельяновском районах было выше предельно допустимых концентраций в 3–5 раз, концентрация Ni – в 4–6 раз в Березовском и в 5–6 раз в Емельяновском районе (рис. 2, 4).

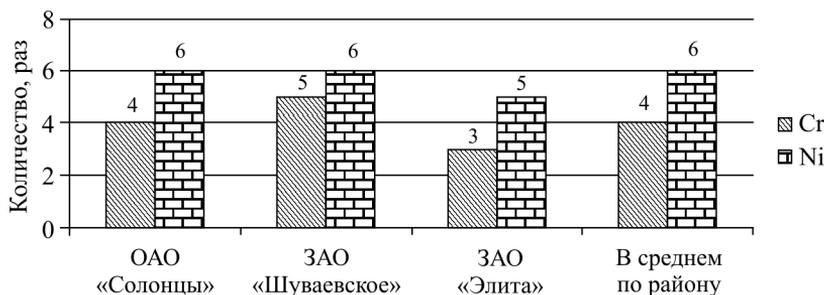


Рис. 4. Отклонение от ПДК содержания Cr и Ni в почвах сельхозпредприятий Емельяновского района, раз

При сравнении концентраций тяжелых металлов с кларками выявлено, что все изученные элементы не превышали своих кларковых значений: напротив, они были ниже их на 41–80 % в Березовском районе и на 30–84 % в Емельяновском районе (рис. 5).

**Выводы.** В результате изучения содержания тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных предприятий пригородной зоны г. Красноярска установлено, что наименьшее количество Mn, Zn, Co и Ni накапливалось в почвах СПК «Березовский» Березовского района, наименьшее количество Mn, Cu, Zn, Co, Cr и Ni – в почвах ЗАО «Элита» Емельяновского района. При сравнении двух районов по средним концентрациям элементов обнаружено, что почвы Березовского района менее загрязнены всеми изученными металлами, за исключением Co и Cd.

В почвах Березовского и Емельяновского районов содержание Mn, Cu, Pb, Hg находилось значительно ниже ПДК, а концентрации Zn, Co, Cr, Ni, напротив, были выше их. Отклонение от кларков тяжелых металлов было в отрицательную сторону.

Наиболее вероятными источниками поступления тяжелых металлов в почвы изученных районов являются предприятия цветной металлургии, тепловые электростанции, сточные воды, а также пестициды, которые вносятся в пахотные земли сельскохозяйственных предприятий.

Необходимо проводить мероприятия, направленные на снижение содержания Zn, Co, Cr и Ni в почвах данных районов, поскольку повышенные концентрации этих металлов могут оказывать отрицательное воздей-

ствии, в первую очередь на плодородие почв, затем на трофические уровни пищевой цепи, создавая в конечном итоге угрозу здоровью населения, а также экологической ситуации в целом.

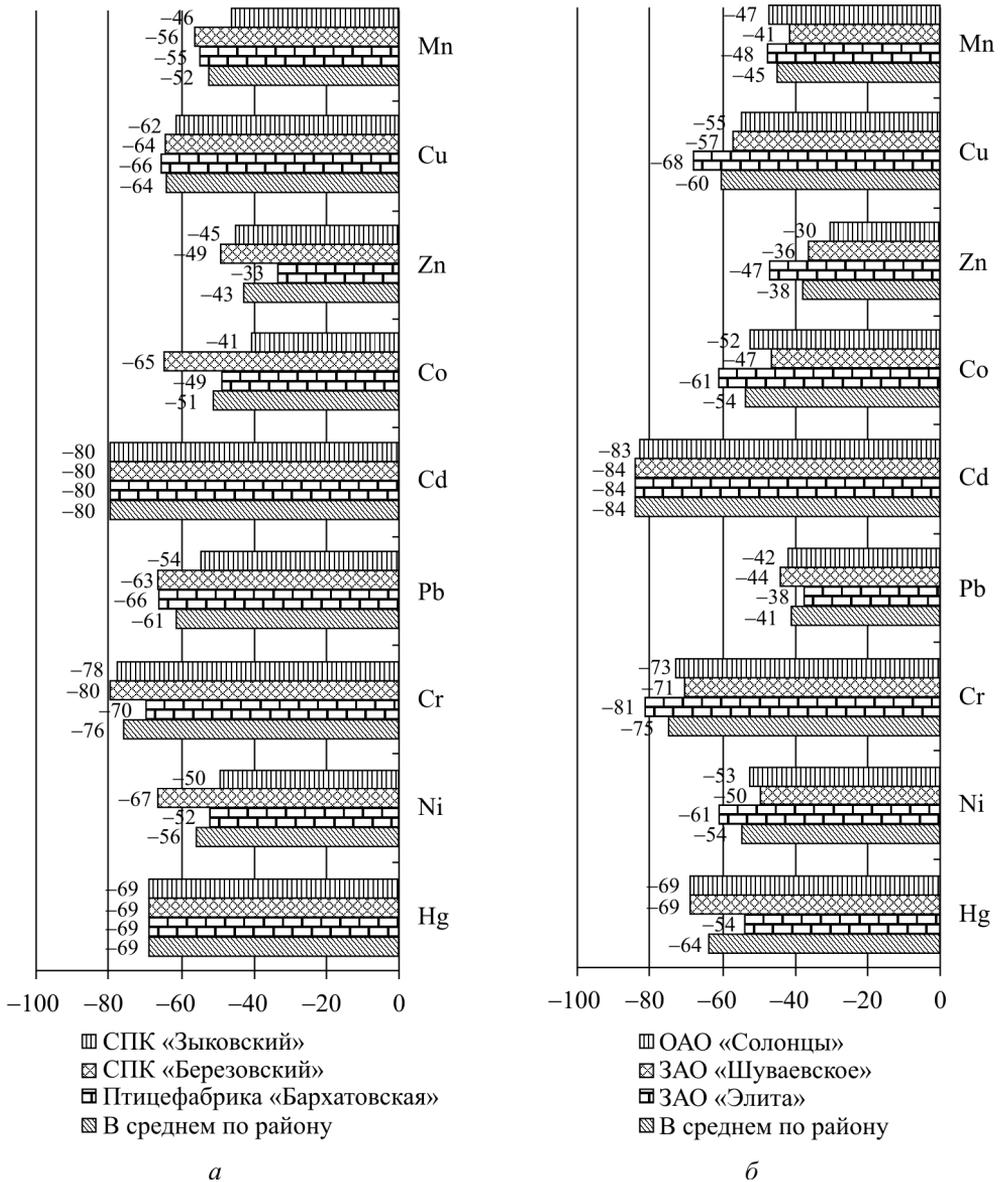


Рис. 5. Отклонение от кларков содержания тяжелых металлов в почвах, %:  
 а – Березовский район; б – Емельяновский район

### Библиографический список

1. Казакова Н.А. Загрязнение почвы тяжелыми металлами // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2009. – № 1. – С. 29–31.
2. Солошенко В.А., Машанов А.И. Распределение тяжелых металлов в почве и плодовоовощных культурах Красноярского края // Вестник КрасГАУ. – 2011. – № 10. – С. 158–160.
3. Исаков А.Ж., Боев В.М., Засорин Б.В. Оценка риска для здоровья населения факторов окружающей среды // Гигиена и санитария. – 2009. – № 1. – С. 4–5.
4. Серегина Ю.Ю., Семенова И.Н., Кужина Г.Ш. Комплексная оценка загрязнения тяжелыми металлами почвенного покрова прибрежной зоны р. Белая Белорецкого района Республики Башкортостан [Электронный ресурс] // Живые и биокосные системы. – 2013. – № 3. – URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-3/article-4> (дата обращения: 27.09.2018).
5. Юдина Е.В. Особенности накопления и распределения тяжелых металлов в почвах города Абакана // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2016. – № 9 (120). – С. 32–39.
6. Кольцова А.Н., Сироткин В.В. Исследование загрязнения почв Чувашской республики тяжелыми металлами // Вестник Чувашского университета. – 2003. – № 2. – С. 122–130.
7. Теплая Г.А. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды // Астраханский вестник экологического образования. – 2013. – № 1. – С. 182–192.
8. Математическое моделирование процесса очистки загрязненной тяжелыми металлами почвы с помощью биосурфактанта / М.С. Куюкина, И.Б. Ившина, Л.В. Костина, О.А. Коростина, М.А. Осипенко, Ю.И. Няшин // Российский журнал биомеханики. – 2010. – Т. 14, № 4 (50). – С. 35–41.
9. Информационная оценка состояния тяжелых металлов в почвах / В.Н. Гукалов, В.И. Савич, С.Л. Белоухов, О.А. Шапкина, В.В. Верхотуров // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 5. – С. 58–64.
10. Исследование содержания тяжелых металлов в почвенном покрове и растительности рекультивированных территорий / М.А. Яковченко, М.А. Яковченко, О.Б. Константинова, А.А. Косолапова, Л.В. Рогова, Д.Н. Аланкина // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 3 (103). – С. 116–119.
11. Меньшикова Е.А., Ждакаев В.И. Экологическое состояние грунтов городских территорий Пермского края // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. – № 4. – С. 124–132. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.04.10
12. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Московского университета. Сер. География. – 2015. – № 2. – С. 7–10.
13. Красноярск стал первым в рейтинге самых загрязненных городов мира [Электронный ресурс] / Проспект Мира. – URL: <https://prmira.ru/news/v-minuvshie-vyhodnye-krasnoyarsk-stal-samym-gyazlunm-gorodom-v-mire/> (дата обращения 27.09.2018).
14. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2009. – 382 с.

### References

1. Kazakova N.A. Zagryaznenie pochvy tzhzhelymi metallami [Soil contamination with heavy metals]. *Vestnik Ul'janovskoj gosudarstvennoj sel'skohoz'jajstvennoj akademii*, 2009, no. 1, pp. 29-31.
2. Soloshenko V.A., Mashanov A.I. Raspredelenie tzhzhelyh metallov v pochve i plodoovoshnyh kul'turah Krasnojarskogo kraja [Distribution of heavy metals in soil and fruit and vegetable crops of Krasnojarsk region]. *Vestnik KrasGAU*, 2011, no. 10, pp. 158-160.
3. Isakov A.Zh., Boev V.M., Zasorin B.V. Ocenka riska dlja zdorov'ja naselenija faktorov okruzhajushhej sredy [Environmental risk assessment for public health]. *Gigiena i sanitarija*, 2009, no. 1, pp. 4-5.
4. Seregina Ju.Ju., Semenova I.N., Kuzhina G.Sh. Kompleksnaja ocenka zagryaznenija tzhzhelymi metallami pochvennogo pokrova pribrezhnoj zony r. Belaja Beloreckogo rajona Respubliki Bashkortostan [Comprehensive assessment of heavy metal pollution of the soil cover of the coastal zone of the Belaya

river in Beloretsk district of the Republic of Bashkortostan]. *Zhivye i biokosnye sistemy*, 2013, no. 3. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-3/article-4> (accessed 27.09.2018).

5. Judina E.V. Osobennosti nakopleniya i raspredeleniya tjazhelyh metallov v pochvah goroda Abakana [Features of accumulation and distribution of heavy metals in soils of the city of Abakan]. *Vestnik KrasGAU*, 2016, no. 9 (120), pp. 32-39.

6. Kol'cova A.N., Sirotkin V.V. Issledovanie zagryazneniya pochv chuvashskoj respubliki tjazhelymi metallami [Investigation of soil contamination of the Chuvash Republic with heavy metals]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2003, no. 2, pp. 122-130.

7. Teplaja G.A. Tjazhelye metally kak faktor zagryazneniya okruzhajushhej sredy [Heavy metals as a factor of environmental pollution]. *Astrahanskij vestnik jekologicheskogo obrazovanija*, 2013, no. 1, pp. 182-192.

8. Kujukina M.S., Ivshina I.B., Kostina L.B., Korostina O.A., Osipenko M.A., Njashin Ju.I. Matematicheskoe modelirovanie processa ochistki zagryaznennoj tjazhelymi metallami pochvy s pomoshh'ju biosurfaktanta [Mathematical modeling of the process of purification of soil contaminated with heavy metals using biosurfactant]. *Rossijskij zhurnal biomehaniki*, 2010, T. 14, no. 4 (50), pp. 35-41.

9. Gukalov V.N., Savich V.I., Belopuhov S.L., Shapkina O.A., Verhoturov V.V. Informacionnaja ocenka sostojanija tjazhelyh metallov v pochvah [Information assessment of the state of heavy metals in soils]. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2015, no. 5, pp. 58-64.

10. Jakovchenko M.A., Konstantinova O.B., Kosolapova A.A., Rogova L.V., Alankina D.N. Issledovanie soderzhaniya tjazhelyh metallov v pochvennom pokrove i rastitel'nosti rekul'tivirovannyh territorij [Study of heavy metals content in soil cover and vegetation of recultivated areas]. *Vestnik Kuzbasskogo GTU*, 2014, no. 3 (103), pp. 116-119.

11. Men'shikova E.A., Zhdakaev V.I. Jekologicheskoe sostojanie gruntov gorodskih territorij Permskogo kraja [Ecological condition of soils in urban areas of the Perm region]. *PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urban development*, 2017, no. 4, pp. 124-132. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.04.10.

12. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Klarki himicheskikh jelementov kak jetalony sravnenija v jekogeohimii [Clarke of chemical elements as standards of comparison in environmental geochemistry]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija Geografija*, 2015, no. 2, pp. 7, 9-10.

13. Krasnoyarsk stal pervym v rejtinge samyh zagryaznennyh gorodov mira [Krasnoyarsk became the first in the ranking of the most polluted cities in the world] / Prospekt Mira. – URL: <https://prmira.ru/news/v-minuvshie-vyhodnye-krasnoyarsk-stal-samym-gryaznym-gorodom-v-mire/> (accessed 27.09.2018).

14. Grigor'ev N.A. Raspredelenie himicheskikh jelementov v verhnej chasti kontinental'noj kory. [Distribution of chemical elements in the upper continental crust]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2009, 382 p.

Получено 2.11.2018

**T. Zaznobina, O. Ivanova, E. Alkhimenko**

## **HEAVY METALS CONTENT IN THE SOILS OF SUBURBAN AREAS OF THE CITY OF KRASNOYARSK**

One of the important and relevant problems of modern ecology is soil pollution with heavy metals, which affects almost all components of the biosphere. The aim of the research was to study the content of heavy metals in the soils of the suburban zone of Krasnoyarsk. For this purpose 6 of the agricultural enterprises located in the two districts of the suburban area of Krasnoyarsk were chosen: Zykovsky APK, Berezovsky APK and Barkhatovskaya poultry farm in the Berezovsky district, Soloncy JSC, Shuvaevskoe CJSC and Elita CJSC in the Emelyanovsky district. As a result of the research it is established that the smallest quantity of Mn, Zn, Co and Ni was accumulated in the soils of Berezovsky APK, the smallest quantity of Mn, Cu, Zn, Co, Cr and Ni – in the soils of Elita CJSC.

In the soils of the farms of Berezovsky and Emelyanovsky districts the content of Mn, Cu, Pb and Hg was by 42–99 % lower than MPC, the concentration of Zn and Co was by 20–127 % above the normalized values; the content of Cr and Ni in these soils was 3–6 times higher than the MPC values. Heavy metals were below their Clarke numbers by 41–80 % in the Berezovskiy district and by 30–84 % in the Emelyanovsky district. The results suggest the need for measures to reduce the content of Zn, Co, Cr and Ni in the soils in these districts, as increased concentrations of these metals can have a negative impact, first of all on soil fertility, secondly on the trophic levels of the food chain, ultimately posing a threat to public health, as well as to the environmental situation in general.

**Keywords:** heavy metal, soil, maximum permissible concentration, Clarke, environment.

**Зазнобина Татьяна Вячеславовна** (Красноярск, Россия) – аспирант, младший научный сотрудник, Красноярский научно-исследовательский институт животноводства – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (660049, Красноярск, пр. Мира, 66, e-mail: tv-kulakova@mail.ru).

**Иванова Ольга Валерьевна** (Красноярск, Россия) – доктор сельскохоз. наук, профессор РАН, директор, Красноярский научно-исследовательский институт животноводства – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (660049, Красноярск, пр. Мира, 66, e-mail: krasnptig75@yandex.ru).

**Алхименко Елена Владимировна** (Красноярск, Россия) – временно исполняющий обязанности директора, Государственный центр агрохимической службы «Красноярский» (660020, г. Красноярск, ул. Спандаряна, 3а, e-mail: agrohim\_24\_1@mail.ru).

**Zaznobina Tatyana** (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Graduate Student, Associated Researcher, Krasnoyarsk Research Institute of Animal Husbandry – Separate Division of FRC KSC SB RAS (660049, Krasnoyarsk, 66, Mira av., e-mail: tv-kulakova@mail.ru).

**Ivanova Olga** (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the RAS, Director, Krasnoyarsk Research Institute of Animal Husbandry – Separate Division of FRC KSC SB RAS (660049, Krasnoyarsk, 66, Mira av., e-mail: krasnptig75@yandex.ru).

**Alkhimenko Elena** (Krasnoyarsk, Russian Federation) – Acting Director, FSBI SASC "Krasnoyarsk" (660020, Krasnoyarsk, 3a, Spandaryana st., e-mail: agrohim\_24\_1@mail.ru).

DOI 10.15593/2409-5125/2019.02.06

УДК 661.183 + 628.316.12:665.7

**В.А. Голяткина, И.В. Могилевская, О.В. Колотова,  
Т.Е. Яшкина, Е.А. Карасев, И.А. Голяткин**

Волгоградский государственный технический университет

## **РАЗРАБОТКА БИОСОРБЕНТА НА ОСНОВЕ КАРБОНИЗАТА ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРИРОДНЫХ И СТОЧНЫХ ВОД ОТ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИЙ**

Проведен анализ научной и научно-технической литературы, рассмотрен характер поведения загрязнений-нефтепродуктов в водной среде и почве. Проанализированы самые распространенные носители для биосорбентов, а также проведено сравнение их свойств со свойствами карбонизата, что позволило сделать вывод о возможности его использования в качестве матрицы для микроорганизмов. В ходе исследований была отработана методика получения карбонизата путем низкотемпературного пиролиза при 500 °С избыточного активного ила очистных сооружений г. Волгограда. Для полученного носителя для иммобилизации определен оптимальный размер фракции, который составил 0,6–1,0 мм. Подобрана методика иммобилизации микроорганизмов путем перемешивания суспензии с сорбентом в течение 1 ч, и определена степень прикрепления бактериального штамма ВГТУ-02 с липолитической и нефтеокисляющей активностью из рабочей коллекции музейных культур кафедры Промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности Волгоградского государственного технического университета. Отработана технология получения биосорбента, которая включает в себя две стадии: получение носителя с оптимальными свойствами и иммобилизация микроорганизмов на исследуемом сорбенте. Также определена степень очистки модельной жидкости от нефтезагрязнения, которая составила 98 %. Проведена сравнительная оценка уже используемых биосорбентов с исследуемым образцом на основе карбонизата с иммобилизованным на нем бактериальном штамме ВГТУ-02. Полученные экспериментальные данные позволили сделать вывод о том, что данный биосорбент на основе карбонизата из избыточного активного ила может быть использован для удаления поллютантов из загрязненных нефтью и продуктами их переработки почв и вод.

**Ключевые слова:** нефть, нефтезагрязнения, биосорбенты, бактериальные штаммы, ИАИ, карбонизат, иммобилизация.

Наземные объекты нефтедобычи и переработки нефти в товарные продукты в силу технологических особенностей и производственной спе-

---

Разработка биосорбента на основе карбонизата для очистки природных и сточных вод от нефтезагрязнений / В.А. Голяткина, И.В. Могилевская, О. В. Колотова, Т.Е. Яшкина, Е.А. Карасев, И.А. Голяткин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2019. – № 2. – С. 69–80. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.06

Golyatkina V.A., Mogilevskaya I.V., Kolotova O.V., Yashkina T.E., Karasev E.A., Golyatkin I.A. Development of a Biosorbent Based on Carbonated Coal for Purifying Natural and Waste Water from Oil Pollution. PNRPU. Applied Ecology. Urban Development. 2019. No. 2. Pp. 69-80. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.06

цифики являются антропогенными источниками загрязнения окружающей среды. К таким объектам относятся транспортные магистральные трубопроводы, предприятия нефтепромысла и нефтепереработки, нефтебазы, заправочные станции. На всех приведенных объектах возможно возникновение различных аварий, число которых ежегодно достигает порядка 25 тыс. инцидентов [1, 2].

Нефть, несмотря на большую вязкость, проникает в почву, а затем и в грунтовые воды, по которым может распространяться на большие расстояния. На поверхности воды гидрофобная нефть образует тонкую пленку, которая подвергается химическим, физическим, механическим и биохимическим процессам: растворению, испарению, эмульгированию, биодegradации, окислению и седиментации. Эта пленка частично препятствует газообмену между воздухом и водой, что приводит к гибели живых организмов. Некоторые растворимые в воде окисленные компоненты нефти обладают и прямым токсическим действием [3].

Различают два основных микробиологических подхода к очистке от нефтезагрязнений:

- методы, основанные на активизации жизнедеятельности естественной микрофлоры окружающей среды;
- методы, основанные на внесении в зону загрязнений дополнительных микробиологических объектов к уже имеющимся естественным микроорганизмам [4].

При введении штаммов нефтеокисляющих микроорганизмов в загрязненную среду наблюдается ускорение микробного разложения нефти, но для этого необходимо обогащать эту среду питательными элементами, главным образом фосфором и азотом. В связи с тем, что нефть имеет многокомпонентный состав, возникают трудности в подборе микробиологических рецептур для более эффективного устранения нефтяного загрязнения [1].

С целью увеличения эффективности сорбционных материалов углевodородоокисляющие микроорганизмы закрепляют на пористой поверхности углеродной матрицы, в результате чего получают биосорбенты. Углевodородоокисляющие микроорганизмы – микроорганизмы, способные ассимилировать углерод путем биохимической трансформации токсичных углевodородов в экологически безвредные соединения, не представляющие опасности для окружающей среды [4]. Преимущество биосорбентов по сравнению со свободными микроорганизмами заключается в том, что наблюдается более высокая выживаемость клеток микроорганизмов при контакте с загрязнением и при хранении. Носитель обеспечивает благоприятное микроокружение клеткам и служит своеобразным протектором.

Биосорбенты благодаря наличию носителя обладают двойным действием: поглощают загрязнения и одновременно осуществляют его биологическую деструкцию. Носители повышают плавучесть биосорбента для увеличения времени его контакта с нефтяной пленкой [5].

Материал, на котором иммобилизуют микроорганизмы, может быть гранулированным, порошкообразным, волокнистым и тканевым. Среди органических носителей наибольшее распространение получила сосновая кора, природный торф и его различные модификации, модифицированный мох, опилки, древесные стружки. Среди неорганических веществ используют керамику, вспученный перлит, каолин, вспененный графит, глинистый минерал вермикулит и т.д. [3].

Использование нефтяных биосорбентов аналогично применению других сорбентов. При очистке от нефтяных загрязнений с поверхности воды прежде всего локализуют разлившуюся нефть бонами. Затем на загрязненный участок наносят носитель с прикрепленными микроорганизмами любым механическим или ручным способом. Распыление препаратов с судов ограничивается погодными условиями. Применение биосорбентов с помощью авиации позволяет начинать ликвидацию аварии при ветре до 25 м/с, т.е. непосредственно после разлива даже в штормовых условиях. Ожидают полного поглощения загрязнения и образования плавучего конгломерата. Затем стягивают боновое загрязнение, собирая отработанный биосорбент вблизи места, удобного для сбора [6].

Потенциальным потребителем таких биопрепаратов могут являться нефтедобывающие и нефтеперерабатывающие предприятия, предприятия промышленной отрасли, нефтеналивные и заправочные станции, автотранспортные предприятия, подразделения МЧС, станции технического обслуживания, предприятия по транспортировке нефти и нефтепродуктов и др. [4].

Самым распространенным материалом для носителя иммобилизованных микроорганизмов является торф. Способ получения биосорбента на основе торфа включает в себя иммобилизацию на нефтяном гидрофобном сорбенте дрожжевых грибов *Candida lipolytica*, *Candida guilliermobdii* и бактерий *Rhodococcus erythropolis*, *Arthrobacter sp.* в количестве от 10 до 50 % (по сухому весу) с последующей сушкой на воздухе [7]. Под влиянием жизнедеятельности микроорганизмов происходит утилизация нефти. В ходе лабораторных опытов было выявлено, что через две недели опыта бактерии и дрожжевые грибы способствовали деструкции нефти. При использовании *Candida lipolytica* снижение загрязнения произошло на 31,5 %, при использовании *Candida guilliermobdii* – на 30 %, на 35 % – при использова-

нии культуры бактерий *Rhodococcus erythropolis* и на 33 % при использовании *Arthrobacter sp.* [8].

В качестве носителя могут выступать и глины. Использование в качестве носителя глины и выбранного штамма позволяет получить сорбент, способный локализовать разлив за счет активно связываемых нефтяных загрязнений (благодаря носителю) и активно утилизировать загрязнение (благодаря иммобилизованным микроорганизмам). Глина, попадая на поверхность воды, растекается, вместе со шламом обогащения бурого угля – наполнителем для штамма *Pseudomonas fluorescens* ВКГ РСАМ00538. Кроме того, глина обесцвечивает воду, удаляет нефтяные примеси, особо токсичные хлорорганические соединения, различные ПАВ и органические соединения [9].

На нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих предприятиях внедряются системы термического обезвреживания избыточного активного ила, в результате чего образуется до 7–8 % (от исходной массы отхода) макропористого материала – карбонизата [10]. Использование продукта, полученного из избыточного активного ила, в качестве биосорбента, применяемого для ликвидации нефтяного загрязнения, позволит сократить объемы складированных в окружающей среде отходов и наиболее полно использовать их ресурсный потенциал [11]. Физические характеристики карбонизата представлены в таблице [12]. Они уступают некоторым углеродным сорбентам, но достаточны для использования в качестве носителя для закрепления микроорганизмов на пористой поверхности, о чем свидетельствует значительное количество макропор, характеризующихся размерами, сопоставимыми с размерами клеток микроорганизмов, иммобилизованных на носителе [12].

Показатель	Значение
Насыпная плотность, г/дм <sup>3</sup>	385
Механическая прочность на истирание, %	50
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> в 1 г	39,3 ± 0,6
Пористость (объем пор) общая, см <sup>3</sup> /г	0,6
Пористость (объем пор) макропоры, см <sup>3</sup> /г	0,55
Влагоемкость, см <sup>3</sup> /г	0,6

Первым этапом эксперимента было получение карбонизата из избыточного активного ила (ИАИ) согласно литературным данным [13]. Для этого можно воспользоваться процессом пиролиза ИАИ, влажность которого составляет 82–85 %. Сначала ИАИ высушивают при 100–109 °С до установления постоянной массы навески. Высушивание ИАИ (навески

массой по 10 г каждая) до постоянного веса проводили в течение 5 ч при 100 °С в сушильном шкафу ШС-80-01. Затем высушенный ИАИ подвергали низкотемпературному пиролизу при 500 °С около 20–30 мин в муфельной печи (модель РТ-200), в результате чего получили карбонизат массой от 7 до 8 % от исходной навески без дополнительной обработки реагентом [13] (данная стадия применима в основном в промышленных масштабах). Общая начальная масса ИАИ составила 180,825 г, масса полученного карбонизата ( $12,667 \pm 2,432$ ) г (7 % от исходного веса). Процесс низкотемпературного пиролиза проводили в муфельной печи при условиях, описанных выше. Продукт, полученный в результате низкотемпературного пиролиза, измельчали, после классифицировали на фракции с помощью вибросит. Измельченные фракции стерилизовали в сухожаровом шкафу при температуре 160 °С в течение 1 ч. Распределение по фракциям полученного карбонизата представлено в табл. 1.

Таблица 1

## Полученные фракции карбонизата

Обозначение фракции	Размер частиц, мм	Масса карбонизата, г
$\Phi_1$	> 1,0	$1,365 \pm 0,235$
$\Phi_2$	1,0–0,6	$2,765 \pm 0,201$
$\Phi_3$	< 0,6	$8,150 \pm 0,326$

На следующем этапе эксперимента осуществляли прикрепление выбранного микроорганизма-нефтедеструктора к полученному носителю и определяли эффективность иммобилизации штамма ВГТУ-02. Данный штамм был выделен из донных отложений Северного Каспия на селективной среде для липолитических микроорганизмов, в ходе серии экспериментов у данного штамма была выявлена способность потреблять сырую нефть и дизельное топливо в качестве единственного источника углерода [14], поэтому штамм ВГТУ-02 и использовали в данной серии экспериментов для прикрепления на полученный сорбент.

Иммобилизацию микроорганизмов на исследуемый носитель осуществляли методом статической адсорбции путем перемешивания 30 мл взвеси микроорганизмов, приготовленной по стандарту мутности на 10 ед. в фосфатном буфере (рН = 7), и 1 г носителя на магнитной мешалке при скорости 100 об/мин и температуре 30 °С [15]. Для приготовления микробной взвеси использовали суточную культуру микроорганизмов, выращенных на скошенном агаре. Исходную концентрацию микроорганизмов во взвеси определяли высевом на чашки Петри с МПА. По истечении

времени перемешивания производили отстаивание для осаждения частиц носителя и высев надосадочной культуральной жидкости на МПА для определения остаточной концентрации микроорганизмов в суспензии. Количество иммобилизованных бактериальных клеток, в % от исходного, определяли по формуле

$$K_{\text{и}} = \frac{C_{\text{исх}} - C_{\text{кон}}}{C_{\text{исх}}} 100 \%,$$

где  $C_{\text{исх}}$  – исходная концентрация бактериальной суспензии;  $C_{\text{кон}}$  – остаточная концентрация бактериальной суспензии.

Результаты серии экспериментов на разных фракциях исследуемого сорбента представлены в таблице.

Размер фракции, мм	$\Phi_1 > 1$	$\Phi_2 1 > \Phi_2 > 0,6$ мм	$\Phi_3 < 0,6$ мм
Эффективность иммобилизации, %	$98,05 \pm 2,845$	$93,2 \pm 4,808$	$92,7 \pm 6,47$

Анализируя полученные данные, сделали вывод о том, что для иммобилизации можно рекомендовать использовать фракцию карбонизата размером 1,0–0,6 мм. Частицы меньшего размера имеют пылевую структуру, с ними сложнее работать, они имеют меньший процент иммобилизации [10], и их легче подвернуть утилизации после низкотемпературного пиролиза. Частицы большего размера имеют больший процент иммобилизации, однако частицы размером 1,0–0,6 мм лучше держатся на поверхности загрязненной модельной водной системы, что обеспечивает большее время контакта с загрязнителем с плотностью меньшей, чем плотность сточной воды. Частицы карбонизата большего размера можно использовать для приготовления биосорбента для очистки почв от нефтезагрязнений.

В ходе эксперимента была определена степень очистки модельной жидкости от нефтезагрязнения. С целью оценки эффективности применения разработанного биосорбента на основе карбонизата для очистки модельных сред от нефти исходное и конечное содержание нефтепродуктов в средах определяли флуориметрическим методом (ПНД Ф 14.1:2:4.128–98) на анализаторе жидкости «Флюорат-02-2М».

Для проведения эксперимента в три флакона внесли 2,4 мл нефти (2 % об.) и 120 мл питательной среды. Флакон № 1 сделали контрольным, он содержал в себе лишь питательную среду и нефть. Во флакон № 2 к модельной нефтезагрязненной жидкости внесли 4 г сорбента. В качестве сорбента выступал карбонизат, который получили в результате низкотем-

пературного пиролиза, без прикрепленного бактериального штамма ВГТУ-02. Во флакон № 3 добавили 4 г свежеприготовленного биосорбента. Во флакон № 4 внесли только суточную культуру бактериального штамма ВГТУ-02 с концентрацией  $1 \cdot 10^8$  кл/мл.

Флаконы с модельными системами культивировали в течение 10 сут, что обусловлено предыдущими исследованиями и особенностями динамики роста применяемых бактериальных культур, при 30 °С в термостате [15], для улучшения контакта сорбента и биосорбента с загрязнителем дополнительно использовали перемешивание с помощью магнитной мешалки. После отстаивания осуществлялся визуальный контроль, флаконы № 2, № 3 и № 4 сравнивали с флаконом № 1. Отмечено, что во флаконе № 2 жидкость была практически прозрачная, с тонкой нефтяной пленкой на поверхности. Во флаконе № 3 нефтяная пленка практически отсутствовала, наблюдалось помутнение, что связано с ростом микроорганизмов на прикрепленной к носителю культуре. Во флаконе № 4 отмечено постепенное увеличение мутности модельной жидкости, связанное с увеличением концентрации штамма ВГТУ-02, и нарастание степени эмульгирования нефтяной пленки.

Результаты проведенного исследования представлены в табл. 2.

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные данные по эффективности процесса очистки модельных растворов от нефти

№ п/п	Состав модельного раствора	Исходная концентрация нефти $\pm \Delta$ , г/дм <sup>3</sup>	Конечная концентрация нефти $\pm \Delta$ , г/дм <sup>3</sup>	Степень очистки от нефти, %
1	Минеральная питательная среда, нефть	22 092 $\pm$ 5523	22 092 $\pm$ 5523	–
2	Минеральная питательная среда, нефть, сорбент	22 092 $\pm$ 5523	4092 $\pm$ 1023	81,47
3	Минеральная питательная среда, нефть, биосорбент	22 092 $\pm$ 5523	339 $\pm$ 85	98,46
4	Минеральная питательная среда, нефть, суспензия ВГТУ-02	22 092 $\pm$ 5523	6818 $\pm$ 1703	69,14

Приведенные в табл. 2 данные показывают, что при культивировании в течение 10 сут степень очистки от нефти модельного раствора сорбентом, приготовленным из карбонизата, составила 81,47 %. При тех же условиях степень очистки от нефти при использовании биосорбента составила 98,46 %. Анализ полученных данных показывает, что при очистке вод и почв от нефтезагрязнений эффективнее использовать биосорбент.

Для оценки полученных данных была изучена информация про используемым биопрепаратам с применением сорбентов для очистки от нефтезагрязнений (табл. 3) [16, 17].

Таблица 3

Сравнение эффективности очистки биосорбентов «Биосорбонафт», «Унисорб-био» и биосорбента на основе карбонизата

Показатель	«Биосорбонафт»	«Унисорб-био»	Биосорбент на основе карбонизата
Общая характеристика	Состоит из экологически чистого гидрофобного торфоминерального нефтяного сорбента («Сорбонафт») и стабилизированной водномасляной эмульсии микроорганизмов-нефтедеструкторов, нанесенной методом-распыления	Вспененный особым способом карбамид (мочевина), что является само по себе минеральным удобрением почв	Бактериальные штаммы, ВГТУ-02, находящиеся в коллекции музейных культур кафедры ПЭБЖ, иммобилизованные на карбонизате
Степень очистки	80–95 %	65–80 %	98–99 %
Токсичность	Нет	Нет	Нет
Применение	Для сбора и утилизации нефти и нефтепродуктов с поверхности воды и почвы	Сбор и биоразложение нефтепродуктов в природе (вода, почва, грунт)	Предназначен для утилизации нефти и нефтепродуктов с поверхности воды и почвы

Таким образом, в ходе проведенных исследований было определено, что карбонизат из отходов избыточного активного ила с размером фракции 0,6–1,0 мм не уступает уже имеющимся аналогам по степени очистки и может быть использован для очистки от нефтезагрязнений природных и сточных вод. Степень очистки модельной системы от нефти с помощью полученного карбонизата из ИАИ составила 98,46 % в течение 10 сут, что не уступает аналогичным продуктам. Использование карбонизата активного ила в качестве биосорбента, применяемого для ликвидации нефтяного загрязнения, позволит не только улучшить качество очищаемой воды, но и сократить объемы избыточного активного ила, подлежащего захоронению, что существенно снизит экологическую нагрузку на объекты гидросферы и литосферы.

**Библиографический список**

1. Давыдова С.Л., Тагасов В.И. Нефть и нефтепродукты в окружающей среде: учеб. пособие. – М.: Изд-во РУДН, 2004. – 163 с.
2. Greenpeace: сайт. – URL: <https://www.greenpeace.org/russia/Global/russia/report/oil-spills-may-18.pdf> (дата обращения: 21.08.2018).
3. Вылкован А.И., Венцолис Л.С. Современные методы и средства борьбы с разливами нефти: науч.-практ. пособие. – СПб.: Центр-Техинформ, 2009. – 309 с.
4. Жданова Е.С., Рудакова Л.В. Обоснование возможности получения биосорбентов для ликвидации нефтяных загрязнений природных объектов // Вестник Пермского государственного технического университета. Урбанистика. – 2011. – № 3. – С. 97–107.
5. Прикладная экобиотехнология: учеб. пособие: в 2 т. Т. 1 / А.Е. Кузнецов, Н.Б. Градова, С.В. Лушников, М. Энгельхарт, Т. Вайссер, М.В. Чеботаева. – 3-е изд. – М.: Бином, 2015. – 626 с.
6. Перспективы применения биосорбентов для очистки водоемов при ликвидации аварийных разливов нефти / Е.А. Артох, А.С. Мазур, Т.В. Украинцев, Л.В. Костюк // Известия СПбГТИ (ТУ). – 2014. – № 26. – С. 58–66.
7. Пат. 2214859 Российская Федерация, МПК С1В01J20/24. Способ получения гидрофобного сорбента / О.М. Гридин, А.О. Гридин, В.Ю. Муратов, Е.В. Муратов; заявитель и патентообладатель О.М. Гридин, А.О. Гридин, В.Ю. Муратов, Е.В. Муратов. – № 2002124160/12; заявл. 11.09.2002; опубл. 27.10.2003. – Бюл. № 30.
8. Пат. 2318736 Российская Федерация, МПК С2С02F 3/34. Биосорбент для очистки водоемов от нефтепродуктов на основе штаммов бактерий и дрожжевых грибов / Ф.М. Хабибулина, И.Б. Арченгова, А.А. Шубаков, И.Э. Шарапова, Г.Г. Романов, И.Ю. Чернов, А.И. Таскаев, Г.М. Тулянкин, Ю.С. Жульчихин, А.Н. Козьминых; заявитель и патентообладатель Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. – № 200104082/13; заявл. 10.02.2006; опубл. 10.03.2008. – Бюл. № 7.
9. Пат. 25299771 Российская Федерация, МПК С1С02F 3/34. Биосорбент для ликвидации нефти с поверхности водоемов / Н.А. Галкина, Е.А. Галкин, И.В. Катаева, В.Н. Шафран, А.А. Назаренко, К.А. Вяткин, М.В. Мальцева, Е.А. Ковальчук, Т.А. Кузнецова; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Уралэлектроресурс» – № 2013118363/10; заявл. 10.04.2013; опубл. 27.09.2017. – Бюл. № 27.
10. Рудакова Л.В., Белик Е.С. Обоснование возможности использования карбонизата избыточного активного ила в качестве биосорбента, применяемого в технологии биоремедиации нефтезагрязненных почв // Теоретическая и прикладная экология. – 2013. – № 1. – С. 22–26.
11. Белик Е.С. Получение нефтяного биосорбента на основе карбонизата – отхода пиролиза избыточного активного ила // Вестник технологического университета. – 2017. – № 14. – С. 120–124.
12. Белик Е.С. Интенсификация процесса биоремедиации нефтезагрязненных почв путем применения биосорбента на основе карбонизата избыточного активного ила: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2014. – 18 с.
13. Экологически безопасный способ утилизации осадков сточных вод биохимических очистных сооружений с получением углеродсодержащих сорбционных материалов / Я.И. Вайсман, И.С. Глушанкова, М.С. Дьяков, М.Б. Ходяшев // Вода: химия и экология. – 2011. – № 3. – С. 14–24.
14. Шмелева Е.О., Соколова И.В., Сиденко Д.А. Изучение активности нефтеокисляющих штаммов, выделенных из объектов окружающей среды, для получения биопрепарата для очистки производственных сточных вод [Электронный ресурс] // Научные труды Кубанского гос. технол. унта (Научные труды КубГТУ): электрон. сетевой политемат. журнал. – 2017. – № 7. – С. 56–62. – URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/1770> (дата обращения: 19.11.2018).
15. Разработка биосорбента на основе отходов растениеводства для очистки сточных вод от нефтепродуктов / О.В. Колотова, И.В. Соколова, И.В. Владимцева, К.Е. Заикина, А.О. Павлова // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. – 2018. – № 4. – С. 58–72.
16. Ecosorb: сайт. – URL: <http://ecosorb.su/сорбент-«унисорб-био».html> (дата обращения: 17.03.2018).

17. Eko-tec: сайт. – URL: <http://www.eko-tec.ru/product/5157152/> (дата обращения: 9.12.2017).

18. Выделение и изучение липидоокисляющих микроорганизмов – обитателей Северного Каспия / О.В. Колотова, И.В. Соколова, И.В. Владимцева, Т.В. Беленькова, В.С. Шевцова // Вестник Казанского технол. ун-та. – 2017. – Т. 20, № 6. – С. 135–138.

### References

1. Davydova S.L., Tagasov V.I. Neft' i nefteprodukty v okruzhaiushchei srede [Oil and oil products in the environment]. Moscow, 2004, 163 p.

2. Greenpeace, available at: <https://www.greenpeace.org/russia/Global/russia/report/oil-spills-may-18.pdf> (accessed 21 august 2018).

3. Vulkovan A.I., Ventsiulis L.S. Sovremennyye metody i sredstva bor'by s razlivaminefti [Modern methods and means of dealing with oil spills]. Saint Petersburg, Center-Techinform, 2009, 309 p.

4. Zhdanova E.S., Rudakova L.V. Obosnovanie vozmozhnosti polucheniia biosorbentov dlia likvidatsii neflianykh zagriaznenii prirodnykh ob'ektov [Justification of the possibility of obtaining biosorbents for the elimination of oil pollution of natural objects]. *Perm state technical university urbanity bulletin*, 2011, no. 3, pp. 97-107.

5. Kuznetsov A.E., Gradova N.B., Lushnikov S.V., Engelhart M., Weisser T., Chebotaeva M.V. Prikladnaia ekobiotehnologiya. Tom 1 [Applied ecobiotechnology. Vol. 1]. Moscow, Binom, 2015, 626 p.

6. Artyukh E.A., Mazur A.S., Ukrainsev T.V., Kostyuk L.V. Perspektivy primeneniia biosorbentov dlia ochistki vodoemov pri likvidatsii avariinykh razlivov nefli [Prospects for the use of biosorbents for cleaning water bodies during oil spill response]. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo institute*, 2014, no. 26, pp. 58-66.

7. Gridin O.M., Gridin A.O., Muratov V.Iu., Muratov E.V. Sposob polucheniia gidrofobnogo sorbenta [A method for producing a hydrophobic sorbent]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2002124160/12 (2003).

8. Khabibulina F.M., Archegova I.B., Shubakov A.A., Sharapova I.E., Romanov G.G., Chernov I.Iu., Taskaev A.I., Tuliankin G.M., Zhul'chikhin Iu.S., Koz'minykh A.N. Biosorbent dlia ochistki vodoemov ot nefteproduktov na osnove shtamov bakterii i drozhzhevykh gribov [Biosorbent for cleaning ponds from petroleum products based on strains of bacteria and yeast fungi]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 200104082 / 13 (2008)

9. Galkina N.A., Galkin E.A., Kataeva I.V., Shafran V.N., Nazarenko A.A., Vyatkin K.A., Maltseva M.V., Kovalchuk E.A., Kuznetsova T.A. Biosorbent dlia likvidatsii nefli s poverkhnosti vodoemov [Biosorbent for the elimination of oil from the surface of water bodies]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2013118363/10 (2017)

10. Rudakova L.V., Belik E.S. Obosnovanie vozmozhnosti ispol'zovaniia karbonizata izbytochnogo aktivnogo ila v kachestve biosorbenta, primeniaemogo v tekhnologii bioremediatsii neftezagriaznennykh pochv [Substantiation of the possibility of using carbonized excess activated sludge as a biosorbent used in the technology of bioremediation of oil-contaminated soils]. *Teoreticheskaiia i prikladnaia ekologiya*, 2013, no. 1, pp. 22-26.

11. Belik E.S. Poluchenie neflianogo biosorbenta a osnove karbonizata – otkhoda piroliza izbytochnogo aktivnogo ila [Getting oil biosorbent based on carbonisate – waste pyrolysis of excess active sludge]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, no. 14, pp. 120-124.

12. Belik E.S. Intensifikatsiia protsessa bioremediatsii neftezagriaznennykh pochv putem primeneniia biosorbenta na osnove karbonizata izbytochnogo aktivnogo ila [Intensification of the process of bioremediation of oil-polluted soils through the use of a biosorbent based on carbonisate of excess activated sludge]. Abstract of Ph. D. thesis. Perm, 2014, 18 p.

13. Vaisman Ia.I., Glushankova I.S., D'iaikov M.S., Khodiashev M.B. Ekologicheskii bezopasnyi sposob utilizatsii osadkov stochnykh vod biokhimicheskikh ochistnykh sooruzhenii s polucheniem uglerodsoderzhashchikh sorbtsionnykh materialov [Environmentally safe method of disposal of wastewater from biochemical treatment plants using carbon-containing sorption materials]. *Voda: khimiia i ekologiya*. 2011. no. 3. pp. 14-24.

14. Shmeleva E.O., Sokolova I.V., Sidenko D.A. Izuchenie aktivnosti nefteokisliayushchikh shtammov, vydelennykh iz ob'ektov okruzhaiushchei sredy, dlia polucheniia biopreparata dlia ochistki proizvodstvennykh stochnykh vod [The study of the activity of oil-oxidizing strains isolated from environmental objects to obtain a biological product for the treatment of industrial wastewater]. *Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, no. 7, pp. 56-62, available at: <http://ntk.kubstu.ru/file/1770>. (accessed 7 May 2018).

15. Kolotova O.V., Sokolova I.V., Vladimtseva I.V., Zaikina K.E., Pavlova A.O. Razrabotka biosorbenta na osnove othodov rasteniyevodstva dlya ochistki stochnykh vod ot nefteproduktov [Development of a biosorbent based on garden waste for cleaning]. *PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urban development*, 2018, no. 4, pp. 58-72.

16. Ecosorb, available at: <http://ecosorb.ru/сорбент-«унисорб-био».html> (accessed 17 March 2018).

17. Eko-tec, available at: <http://www.eko-tec.ru/product/5157152/> (accessed 9 December 2017).

18. Kolotova O.V., Sokolova I.V., Vladimtseva I.V., Belen'kova T.V., Shevtsova V.S. Vydelenie izuchenie lipidookisliayushchikh mikroorganizmov – obitatelei Severnogo Kaspiia [Isolation and study of lipid-oxidizing microorganisms – inhabitants of the Northern Caspian]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, no. 6, pp. 135-138.

Получено 19.11.2018

**V. Golyatkina, I. Mogilevskaya, O. Kolotova,  
T. Yashkina, E. Karasev, I. Golyatkin**

## **DEVELOPMENT OF A BIOSORBENT BASED ON CARBONATED COAL FOR PURIFYING NATURAL AND WASTE WATER FROM OIL POLLUTION**

The analysis of scientific and technical literature was carried out, the behavior of oil products pollution in water and soil was examined. The most common carriers for biosorbents have been analyzed, and their properties have been compared with the properties of carbonated coal, which led to the conclusion about the possibility of its use as a matrix for microorganisms. In the course of the research, a technique was developed to obtain carbonated coal by low-temperature pyrolysis at 500° C of excess activated sludge from the wastewater treatment plant in the city of Volgograd. For the obtained carrier for immobilization, the optimal size of the fraction was determined, which was 0.6 – 1 mm. A technique for immobilization of microorganisms by mixing the suspension with the sorbent for an hour was selected, and the degree of attachment of the VSTU-02 bacterial strain with lipolytic and oil-oxidizing activity from the working collection of museum cultures of the PEBZh Department of the VOLGTU was determined. A technology for biosorbent production was developed, which includes two steps: obtaining a carrier with optimal properties and immobilization of microorganisms on the sorbent under study. The degree of purification of the model fluid from oil pollution was also determined, which amounted to 98%. A comparative assessment of the already used biosorbents with the test sample based on carbonated coal with the bacterium strain VGTU-02 immobilized on it was carried out. The obtained experimental data allowed concluding that this biosorbent based on carbonated coal of excess activated sludge can be used to remove pollutants from soils and waters contaminated with oil and oil products.

**Keywords:** oil, oil pollution, biosorbents, bacterium strains, excess activated sludge, carbonated coal, immobilization.

**Голяткина Валерия Алексеевна** (Волгоград, Россия) – магистрант кафедры «Промышленная экология и безопасность жизнедеятельности», Волгоградский государственный технический университет (400131, Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: ms.vallerri@yandex.ru).

**Могилевская Ирина Владимировна** (Волгоград, Россия) – канд. биол. наук, доцент кафедры «Промышленная экология и безопасность жизнедеятельности», Волгоградский государственный технический университет (400131, Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: mogi-irina@yandex.ru).

**Колотова Ольга Владимировна** (Волгоград, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная экология и безопасность жизнедеятельности», Волгоградский государственный технический университет (400131, Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: olgakolotova@mail.ru).

**Яшкина Татьяна Евгеньевна** (Волгоград, Россия) – магистрант кафедры «Промышленная экология и безопасность жизнедеятельности», Волгоградский государственный технический университет (400131, Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: toshamidvich@yandex.ru).

**Карасев Евгений Александрович** (Волгоград, Россия) – магистрант кафедры «Промышленная экология и безопасность жизнедеятельности», Волгоградский государственный технический университет (400131, Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: karasyov\_94@mail.ru).

**Голяткин Иван Александрович** (Волгоград, Россия) – аспирант кафедры «Автоматические установки», Волгоградский государственный технический университет (400131, Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: vano006@yandex.ru).

**Golyatkina Valeria** (Volgograd, Russia) – Master Student of the Department "Industrial ecology and life safety", Volgograd State Technical University (400131, Volgograd, Lenin av., 28, e-mail: ms.vallerri@yandex.ru).

**Mogilevskaya Irina** (Volgograd, Russia) – Ph.D. in Biological Sciences, Associate Professor of the Department "Industrial ecology and life safety", Volgograd State Technical University (400131, Volgograd, Lenin av., 28, e-mail: mogi-irina@yandex.ru).

**Kolotova Olga** (Volgograd, Russia) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Industrial ecology and life safety", Volgograd State Technical University (400131, Volgograd, Lenin av., 28, e-mail: olgakolotova@mail.ru).

**Yashkina Tatyana** (Volgograd, Russia) – Master Student of the Department "Industrial ecology and life safety", Volgograd State Technical University (400131, Volgograd, Lenin av., 28, e-mail: toshamidvich@yandex.ru).

**Karasev Evgeny** (Volgograd, Russia) – Master Student of the Department "Industrial ecology and life safety", Volgograd State Technical University (400131, Volgograd, Lenin av., 28, e-mail: karasyov\_94@mail.ru).

**Golyatkin Ivan** (Volgograd, Russia) – Postgraduate Student of the Department "Automatic Installations", Volgograd State Technical University (400131, Volgograd, Lenin av., 28, e-mail: vano006@yandex.ru).

DOI 10.15593/2409-5125/2019.02.07

УДК 66.074.7:661.249.1

**Л.А. Николаева, А.Н. Хуснутдинов**

Казанский государственный энергетический университет

### **ОЧИСТКА КОКСОВОГО ГАЗА ОТ СЕРОВОДОРОДА ГРАНУЛИРОВАННЫМ КАРБОНАТНЫМ ШЛАМОМ**

Одним из путей решения проблемы дефицита энергетического сырья является использование вторичных энергоресурсов – искусственных горючих газов, образующихся в процессе технологической переработки твердого топлива. Коксовый газ в настоящее время рассматривается как серьезный альтернативный источник горючего топлива. Однако прямое использование коксового газа затруднено наличием в его составе токсичного компонента – сероводорода. В работе предлагается производить очистку коксового газа от сероводорода адсорбционным методом. В качестве сорбционного материала использован отход энергетики – шлам химводоочистки Казанской теплоэлектроцентрали-1, образующийся при коагуляции и известковании природной воды. Представлен химический состав шлама, технология получения гранулированного сорбционного материала на его основе. На модельной установке с неподвижным слоем сорбента проведены исследования свойств шлама. Определена его сорбционная емкость, построены кривые кинетической и изотермической зависимостей адсорбции сероводорода шламом, определено изменение сорбционной емкости шлама по отношению к сероводороду в зависимости от размера его частиц. Рассчитаны оптимальные характеристики адсорбера периодического действия с неподвижным слоем разработанного материала. Произведен расчет экономического и экологического эффекта от использования гранулированного сорбционного материала в качестве адсорбента в схеме очистки коксового газа от сероводорода.

**Ключевые слова:** коксовый газ, гранулированный шлам, сероводород, токсичность, адсорбер, регенерация.

Коксовый газ, образующийся в процессе получения металлургического кокса, в настоящее время рассматривается как серьезный альтернативный источник сырья для химического синтеза или как топливо для выработки электрической и тепловой энергии, автомобильного и железнодорожного транспорта, бытового газоснабжения.

---

Николаева Л.А., Хуснутдинов А.Н. Очистка коксового газа от сероводорода гранулированным карбонатным шламом // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2019. – № 2. – С. 81–91. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.07

Nikolaeva L., Khusnutdinov A. Purification of Coke Gas of Hydrogen Sulphide with Granulated Carbonate Slime. PNRPU. Applied Ecology. Urban Development. 2019. No. 2. Pp. 81-91. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.07

Состав и количество коксового газа зависят от качества углей, поступающих на коксование, и от условий режима коксования. При коксовании происходят реакции разложения сернистых соединений угля, а также реакции взаимодействия этих соединений с другими продуктами пирогенетического разложения угля. В результате этих процессов часть серы переходит в химические продукты коксования, а часть остается в коксе. В коксовый газ переходит от 20 до 35 % общей серы угля.

Основным компонентом сернистых соединений коксового газа является сероводород, на долю которого приходится более 95 % содержащейся в коксовом газе серы. Общее количество сероводорода, образующееся на предприятиях коксохимии РФ, можно оценить величиной порядка 30–50 тыс. т в год [1].

Сероводород токсичен и обладает высокой коррозионной агрессивностью. При сжигании сероводорода образуются диоксид ( $\text{SO}_2$ ) и триоксид серы ( $\text{SO}_3$ ), которые относятся ко II классу опасности вредных веществ и являются причинами кислотных осадков [2]. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка эффективных процессов очистки коксового газа от сероводорода.

В настоящее время известно большое число методов удаления сероводорода из коксового газа, однако практическое значение имеют законченные процессы, позволяющие не только решать проблемы экологии, но и извлекать серу из отходящих газов в виде товарных продуктов – серной кислоты или элементарной серы [3, 4].

В отечественной и зарубежной практике способы очистки коксового газа от сероводорода разделяются на абсорбционные, адсорбционные и окислительные. Абсорбционные методы очистки делятся на методы физической и химической абсорбции. Сущность этих методов заключается в контакте коксового газа с раствором адсорбента. В результате происходит очистка коксового газа: насыщенный сероводородом раствор подвергается регенерации с выделением концентрированного сероводорода [5, 6].

Адсорбционные методы очистки также делятся на методы физической и химической адсорбции. В этих методах коксовый газ контактирует с твердым адсорбентом, который селективно улавливает сероводород. При регенерации адсорбента также выделяется концентрированный сероводород [7, 8].

Методы каталитического окисления основаны на превращении сероводорода в элементарную серу в присутствии катализаторов.

В производстве для очистки коксового газа в основном используют абсорбционный метод и метод каталитического окисления. Данные методы обеспечивают необходимую очистку коксового газа от сероводорода

в пределах 95–99 %. Адсорбционный метод используется для тонкой очистки (доочистки) коксового газа от сероводорода.

В работе в качестве адсорбента очистки коксового газа от сероводорода предлагается использовать высушенный гранулированный сорбционный материал, разработанный на основе карбонатного шлама химводоподготовки КТЭЦ-1. Ежегодно десятки тысяч тонн шлама образуется на стадии предварительной очистки добавочной воды на тепловых электроцентралях и в котельных. Рентгенографический качественный анализ на дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker показал следующий химический состав шлама: кальцит  $\text{CaCO}_3$  – 72 %, брусит  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  – 9 %, портландит  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  < 1 %, кварц  $\text{SiO}_2$  – 0,5 %, остальные прочие вещества – 17,5 %. Технические характеристики шлама: насыпная плотность – 560 кг/м<sup>3</sup>; суммарный объем пор – 0,375 см<sup>3</sup>/г; диаметр рабочей фракции 0,05–1,40 мм; содержание органического углерода – 11 %; гуминовые вещества – 12 % от общей массы образца, которые выявлены методом газовой хромато-масс-спектрометрии [9]<sup>1</sup>; влажность шлама – 3 %, зольность – 89 %.

В технологиях очистки коксового газа перспективными являются адсорберы с зернистой загрузкой. Поэтому для уменьшения гидравлического сопротивления в слое, через который пропускается коксовый газ, адсорбенты изготавливают в виде гранул.

Для получения гранул мелкодисперсный шлам с размером частиц от 0,01 до 0,09 мм смешивается с жидким натриевым стеклом при массовом и объемном соотношении 2:1 соответственно. Данное соотношение подобрано экспериментальным путем [10, 11]. При меньшем соотношении происходит неполное пропитывание шлама жидким натриевым стеклом, при последующем обжиге гранулы осыпаются; при большем соотношении происходит перерасход связующего. Далее смесь доводится до однородной массы, окатывание производится вручную. Образовавшиеся гранулы выдерживаются в печи при температуре 400 °С в течение 3 ч [12, 13]. Далее проводится охлаждение до комнатной температуры в эксикаторе. Гранулы имеют размер 0,5–2,5 мм, характеризуются прочностью на истирание 78 %, средней гидрофильностью. Технологические характеристики полученного гранулированного материала: адсорбционная емкость по  $\text{H}_2\text{S}$  – 1,21 г/г, суммарный объем пор – 0,592 см<sup>3</sup>/г, удельная поверхность – 46,2 м<sup>2</sup>/г.

---

<sup>1</sup> Хромато-масс-спектрометрическое определение труднолетучих органических веществ в почве и отходах производства и потребления: МУК 4.1.1062–2001: утв. главным государственным санитарным врачом Российской Федерации – первым заместителем министра здравоохранения Российской Федерации Г.Г. Онищенко 18.07.2001: введ. в действие с 01.10.2001. – М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора, 2001. – 10 с.

Гранулированный шлам имеет высокую пористость, что особенно важно при использовании его адсорбционных свойств в режиме пропускания газа. Низкая стоимость адсорбционного материала на основе шлама

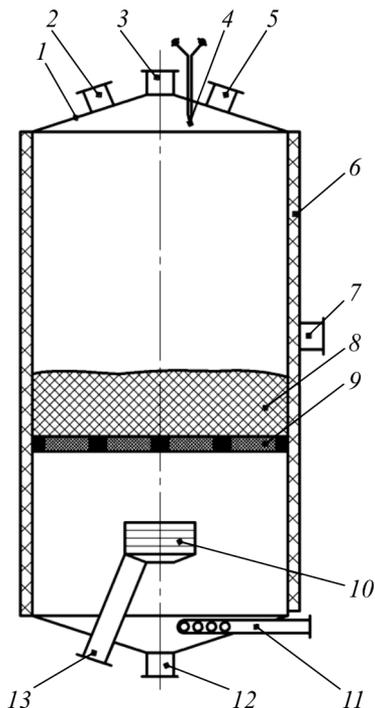


Рис. 1. Реакционная колонна с неподвижным слоем ГСМ: 1 – корпус; 2 – штуцер отвода адсорбтива; 3 – штуцер отвода очищенного газа; 4 – термопара; 5 – люк для загрузки адсорбента; 6 – электронагреватель; 7 – люк для выгрузки адсорбента; 8 – слой ГСМ; 9 – стальная сетка с отверстиями диаметром не более 1 мм; 10 – диффузионный колпачок; 11 – штуцер подвода сжатого воздуха; 12 – патрубок отвода конденсата; 13 – штуцер подвода газовой смеси

химводоочистки, доступность, возможность регенерации позволяют его использовать для очистки коксового газа с минимальными затратами и наибольшей эффективностью [14, 15].

Для исследования сорбционных свойств ГСМ в газовой среде, приближенной по составу к коксовому газу, использовалась созданная на кафедре «Технология воды и топлива» Казанского государственного энергетического университета модельная установка с неподвижным слоем ГСМ (рис. 1).

В установку был включен лабораторный адсорбер, в качестве которого применяли реакционную колонку, изготовленную из нержавеющей стали, что обеспечивало ее стойкость к агрессивным средам. Подвод и отвод газовой смеси осуществлялись с помощью штуцеров 3, 13. Подводящий штуцер с помощью резьбового соединения объединялся с диффузионным колпачком 10. Это обеспечивало равномерное распределение газов по слою ГСМ 8, размещенного на сетке 9, и препятствовало выносу частиц. Для нагрева колонки использовался термостат с электронагревателем 6. Температура газовой среды составляла 40 °С.

Газовая среда в течение экспериментов имела следующий состав, %:  $O_2$  – 4,0–5,7;  $H_2S$  – 75–79;  $H_2O$  – 3. Оставшуюся часть объема газовой смеси составлял  $CO_2$ . При сорбции сероводорода концентрация изменялась

в диапазоне 0–10 мг/м<sup>3</sup>. Расход газов, приведенный к нормальным условиям, составлял  $4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с. Сероводород получали в лабораторных условиях по реакции

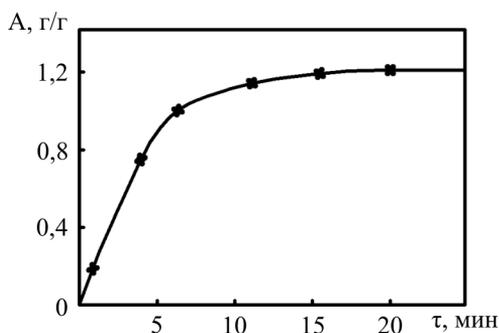
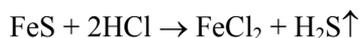


Рис. 2. Кинетическая зависимость процесса адсорбции сероводорода гранулированным сорбционным материалом

Результаты исследования сорбционных свойств ГСМ по отношению к сероводороду показали, что адсорбционная емкость ГСМ реализуется в течение первых минут контакта и по истечении 16 мин процесс практически завершается, что свидетельствует о наступлении сорбционного равновесия. Адсорбционная емкость достигает 1,21 г/г по H<sub>2</sub>S, что составляет 95 мас. %. На рис. 2 представлена зависимость сорбционной емкости ГСМ от времени.

Основные результаты исследований адсорбционных свойств ГСМ, а также оптимальные параметры промышленных установок очистки могут быть получены с помощью изотермы сорбции (рис. 3). Выпуклая форма изотермы адсорбции относится к типу I по классификации Брунауэра, Деминга, Деминга и Теллера (БДДТ), соответствует изотерме Ленгмюра группы L-типа по классификации Смита и указывает на наличие в адсорбенте микропор [14, 15].

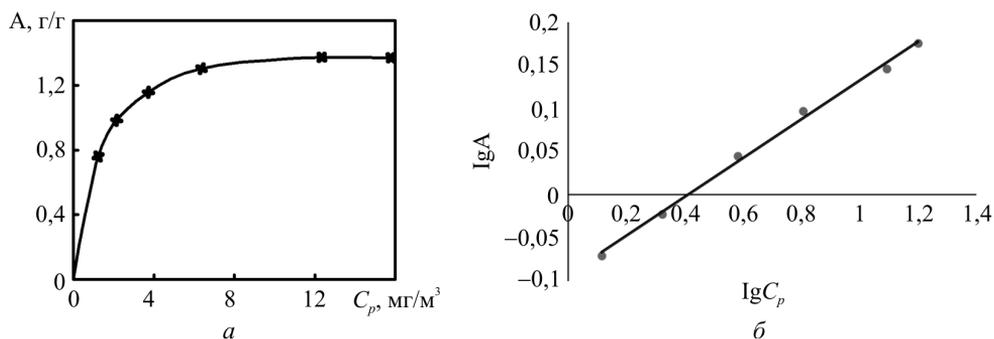


Рис. 3. Изотерма адсорбции H<sub>2</sub>S гранулированным сорбционным материалом (а) и ее вид в логарифмических координатах (б)

На базе проведенных исследований предложено усовершенствование схемы очистки коксового газа от сероводорода методом адсорбции активированным углем, описанным автором [16]. Данный метод обеспечивает тонкую очистку (доочистку) и является дополнительным при основной очистке (рис. 4).

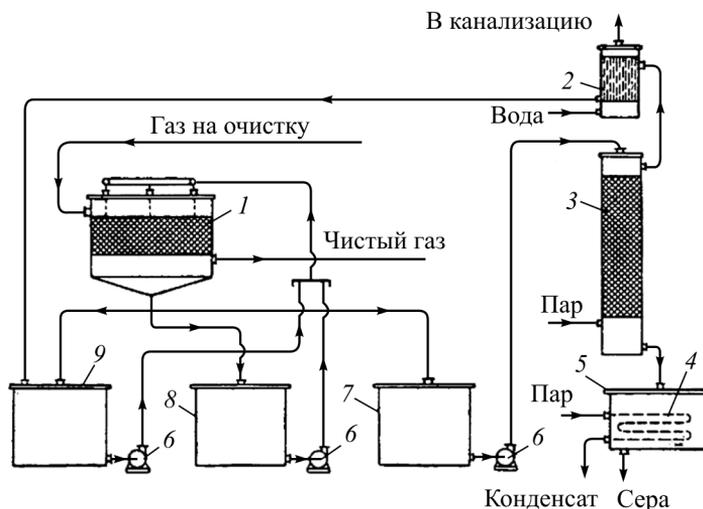
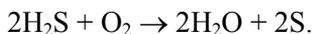


Рис. 4. Схема очистки газа от сероводорода методом адсорбции гранулированным сорбционным материалом (активированным углем)

Газ поступает в верхнюю часть адсорбера 1, заполненного ГСМ. Очищенный газ выводится из нижней части адсорбера и направляется на дальнейшую очистку. Перед подачей газа в адсорбер к нему добавляют кислород или воздух и аммиак, который является катализатором процесса поглощения сернистых соединений. На поверхности ГСМ сероводород взаимодействует с кислородом, образуя серу:



Адсорбер работает до тех пор, пока вес поглощенной серы не достигнет 70–80 % от веса угля, после чего поток газа переключают на второй адсорбер, подключенный параллельно. В первом адсорбере обрабатывают шлам сернистым аммонием. Промывку адсорбера сернистым аммонием проводят при помощи центробежных насосов 6 из сборников 7–9. После промывки ГСМ раствором сернистого аммония в адсорбер подается водяной пар для удаления остатков сернистого аммония. Затем ГСМ охлаждают подаваемым в адсорбер свежим газом.

Раствор многосернистого аммония из бака 7 насосом 6 подается в верхнюю часть отгонной колонны 3. В нижнюю часть колонны посту-

пает пар, при помощи которого при температуре 130 °С происходит разложение раствора с выделением жидкой серы. В колонне из раствора отгоняют аммиак, сероводород и водяной пар. В холодильнике 2 происходит конденсация этих веществ и вновь образуется раствор сернистого аммония, который направляется в сборник. Жидкая сера вместе с конденсатом поступает из колонны в отстойник 5, снабженный змеевиком 4, из которого разливается в формы. Сера получается чистой, высокого качества.

По изотерме сероводорода рассчитаны оптимальные характеристики адсорбера. Приняты следующие исходные параметры: давление 0,1 МПа; расход газа на входе – 40 м<sup>3</sup>/ч; концентрация сероводорода в газе на входе 750 мг/м<sup>3</sup>.

Продолжительность процесса адсорбции вычисляется по формуле [17]:

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\Gamma/w_u} \sqrt{H} - b\sqrt{\Gamma/\beta_\gamma},$$

где  $\tau$  – продолжительность адсорбции, с;  $\Gamma$  – коэффициент Генри;  $w_u$  – скорость потока паровоздушной смеси, м/с;  $H$  – высота слоя ГСМ, м;  $b$  – коэффициент, учитывающий начальную и конечную концентрации адсорбируемого вещества (табличное значение);  $\beta_\gamma$  – коэффициент массоотдачи, с<sup>-1</sup>.

Диаметр адсорбера вычислялся по формуле

$$D_a = \sqrt{\frac{V_a \cdot 4}{\pi \cdot H}},$$

где  $D_a$  – диаметр адсорбера, м;  $V_a$  – объем ГСМ, м<sup>3</sup>.

Количество ГСМ на одну загрузку

$$G1 = \frac{\pi D_a^2}{4} H \rho_n,$$

где  $G1$  – количество ГСМ на одну загрузку, кг;  $\rho_n$  – насыпная плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Оптимальные характеристики адсорбера представлены в таблице.

Параметр	Значение
Диаметр, м	0,6
Удельная поверхность ГСМ, м <sup>2</sup> /г	47,4
Количество ГСМ на одну загрузку, кг	65,3
Высота слоя ГСМ, м	0,42
Продолжительность адсорбции, ч	0,54

С учетом высокой стоимости активированного угля замена его карбонатным шламом, который является отходом производства ГЭС, позволяет снизить затраты на очистку коксового газа от сероводорода.

Произведен расчет экономического и экологического эффекта усовершенствования схемы очистки газа от сероводорода. Стоимость активированного угля 65 тыс. руб/т. Стоимость ГСМ 11 тыс. руб/т. Стоимость очистки газовых выбросов от сероводорода при использовании в качестве абсорбента активированного угля – 38,05 руб/м<sup>3</sup>, при использовании ГСМ – 6,44 руб/м<sup>3</sup>.

Общий предотвращенный экологический ущерб определяется суммированием ущербов:

$$Y_{\text{пр}} = Y_{\text{пр}}^{\text{н}} + Y_{\text{пр}}^{\text{в}}.$$

Величина предотвращенного в результате природоохранной деятельности ущерба от деградации почв и земель на рассматриваемой территории за отчетный период времени, тыс. руб./год, рассчитана по формуле

$$Y_{\text{пр}}^{\text{н}} = H_{\text{с}} S K_{\text{э}} K_{\text{п}},$$

где  $H_{\text{с}}$  – норматив стоимости земель (по данным Министерства экологии Республики Татарстан – 206 тыс. руб/га);  $S$  – площадь почв и земель, сохраненных от деградации за отчетный период времени в результате проведенных природоохранных мероприятий, га (по данным КТЭЦ-1, шлам, используемый для производства адсорбента, занимает 0,006 28 га);  $K_{\text{э}}$  – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости территории, равный 1,9;  $K_{\text{п}}$  – коэффициент для особо охраняемых территорий, равный 1.

В результате вычислений получим

$$Y_{\text{пр}}^{\text{н}} = 206 \cdot 0,006 28 \cdot 1,9 \cdot 1 = 2,45 \text{ тыс. руб/год.}$$

Величина предотвращенного экологического ущерба от деградации почв и земель для КТЭЦ-1 составила 2,45 тыс. руб/год.

**Заключение.** Сделаем следующие выводы:

1. Изучен процесс адсорбции модельной газовой смеси, содержащей  $\text{H}_2\text{S}$ , гранулированным шламом химводоочистки. Исследованы кинетические закономерности адсорбционного процесса. На основании полученных закономерностей показано, что адсорбционная емкость достигает максимального значения 12,1 г/г через 20 мин. Построена изотерма адсорбции, которая соответствует изотерме Ленгмюра L-типа. Выпуклая форма изотермы подтверждает эффективную физическую адсорбцию.

2. Рассчитаны оптимальные характеристики адсорбера периодического действия с неподвижным слоем ГСМ: диаметр адсорбера, количество ГСМ на одну загрузку, высота слоя ГСМ, продолжительность адсорбции.

3. На базе проведенных исследований предложено усовершенствование схемы очистки газа от сероводорода методом адсорбции гранулированным сорбционным материалом.

4. Произведен расчет экономического и экологического эффекта усовершенствования схемы очистки газа от сероводорода методом адсорбции карбонатным шламом. Стоимость очистки при использовании в качестве адсорбента карбонатного шлама в 3,5 раза ниже, чем при использовании активированного угля. Предотвращенный экологический ущерб составит 2,45 тыс. руб/год.

#### Библиографический список

1. Рада А.О. Анализ перспектив конверсии угля в нетопливные продукты в условиях российского рынка. – Кемерово: Сибирская издательская группа, 2016. – 121 с.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Альянс, 2004. – 753 с.
3. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. – М.: Химия, 1984. – 592 с.
4. Motoyuki S. Adsorption engineering. – Kodansha, 1990. – 295 p.
5. Кормина Л.А. Проблемы защиты воздушного бассейна в коксохимической промышленности // Ползуновский вестник. – 2013. – № 1. – С. 261–262.
6. Jacques F. Physical adsorption: experiment, theory and applications. – Springer, 1997. – 619 p.
7. Николаева Л.А., Хуснутдинов А.Н. Исследование процесса адсорбции оксидов азота из дымовых газов котельной // Теплоэнергетика. – 2018. – № 8. – С. 96–100. DOI: 10.1134/S0040601518080049
8. Николаева Л.А., Хуснутдинов А.Н. Очистка газовых выбросов предприятий химической промышленности карбонатным шламом // Экология и промышленность России. – 2018. – № 22 (8). – С. 14–18. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-8-14-18
9. Карнаухов А.П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. – Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1999. – 470 с.
10. Система очистки сточных вод от нефтепродуктов: пат. Рос. Федерации / Николаева Л.А., Бородай Е.Н.; заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»; № 2012100491/05, заявл. 10.01.2012; опубл. 27.06.2012. – Бюл. № 3.
11. Семакина О.К., Якушева Ю.С., Шевченко А.А. Выбор способа гранулирования адсорбентов из отходов производства // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8-3. – С. 720–725.
12. Крылов И.О., Луговская И.Г., Коровушкин В.В., Макеев Д.Б. Влияние термической обработки на сорбционные и каталитические свойства шунгитовых пород // Экология и промышленность России. – 2008. – № 10. – С. 24–27.
13. Терехова М.В., Русакова С.М. Исследование адсорбционных закономерностей анионов на поверхности красного шлама // Изв. МГТУ «МАМИ». – 2013. – № 3, Т. 1. – С. 147–151.
14. Николаева Л.А. Исследование процессов сорбции оксидов азота и серы из дымовых газов ТЭС шламом химводоочистки // Теплоэнергетика. – 2013. – № 4. – С. 16–19. DOI: 10.1134/S0040601513040095
15. Бородай Е.Н., Николаева Л.А., Лаптев А.Г. Новые возможности утилизации шламов химической водоподготовки на ТЭС // Вода: химия и экология. – 2009. – № 3. – С. 2–5.
16. Ведерников М.И., Кобезев В.С., Рудой И.В. Технология соединения связанного азота. – М.: Высшая школа, 1967. – 424 с.
17. Лаптев А.Г., Коначин А.М., Минеев Н.Г. Теоретические основы и расчет аппаратов разделения гомогенных смесей. – Казань: Изд-во КГЭУ, 2007. – 426 с.

### References

1. Rada A.O. Analiz perspektiv konversii uglya v netoplivnyye produkty v usloviyah rossijskogo rynka [The analysis of prospects of conversion of coal in not fuel products in the conditions of the Russian market]. Kemerovo, Sibirskaya izdatel'skaya gruppa, 2016, 121 p.
2. Kasatkin A.G. Osnovnyye processy i apparaty himicheskoy tekhnologii [Main processes and devices of chemical technology]. Moscow, Al'yans, 2004, 753 p.
3. Kel'cev N.V. Osnovy adsorbcionnoj tekhniki [Bases of the adsorptive equipment]. Moscow, Himiya, 1984, 592 p.
4. Motoyuki S. Adsorption engineering. Kodansha, 1990, 295 p.
5. Kormina L.A. Problemy zashchity vozdušnogo bassejna v koksohimicheskoy promyshlennosti [Problems of protection of the air basin in the coke-chemical industry]. *Polzunovskiy vestnik*. 2013, no. 1. pp. 261-262.
6. Jacques F. Physical adsorption: experiment, theory and applications. Springer, 1997, 619 p.
7. Nikolaeva L.A., Khusnutdinov A.N. Issledovanie processa adsorbicii oksidov azota iz dymovyh gazov kotel'noj [A study of the absorption of nitrogen oxides from the boiler flue gases]. *Thermal Engineering*. 2018, no. 8. pp. 96-100. DOI: 10.1134/S0040601518080049
8. Nikolaeva L.A., Khusnutdinov A.N. Ochistka gazovyh vybrosov predpriyatij himicheskoy promyshlennosti karbonatnym shlamom [Purification of gas emissions of chemical industry enterprises by carbonaceous cutting]. *Ecology & Industry of Russia*. 2018, iss. 22, no. 8. pp. 14-18. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-8-14-18
9. Karnauhov A.P. Adsorbciya. Tekstura dispersnyh i poristyh materialov [Adsorption. The texture of dispersed and porous materials]. Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe predpriyatие Rossijskoj akademii nauk, 1999, 470 p.
10. Nikolaeva L.A., Borodaj E.N. Sistema ochistki stochnyh vod ot nefteproduktov [System of sewage treatment from petroleum products]. Patent Rossijskaia Federaciia no. 2012100491/05(2012).
11. Semakina O.K., YAKusheva Yu.S., SHEvchenko A.A. Vybór sposoba granulirovaniya adsorbentov iz othodov proizvodstva [The choice of granulation of adsorbents from waste]. *Fundamental research*, 2013, no. 8-3, pp. 720-725.
12. Krylov I.O., Lugovskaya I.G., Korovushkin V.V., Makeev D.B. Vliyanie termicheskoy obrabotki na sorbciionnye i kataliticheskie svojstva shungitovyh porod [The effect of heat treatment on the sorption and catalytic properties of shungite rocks]. *Ecology & Industry of Russia*, 2008, no. 10, pp. 24-27.
13. Terekhova M.V., Rusakova S.M. Issledovanie adsorbciionnyh zakonomernostej anionov na poverhnosti krasnogo shlama [The study of the adsorption patterns of anions on the surface of red mud]. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2013. no. 3, vol. 1. pp. 147-151.
14. Nikolaeva L.A. Issledovanie processov sorbicii oksidov azota i sery iz dymovyh gazov teplovoj ehlektricheskoy stancii shlamom himvodoochistki [Investigation of sorption processes of nitrogen and sulfur oxides from flue gases of thermal power plants with chemical water cleaning sludge] // *Thermal Engineering*. 2013, no. 4, pp. 16-19. DOI: 10.1134/S0040601513040095
15. Borodaj E.N., Nikolaeva L.A., Laptev A.G. Novye vozmozhnosti utilizacii shlamov himicheskoy vodopodgotovki na teplovoj ehlektricheskoy stancii [New opportunities for utilization of sludge from chemical water treatment at thermal power plants]. *Water: chemistry and ecology*, 2009, no. 3, pp. 2-5.
16. Vedernikov M.I., Kobezev V.S., Rudoj I.V. Tekhnologiya soedineniya svyazannogo azota [Bound nitrogen compound technology]. Moscow, Vysshaya shkola, 1967, 424 p.
17. Laptev A.G., Konahin A.M., Mineev N.G. Teoreticheskie osnovy i raschet apparatov razdeleniya gomogennyh smesej [Theoretical foundations and calculation of the separation apparatus of homogeneous mixtures]. Kazan', Kazan State Power Engineering University, 2007, 426 p.

Получено 29.10.2018

L. Nikolaeva, A. Khusnutdinov

## PURIFICATION OF COKE GAS OF HYDROGEN SULPHIDE WITH GRANULATED CARBONATE SLIME

One of solutions of a problem of scarcity of energy feedstock is the use of secondary energy resources – artificial combustible gases which are formed in the course of technological processing of solid fuel. Coke gas is considered nowadays as a serious alternative source of combustible fuel. However direct use of coke gas is complicated as it contains a toxic component – hydrogen sulfide. In this study it is offered to purify coke gas of hydrogen sulfide with the adsorptive method. Slime of chemical wastewater purification of the Kazan Combined Heat and Power Plant-1 formed at coagulation and lime application of natural water is used as sorption material. The chemical composition of slime and the technology of receiving granulated sorption material on its basis is presented. Studies of slime properties are conducted on a model installation with a motionless layer of sorbent. Its sorption capacity is determined, curves of kinetic and isothermal dependences of adsorption of hydrogen sulfide by slime are constructed, and change of sorption capacity of slime in relation to hydrogen sulfide depending on the size of its particles is defined. Optimum characteristics of the adsorber of periodic action with a motionless layer of the developed material are calculated. Calculation of economic and environmental effect of use of the granulated sorption material as adsorbent in the scheme of purification of coke gas of hydrogen sulfide is made.

**Keywords:** coke gas, granulated slime, hydrogen sulfide, toxicity, adsorber, regeneration.

**Николаева Лариса Андреевна** (Казань, Россия) – д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология воды и топлива», Казанский государственный энергетический университет (420066, Казань, ул. Красносельская, 51, e-mail: [larisanik16@mail.ru](mailto:larisanik16@mail.ru)).

**Хуснутдинов Азат Назипович** (Казань, Россия) – старший преподаватель кафедры «Электротехнические комплексы и системы», Казанский государственный энергетический университет (420032, Казань, ул. Красносельская, 51, e-mail: [khusnutdinov.an.kgeu@mail.ru](mailto:khusnutdinov.an.kgeu@mail.ru)).

**Nikolaeva Larisa** (Kazan, Russia) – Doctor of Technical Science, Professor, "Water and Fuel Technologies" Department, Kazan State Power Engineering University (420066, Kazan, Krasnoselskaya st., 51, e-mail: [larisa.nik16@mail.ru](mailto:larisa.nik16@mail.ru)).

**Khusnutdinov Azat** (Kazan, Russia) – Senior Lecturer, "Electrotechnical Complexes and Systems" Department, Kazan State Power Engineering University (420066, Kazan, Krasnoselskaya st., 51, e-mail: [khusnutdinov.an.kgeu@mail.ru](mailto:khusnutdinov.an.kgeu@mail.ru)).

DOI 10.15593/2409-5125/2019.02.08

УДК 656.089.2

**Л.Н. Ольшанская, Е.А. Татаринцева,  
М.А. Чернова, А.А. Тареева**

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

## **МАГНИТОСОРБЕНТЫ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ СТАЛЬНОЙ ОКАЛИНЫ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ РАЗЛИВОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ**

Разработаны составы и способы получения магнитосорбентов на основе отходов производства – окалины стальной пыли (СО) со связующим парафином – для очистки загрязненных вод от нефти и нефтепродуктов. Проведенный анализ пыли позволил установить, что в отходе в наибольшем процентном соотношении содержится железо (около 67 %), в незначительных количествах присутствует кремний, марганец, алюминий, натрий, магний, хром, кальций и др. Это указывает на высокие магнитные свойства материала для изготовления композиционного магнитного сорбента.

Биотестирование на двух тест-объектах (рачки *Daphnia magna* и водоросли *Scenedesmus quadricauda*) позволило установить, что отходы окалины стальной пыли не токсичны и могут быть использованы в качестве компонента магнитосорбентов. На основании приказа Минприроды РФ № 536 от 04.12.2014 г. отход может быть отнесен к V классу опасности. Исследованы физико-химические свойства полученных материалов. Установлена их высокая гидрофобность – краевой угол смачивания 128°–130°; 98–100%-ная плавучесть в течение 96 ч; низкое водопоглощение (0,126–0,108 г/г). Нефтеемкость сорбентов составила (2,1 ± 0,26) г/г. Сорбционное равновесие достигается в первые 10–20 мин контакта материала с нефтью и нефтепродуктами, на сорбцию оказывает влияние природа и толщина слоя нефтепродуктов. Максимальная сорбционная емкость достигается при толщине пленки (3,0 ± 0,25) мм.

Предложена технологическая схема изготовления магнитосорбентов. Полученные сорбенты представляют собой мелкодисперсный порошок и могут быть выполнены в виде хлопьев или гранул размером 0,5–3,0 мм. Выбор парафина как связующего обусловлен его физико-химическими свойствами: плотность 0,880–0,915 г/см<sup>3</sup> (при 15 °С) меньше плотности воды, гидрофобность, инертность к большинству химических реагентов, нерастворимость в воде, температура плавления в диапазоне 45–65 °С. По завершении процесса сорбции поглощенные вещества извлекаются методом центрифугирования или на вакуум-фильтрах. Это позволяет повторно использовать нефтепродукты в промышленности, а также регенерировать сорбенты с возможностью их повторного использования.

По истечении способности к сорбции/десорбции (после примерно 5–7 циклов регенерации) материалы подвергаются утилизации, например пиролизом с получением тепловой энергии, или

---

Магнитосорбенты на основе отходов стальной окалины для удаления разливов нефтепродуктов / Л.Н. Ольшанская, Е.А. Татаринцева, М.А. Чернова, А.А. Тареева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2019. – № 2. – С. 92–105. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.08

Olshanskaya L.N., Tatarintseva E.A., Chernova M.A., Tareeva A.A. Magnet Sorbents Based on Steel Scale Waste to Remove Petroleum Spills. PNRPU. Applied Ecology. Urban Development. 2019. No. 2. Pp. 92-105. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.08

используются в качестве смолистых добавок в асфальтовые смеси при производстве дорожных покрытий. При этом порошок отходов стальной металлической пыли, образующийся на конечной стадии пиролиза, может быть возвращен в процесс получения магнитосорбентов.

**Ключевые слова:** магнитосорбенты, отходы производства, окалина стальной пыли, парафин, нефтепродукты, очистка вод.

**Введение.** В настоящее время во всем мире проблема загрязнения природной среды, особенно гидросферы, нефтью и нефтепродуктами (Н, НП) стоит очень остро. Нефтяные разливы (НР) могут произойти на любом из этапов добычи, хранения или транспортировки нефти. Источниками разливов нефти можно назвать фонтанирование скважины во время подводной разведки или добычи, выбросы или утечки из подводных трубопроводов, утечки из резервуаров для хранения нефтепродуктов, располагающихся на суше, или утечки из трубопроводов в береговой зоне, а также аварии при транспортировке. Ни один другой загрязнитель, как бы опасен он ни был, не может сравниться с нефтью по широте распространения, числу источников загрязнения, величине нагрузок на все компоненты природной среды. Экологические последствия нефтезагрязнений предсказать сложно, нарушаются важные процессы жизнедеятельности, протекающие в биосфере, изменяются условия обитания всех видов живых организмов, происходит накопление продуктов разложения нефти в биомассе. Являясь продуктом длительного распада, нефть быстро покрывает поверхность вод плотным слоем пленки, которая влияет на воздухо-, влагообмен, поступление солнечного света, что приводит к необратимым последствиям и зачастую гибели водоемов.

Ущерб от крупномасштабных разливов нефти трудно подсчитать, трудно оценить его зависимость от вида Н и НП, состояния пострадавшей экосистемы, погоды, океанских и морских течений, времени года, состояния местного рыболовства и туризма и др. [1].

Очистка водных сред от продуктов нефтепереработки имеет свою специфику, так как изначально это вещества органического происхождения, обладающие такими свойствами, как вязкость, низкая либо высокая плотность, летучесть и др. Таким образом, уместно использовать различные методы, позволяющие извлекать данные поллютанты с различной степенью эффективности.

Очевидным является то, что, попадая в окружающую среду, нефть быстро теряет свои первоначальные свойства. Под воздействием комплекса абиотических и биотических факторов происходящие изменения ведут к образованию различных групп углеводородов и фракций разных миграционных форм, состав и химические свойства которых претерпевают радикальные изменения.

При проведении мероприятий по ликвидации разливов Н и НП с поверхности водных сред или почв необходимо учитывать все эти способы воздействия. В настоящее время используется множество способов для удаления нефтезагрязнений – это химические, микробиологические и физические, обычно используемые в комплексе друг с другом [2–6]. Однако большинство из них являются дорогостоящими, сложными в аппаратурном исполнении, требуют дефицитных реагентов.

В связи с этим особый интерес представляют недорогие и в то же время эффективные методы очистки, к которым относятся сорбционные. С их помощью возможно удаление загрязнений весьма широкой природы практически до любой остаточной концентрации, независимо от их химической устойчивости, плюсы сорбционной очистки – отсутствие вторичных загрязнений и управляемость процессом [6]. Преимуществами сорбционных методов является также их совместимость с другими способами сбора нефтепродуктов, возможность многократного использования сорбента после регенерации. В качестве сорбентов применяют как природные (торф, активированный уголь, опилки, перлит), так и искусственные (пенополиуретан, пористая керамика, синтетические волокна) материалы.

При выборе материалов следует учитывать их экологичность, а также доступность в регионе. Использование различных адсорбентов для сбора Н и НП с поверхности водных сред позволяет достичь очистки 98 %. В последнее время для этих целей широкое применение находят магнитные сорбенты, которые обладают важным технологическим преимуществом – возможность быстрого и эффективного извлечения нефтезагрязнений из очищаемой среды с помощью магнитного поля. Сорбенты на основе оксидов железа  $Fe_3O_4$  (магнетит) и  $\gamma-Fe_2O_3$  (маггемит) обладают высокой сорбционной емкостью и эффективностью очистки воды в сочетании с низкой стоимостью. Важно отметить, что эффективность сорбентов на основе магнитных оксидов железа зависит от поверхностных характеристик частиц и их размеров. Получение и модификация магнитных порошков с наноразмерами и наноструктурами, обладающих высокой адсорбционной емкостью и реакционной способностью, является важной задачей. Известен способ получения магнитного сорбента [7] на основе гидрофобного полимерного связующего в виде порошка или гранул в композиции с магнитным наполнителем в виде магнитного материала с размером частиц от 1 нм до 10 мкм, минеральным маслом и алюмосиликатным пористым наполнителем с размерами частиц не более 100 мкм, модифицированным гидрофобизирующей кремнийорганической жидкостью в количестве 0,05–0,50 мас. % при выбранных соотношениях компонентов. Авторами [8, 9] разработаны сорбен-

ты с магнитными свойствами на основе ферритизированного гальваношлама (размер частиц 41–66 нм) для ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов. В качестве связующих веществ использован парафин и ПСМ-1 – полимерный сорбционный материал, получаемый из отходов полиэтилен-терефталата (ПЭТ) по специальной технологии, основанной на фазоинверсионном переходе полимера из жидкого состояния в твердое. Выбор данных веществ обусловлен присущими им свойствами. Для парафина характерны нерастворимость в воде, инертность по отношению ко многим химическим соединениям, низкая плотность 0,880–0,915 г/см<sup>3</sup> (при 15 °С) и температура плавления в диапазоне 45–65 °С, а также его органическая природа, определяющая взаимодействие и сродство разрабатываемого материала к нефти и нефтепродуктам. Использование ПСМ-1 в качестве полимерного связующего обусловлено мелкодисперсной структурой, предопределяющей равномерное смешение порошкообразных компонентов. Подобно парафину, за счет органической природы ПСМ-1 придает гидрофобность сорбенту, а следовательно, способствует улучшению адгезионных свойств по отношению к нефти и НП.

Выбор способа очистки в каждом конкретном случае определяется источником и характером загрязнения, количеством загрязняющего вещества в промышленном стоке и последующим целевым использованием очищенной воды и извлеченных нефтепродуктов.

В целом следует отметить, что предотвращение загрязнения окружающей среды нефтью и продуктами ее переработки – это одна из сложных и многоплановых проблем охраны природной среды.

Цель настоящей работы заключалась в разработке новых магнитосорбентов (МС) на основе отходов окалины стальной пыли для очистки загрязненных вод от нефти и нефтепродуктов и минимизации негативного воздействия предприятий нефтехимического профиля на гидросферу.

**Экспериментальные данные и их обсуждение.** Объектами исследования служили: 1 – отработанное машинное масло марки «Motul»; 2 – нефть с предприятия ПАО «Саратовский НПЗ»; 3 – модельные системы воды с пленками нефти и НП на ее поверхности; 4 – отходы стальной пыли (СО, окалина) ОАО «Трансмаш» (г. Энгельс) после обработки стальных изделий на машине плазменной резки «Кристалл»; 5 – парафин (ПФ).

Было изготовлено и исследовано два вида МС при различном соотношении компонентов: МС-1 (СО:ПФ = 1:2); МС-2 (СО:ПФ = 1:1).

На первом этапе проводили установление элементного состава стальной окалины с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра «Спектроскан Макс» фирмы «Спектрон» (Россия, Санкт-Петербург).

Результаты исследования (табл. 1) показали, что в наибольшем процентном соотношении в составе СО содержится железо,  $Fe \approx 67\%$ , в незначительных количествах присутствуют Si, Mn, Al, Na, Mn, Cr, Ca и др. Это указывает на высокие магнитные свойства материала для изготовления композиционного магнитного сорбента.

Таблица 1

## Элементный состав пыли

Компонент	Массовая доля, %	Погрешность, %	Элемент	Массовая доля, %	Погрешность, %
$Fe_2O_3$	95,380 00	0,110 00	Fe	66,710 00	0,070 00
$SiO_2$	2,000 00	0,070 00	Si	0,933 00	0,033 00
MnO	1,090 00	0,050 00	Mn	0,847 00	0,040 00
$Al_2O_3$	0,478 00	0,024 00	Al	0,253 00	0,013 00
$Na_2O$	0,299 00	0,022 00	Na	0,222 00	0,016 00
MgO	0,231 00	0,012 00	Mg	0,139 00	0,007 00
$Cr_2O_3$	0,150 00	0,008 00	Cr	0,103 00	0,005 00
CaO	0,111 00	0,006 00	Ca	0,079 70	0,004 00

Определение токсичности стальной окалины СО проводили согласно методикам [10, 11]. Готовили водную вытяжку на основе дистиллированной воды с  $pH = 7,0-7,5$  при соотношении «твердая фаза:жидкость», равном 1:10. В качестве тест-объектов использовали культуры рачков *Daphniamagna* и водоросли *Scenedesmus quadricauda* (рис. 1).

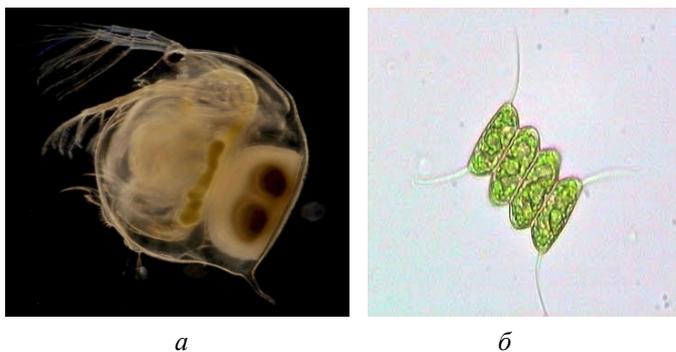


Рис. 1. Тест-объекты: а – *Daphniamagna*;  
б – *Scenedesmus quadricauda*

Определение острого токсического действия вытяжки на дафний определяли по их смертности (летальности) за определенный период экспозиции. Критерием острой токсичности служила гибель 50 % и более даф-

ний за 96 ч в исследуемой воде при условии, что в контрольном эксперименте гибель не превышает 10 %. Исследования проводили в трех параллельных сериях.

В качестве контроля использовали отстоянную водопроводную воду. В опыте и контроле исследовали по 10 дафний в возрасте 6–24 ч. Учет смертности дафний проводили через каждый час до конца первого дня опыта, а затем два раза в сутки ежедневно по истечении 96 ч. Установлено, что в исследуемой воде выживаемость дафний составила 100 %. Определение острого токсического действия вытяжки на водоросли определяли по снижению уровня флуоресценции хлорофилла зеленых протококковых водорослей *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Breb. Для биотестирования использовали альгологически чистую культуру водорослей, находящуюся в экспоненциальной стадии роста. Исследование проводили в двух параллельных сериях. В качестве контроля использовали дистиллированную воду. По истечении 72 ч проводили замеры уровня флуоресценции хлорофилла с помощью спектрофлуориметра «Флюорат-02-Панорама». Критерием острой токсичности является подавление уровня флуоресценции хлорофилла водорослей на 50 % и более по сравнению с контролем в течение 72-часовой экспозиции. Полученные данные показали, что водная вытяжка не оказывает острого токсического действия на водоросли.

Таким образом, биотестирование на двух тест-объектах позволило установить, что СО не токсична и может быть использована в качестве компонента магнитосорбентов. На основании приказа Минприроды РФ № 536 от 04.12.2014 г. отход может быть отнесен к V классу опасности<sup>1</sup>.

Для изготовления сорбционных материалов (СМ) отходы пыли направляли в смеситель, где смешивали с предварительно расплавленным (45–60 °С) парафином. После смешения смесь с парафином охлаждали до застывания и измельчали (рис. 2). Полученные сорбенты представляют собой мелкодисперсный порошок и могут быть выполнены в виде хлопьев или гранул размером 0,5–3,0 мм. Выбор парафина как связующего обусловлен его физико-химическими свойствами: плотность 0,880–0,915 г/см<sup>3</sup> (при 15 °С), меньше плотности воды, гидрофобность, инертность к большинству химических реагентов, нерастворимость в воде, температура плавления в диапазоне 45–65 °С. Это вещество белого цвета с относительной молекулярной массой 300–450, в расплавленном виде обладающее низкой вязкостью, получают его главным образом из нефти.

<sup>1</sup> Приказ Минприроды России № 536 от 4 декабря 2014 г. «Об утверждении критериев отнесения отходов к I–V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду».



Рис. 2. Технологическая схема получения магнитосорбентов

Для выбора рационального состава МС исследовали их физико-химические и сорбционные свойства.

*Плавучесть* МС определяли в течение 96 ч с контролем через каждые 24 ч. Навески сорбента 0,5 г помещали в стаканы объемом 50 см<sup>3</sup>, наполовину заполненные водой. Толщина слоя сорбционного материала в стаканах составляла около 4 мм. По истечении 96 ч оставшиеся на плаву МС извлекали, сушили в течение 2 ч при температуре 105 °С до постоянной массы, по разнице веса определяли количество утонувшего сорбционного материала [12].

В результате была установлена 99–100%-ная плавучесть сорбентов (рис. 3). Благодаря гидрофобности парафина магнитосорбенты длительно остаются на поверхности воды, что позволяет создать необходимый резерв времени для ликвидации аварийных разливов нефти и ее продуктов и извлечения сорбента с поглощенным поллютантом.

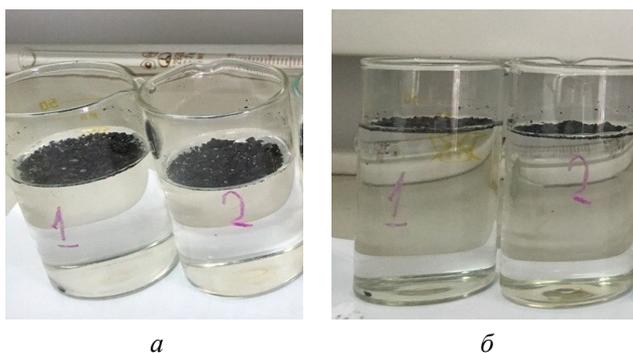


Рис. 3. Изучение плавучести сорбционных материалов МС-1(1) и МС-2(2) спустя: а – 24 ч; б – 96 ч

*Смачиваемость* является основной характеристикой гидрофобных материалов. Ее определяли путем измерения краевых углов смачивания сидящей капли воды на поверхность сорбента. Исследуемые сорбенты насыпали на фильтровальную бумагу, затем на поверхность сорбентов

наносили воду, фотографировали по профилю и определяли углы смачивания (рис. 4).



Рис. 4. Определение угла смачивания: *а* – МС-1; *б* – МС-2

Для МС-1 и МС-2 углы смачивания составили  $128^\circ$  и  $130^\circ$  соответственно, что больше  $90^\circ$  и указывает на гидрофобность сорбентов [13].

В аналогичных экспериментах отработанное машинное масло и нефть практически сразу впитывались магнитосорбентами, не образуя сидящей капли, что свидетельствует об их *олеофильности* (рис. 5).

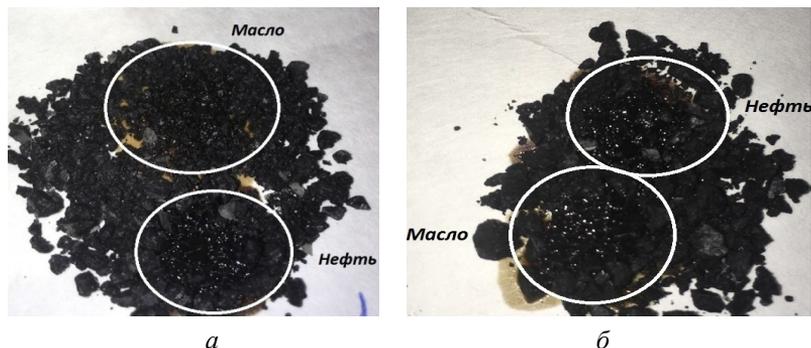


Рис. 5. Определение олеофильности сорбентов: *а* – МС-1; *б* – МС-2

Для установления *водопоглощения* (ВП) образцы МС взвешивали и помещали в испытательный контейнер объемом  $1 \text{ дм}^3$ , наполовину заполненный водой и установленный на магнитную мешалку. Через 15 мин образцы извлекали, взвешивали и рассчитывали водопоглощение (ВП, г/г) [12]:

$$\text{ВП} = \frac{m_{\text{сорб}} - m_{\text{с}}}{m_{\text{с}}},$$

где  $m_{\text{с}}$  – начальная масса сухого сорбента, г;  $m_{\text{сорб}}$  – масса сорбента с поглощенной водой, г.

Установленные низкие величины водопоглощения для МС-1 и МС-2 (0,126 и 0,108 г/г соответственно) подтвердили гидрофобные свойства и позволяют рекомендовать оба состава как рациональные для изготовления сорбентов.

Нефтеемкость МС (НЕ, г/г) определяли по разнице начальной массы сухого сорбента ( $m_c = 0,5$  г), помещенного в упаковку из капрона ( $m_0 = 0,5$  г), до и после контакта с машинным маслом (интервал 5 мин) и последующего полного стекания избыточного количества нефтепродуктов [12]:

$$ВП = \frac{m_{\text{сорб}} - m_c - m_0}{m_c},$$

где  $m_{\text{сорб}}$  – масса сорбента в капроновой упаковке с поглощенным нефтепродуктом, г.

Полученные результаты представлены в табл. 2 и на рис. 6.

Таблица 2

Данные по нефтеемкости МС-1 (числитель) и МС-2 (знаменатель)

Серия / t, мин	5	10	15	20	30	40
1	0,926/1,731	1,050/1,798	1,354/1,927	1,384/1,916	1,712/1,968	1,802/1,946
2	1,102/2,189	1,254/2,181	1,406/2,230	1,470/2,278	1,578/2,291	1,606/2,278
3	1,586/2,210	1,784/2,606	1,870/2,632	1,992/2,671	2,266/2,830	2,270/2,840
Средние значения	1,179/2,043	1,363/2,195	1,543/2,263	1,615/2,288	1,852/2,363	1,893/2,355
ДИ, 95 %	0,849/0,672	0,941/1,004	0,706/0,879	0,817/0,937	0,906/1,082	0,847/1,123
Стандартное отклонение	0,342/0,271	0,379/0,404	0,284/0,354	0,329/0,377	0,365/0,436	0,341/0,452
Стандартная ошибка средней	0,197/0,156	0,219/0,233	0,164/0,204	0,190/0,218	0,211/0,252	0,197/0,261

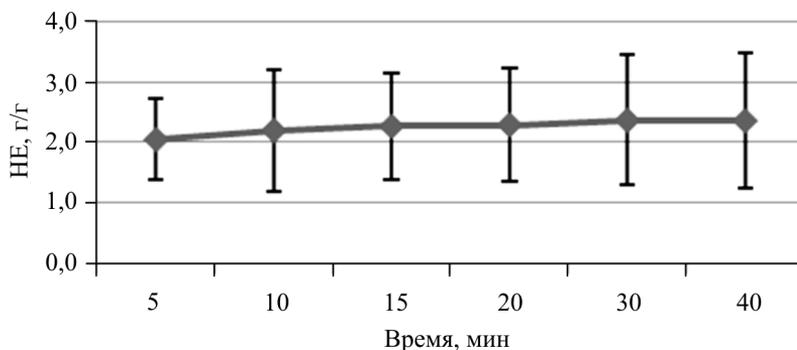


Рис. 6. Изменение нефтеемкости МС-2 во времени

Наибольший интерес для магнитных сорбентов представляют исследования сорбции нефти и нефтепродуктов с поверхности воды. Известно, что поглощение нефтепродуктов сорбентом является сложным физико-химическим процессом, включающим такие явления, как адсорбция, адгезия, капиллярные явления, заполнение межзеренных пространств.

Для установления влияния толщины пленки нефтепродуктов на величины сорбционной емкости проводили разлив 1–4 г нефти или отработанного машинного масла на поверхности воды (рис. 7, *а*). Затем насыпали сорбент с избытком и фиксировали его массу (рис. 7, *б*). Выдерживали время сорбции в течение 7 мин. Затем насыщенный магнитосорбент собирали с помощью постоянного магнита (рис. 7, *в*). В результате эксперимента получали очищенную воду (рис. 7, *г*).

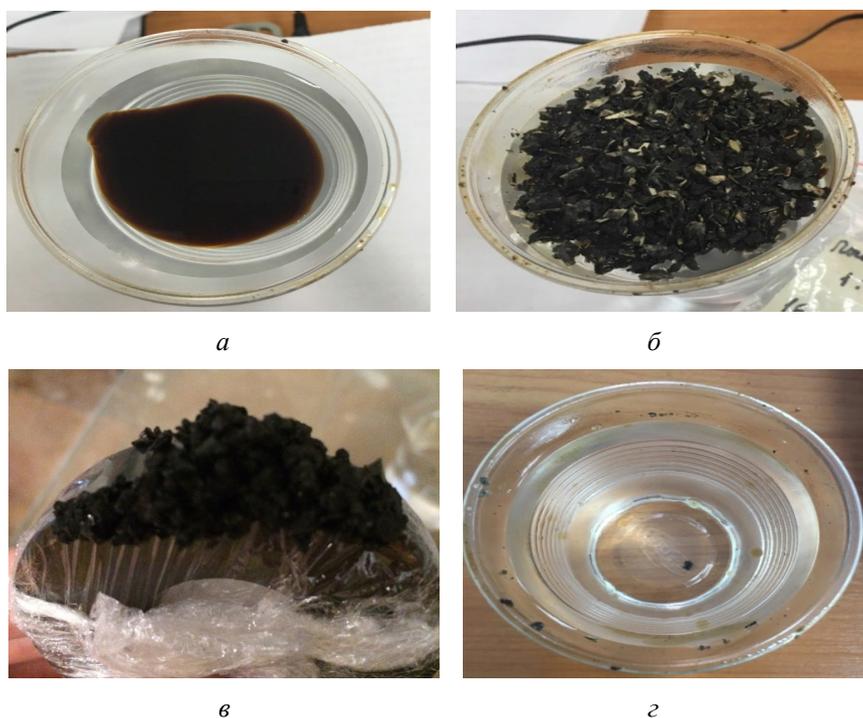


Рис. 7. Очистка загрязненной воды от машинного масла:  
*а* – вода, загрязненная НП; *б* – загрязненная вода с МС;  
*в* – МС, собранный магнитом; *г* – очищенная вода

Эксперимент проводили в трех параллельных сериях. Полученные усредненные данные по сорбции, машинного масла и нефти сорбентами представлены в табл. 3.

Таблица 3

Влияние толщины пленки поллютанта на сорбцию (г/г)  
сорбентами Н и НП

Толщина пленки, мм	Масло		Нефть	
	МС-1	МС-2	МС-1	МС-2
0,5	1,51	1,84	2,09	2,19
1,5	3,69	4,04	4,93	5,64
2,5	5,67	6,31	6,55	7,08
3,5	8,24	9,55	9,24	10,3

Все полученные в экспериментах результаты подвергали статистической обработке с использованием программы Microsoft Excel 2010 [14]. Каждый эксперимент был выполнен с тремя параллельными определениями ( $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ ), и в качестве окончательного результата концентраций рассчитывали среднее арифметическое значение ( $X_{cp}$ ) при выполнении условия  $X_1 - X_3 \leq 0,01rX_{cp}$  (где  $r$  – предел повторяемости, значения которого приводятся в таблице раздела «Обработка результатов измерений» использованной методики ПНД Ф<sup>2</sup> и соответствует диапазону определения того или иного вещества [15]).

По завершении процесса сорбции нефти и НП сорбентами поглощенные вещества извлекаются методом центрифугирования [16] или на вакуум-фильтрах. Это позволяет повторно использовать НП в промышленности, а также регенерировать сорбенты с возможностью их повторного использования.

По истечении способности к сорбции/десорбции (после примерно 5–7 циклов регенерации) материалы подвергаются утилизации, например пиролизом с получением тепловой энергии, или используются в качестве смолистых добавок в асфальтовые смеси при производстве дорожных покрытий [17]. При этом порошок отходов стальной металлической пыли, образующийся на конечной стадии пиролиза, может быть возвращен в процесс получения магнитосорбентов.

**Заключение.** Сделаем следующие выводы:

1. Разработаны составы и способы получения магнитосорбентов на основе отходов производства – окалины стальной пыли со связующим парафином – для очистки загрязненных вод от нефти и нефтепродуктов.

2. Биотестирование на двух тест-объектах (рачки *Daphnia magna* и водоросли *Scenedesmus quadricauda*) позволило установить, что отходы стальной пыли не токсичны и могут быть использованы в качестве компонента магнитосорбентов.

<sup>2</sup> ПНД Ф 14.1.272–2012 (ФР.1.31.2008.04409). Методика измерений массовой концентрации нефтепродуктов в сточных водах методом ИК-спектрофотометрии с применением концентратометров серии КН. – М., 2017. – 29 с.

3. Исследованы физико-химические свойства полученных сорбентов. Установлена их высокая гидрофобность – краевой угол смачивания  $128^{\circ}$ – $130^{\circ}$ ; 98–100%-ная плавучесть материала в течение 96 ч; низкое водопоглощение 0,126–0,108 г/г, что также подтверждает гидрофобность магнитосорбентов. Нефтеемкость сорбентов составила  $(2,1 \pm 0,26)$  г/г.

4. Сорбционное равновесие достигается в первые 10–20 мин контакта материала с Н и НП, на сорбцию оказывает влияние природа и толщина слоя нефтепродуктов. Максимальная сорбционная емкость достигается при толщине пленки  $(3,00 \pm 0,25)$  мм.

#### Библиографический список

1. Демельханов М.Д., Оказова З.П., Чупанова И.М. Экологические последствия разливов нефти // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 12. – С. 91–94.
2. Давыдова С.Л., Тагасов В.И. Нефть и нефтепродукты в окружающей среде: учеб. пособие. – М.: Изд-во РУДН, 2004. – 163 с.
3. Бейгельдруд Г.М. Очистка сточных вод в нефтяной и нефтеперерабатывающей промышленности. – М., 1997. – 120 с.
4. Генцлер Г.Л., Шарков А.М. Очистка сточных вод в нефтеперерабатывающей промышленности // Экология и промышленность России. – 2004. – № 10. – С. 15–17.
5. Жуков Д.В., Мурыгина В.П., Калужный С.В. Кинетические закономерности биодеградации алифатических углеводородов бактериями *Rhodococcus ruber* и *Rhodococcus erythropolis* // Прикладная биохимия и микробиология. – 2007. – Т. 43, № 6. – С. 657–663.
6. Аренс В.Ж., Гридин О.М., Яншин А.Л. Нефтяные загрязнения: как решить проблему // Экология и промышленность России. – 1999. – сентябрь. – С. 33–36.
7. Пат. 2226126 Российская Федерация, МПК В01J20/16, В01J20/26. Пористый магнитный сорбент / Тишин А.М., Спичкин Ю.И.; заявитель и патентообладатель ООО «Перспективные магнитные технологии и консультации». – № 2002135353/15, заявл. 30.12.2002; опубл. 27.03.2004, Бюл. № 9.
8. Очистка нефтесодержащих сточных вод магнитосорбентами на основе ферритизированного гальваношлама / И.В. Долбня, Е.А. Татаринцева, И.Г. Шайхиев, К.В. Козьмич, М.В. Комисаренко // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 23. – С. 154–156.
9. Разработка сорбента с магнитными свойствами на основе гальваношлама для ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов / И.Н. Долбня, Е.А. Татаринцева, Е.А. Бухарова, Л.Н. Ольшанская // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2018. – № 4. – С. 42–44.
10. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности плодовитости дафний. – М.: Акварос, 2007. – 35 с.
11. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей. – М.: Акварос, 2007. – 35 с.
12. Бухарова Е.А. Сорбционные материалы на основе отходов полиэтиленерефталата и соединений графита для очистки сточных вод: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06 / Саратов. гос. техн. ун-т им. Гагарина Ю.А. – Саратов, 2015. – 161 с.
13. Флорес Ариас М.М. Разработка сорбента с магнитными свойствами на основе оксидов железа и отходов металлургического производства для ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 02.00.11. – Белгород, 2012. – 22 с.
14. Макарова Н.В., Трофимец В.Я. Статистика в Excel. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
15. Современные методы анализа и средства измерения сорбционных свойств магнитосорбентов / И.В. Долбня, Е.А. Татаринцева, К.В. Козьмич, Л.Н. Ольшанская // Стандартные образцы. – 2017. – № 1. – С. 43–55.
16. Иванова М.А., Мургазина Р.Т., Зенитова Л.А. Центрифугирование как способ регенерации поглощенной нефти сорбентом «Гринсорб» // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15, № 21. – С. 127–129.
17. Артемов А.В., Пинкин А.В. Сорбционные технологии очистки воды от нефтяных загрязнений // Вода: Химия и экология. – 2008. – № 1. – С. 18–24.

## References

1. Demel'khanov M.D., Okazova Z.P., Chupanova I.M. Ekologicheskiye posledstviya razlivov nefi [The Environmental consequences of oil spills]. *Successes of modern natural science*. 2015. no. 12, pp. 91-94.
2. Davydova S.L., Tagasov V.I. Neft' i nefteprodukty v okruzhayushchey srede: uchebnoye posobiye [Oil and petroleum products in the environment: textbook]. Moscow: publishing house of PFUR, 2004, 163 p.
3. Beygel'drud G.M. Ochistka stochnykh vod v neftyanoy i neftepererabatyvayushchey promyshlennosti [Wastewater treatment in the petroleum and petrochemical industries] Moscow: CIOB, 1997, 120 p.
4. Gentzler G.L. Ochistka stochnykh vod v neftepererabatyvayushchey promyshlennosti [Wastewater treatment in neftepererabativaushiy industry]. *Ecology and industry of Russia*. 2004, no. 10, pp. 15-17.
5. Zhukov D.V., Murygina V.P., Kalyuzhnyy S.V. Kineticheskiye zakonomernosti biodegradatsii alifaticeskikh uglevodorodov bakteriyami Rhodococ cusruber i Rhodococ cuserythropolis [Kinetic regularities of biodegradation of aliphatic hydrocarbons by bacteria Rhodococ cusuber and Rhodococ cuserythropolis]. *Applied biochemistry and Microbiology*. 2007, vol. 43, no. 6, pp. 657-663.
6. Arens V.Zh. Neftyanyye zagryazneniya: kak reshit' problemu [Oil pollution: how to solve the problem]. *Ecology and industry of Russia*. 1999, no. 9, pp. 33-36.
7. Porous magnetic sorbent / Tishin A.M, Spichkin Y.I. Advanced magnetic technologies and consultation. Patent 2226126 Russian Federation, MPK B01J20/16, B01J20/26.No 2002135353/15, Appl. 30.12.2002; publ. 27.03.2004, www1.fips.ru
8. Dolbnya V.I., Tatarintseva E.A., Shaihiyev I.G., Kozmich K.V., Komisarenko M.V. Ochistka neftesoderzhashchikh stochnykh vod magnitosorbentami na osnove ferritizirovannogo gal'vanoshlama [Purification of oily wastewater by magnitoturbotron on the basis of ferromagnetic galvanostate]. *Bulletin of technological University*, 2016, vol. 19, no. 23, pp. 154-156.
9. Dolbnya I.N., Tatarintseva E.A., Bukharova E.A., Olshanskaya L.N. Razrabotka sorbenta s magnitnymi svoystvami na osnove gal'vanoshlama dlya likvidatsii razlivov nefi i nefteproduktov [Development of sorbent with magnetic properties on the basis of electroplating for oil and oil products spill response]. *Chemical and oil and gas engineering*, 2018, no. 4, pp. 42-44.
10. Metodika opredeleniya toksichnosti vody i vodnykh vytyazhek iz pochv, osadkov stochnykh vod, otkhodov po smertnosti plodovitosti dafnii [Methodology for determining the toxicity of water and water extracts from soils, sewage sludge, waste on fertility mortality Daphnia]: Federal register. Moscow: Aquaros, 2007, 35 p.
11. Metodika opredeleniya toksichnosti vody i vodnykh vytyazhek iz pochv, osadkov stochnykh vod i otkhodov po izmeneniyu urovnya fluorestsentsii khlorofilla i chislennosti kletok vodorosley [Method of determining the toxicity of water and water extracts from soils, sewage sludge and waste by changing the level of chlorophyll fluorescence and the number of algae cells]: Federal register. Moscow: Aquaros, 2007, 35 p.
12. Bukharova Ye.A. Sorbtsionnyye materialy na osnove otkhodov polietilenterefalata i soyedineniy grafita dlya ochistki stochnykh vod [Waste materials based on polyethylene terephthalate and graphite compounds for wastewater treatment]: dis... kand. tech. Sciences: 05.17.06 Saratov: SSTU named after Y.A. Gagarin, 2015, 161 p.
13. Flores Arias M.M. Razrabotka sorbenta s magnitnymi svoystvami na osnove oksidov zheleza i otkhodov metallurgicheskogo proizvodstva dlya likvidatsii avariynykh razlivov nefteproduktov [Development of sorbent with magnetic properties on the basis of iron oxides and wastes of metallurgical production for liquidation of emergency oil spills]: autoref. dis ... kand. tech. Sciences: 02.00.11. Belgorod, 2012, 22 p.
14. Makarova N.V., Trofimets V.Ya. Statistics in Excel [Statistika v Exce]. Moscow: Finance and statistics, 2002. – 368 p.
15. Dolbnya I.V., Tatarintseva Ye.A., Koz'mich K.V., Ol'shanskaya L.N. Sovremennyye metody analiza i sredstva izmereniya sorbtsionnykh svoystv magnitosorbentov [Modern methods of analysis and means of measuring the sorption properties of magnetic sorbents]. *Standard samples*. 2017, no. 1, pp. 43-55.
16. Ivanova M.A., Murtazina R.T., Zenitova L.A. Tsentrifugirovaniye kak sposob regeneratsii pogloshchonnoy nefi sorbentom «GRINSORB» [Centrifugation as a method of regeneration of the sorbent "GREENSORB"]. *Vestnik of the Kazan technological University*. 2012, vol. 15, no. 21, pp. 127-129.
17. A.V. Artemov, A.V. Pinkin Sorbtsionnyye tekhnologii ochistki vody ot neftyanykh zagryazneniy [Sorption technologies of water purification from oil pollution]. *Water: Chemistry and ecology*. 2008, no. 1, pp. 18-24.

Получено 24.01.2019

L. Olshanskaya, E. Tatarintseva, M. Chernova, A. Tareeva

## MAGNET SORBENTS BASED ON STEEL SCALE WASTE TO REMOVE PETROLEUM SPILLS

The compositions and methods for producing magnet sorbents on the basis of industrial waste – steel dust scale with binder paraffin for purifying contaminated water from oil and oil products are developed. Biotesting at two test objects (*Daphnia magna* crustaceans and *Scenedesmusquadricauda* algae) allowed establishing that steel scale is non-toxic and can be used as a component of magnet sorbents. Physical and chemical properties of the obtained materials are investigated. The high hydrophobicity with wetting angle  $128^{\circ}$ – $130^{\circ}$ ; 98–100 % buoyancy within 96 hours; low water absorption of 0.126–0.108 g/g. Oil capacity of sorbents was  $2.1 \pm 0.26$  g/g.

Sorption equilibrium is achieved in the first 10–20 min of contact of the material with oil and oil products, the sorption is influenced by the nature and thickness of the layer of petroleum products. The maximum sorption capacity is achieved with a film thickness of  $(3.0 \pm 0.25)$  mm.

**Keywords:** magnet sorbent, industrial waste, slag, steel dust scale, paraffin, oil products, water purification.

**Ольшанская Любовь Николаевна** (Саратов, Россия) – д-р хим. наук, профессор кафедры «Природная и техносферная безопасность», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Саратов, ул. Политехническая, 77, e-mail: ecos123@mail.ru).

**Татаринцева Елена Александровна** (Саратов, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры «Природная и техносферная безопасность», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Саратов, ул. Политехническая, 77, e-mail: tatarinceva-elen@mail.ru).

**Чернова Марина Алексеевна** (Саратов, Россия) – магистрант кафедры «Природная и техносферная безопасность», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Саратов, ул. Политехническая, 77, e-mail: ecos123@mail.ru).

**Тареева Алина Алексеевна** (Саратов, Россия) – магистрант кафедры «Природная и техносферная безопасность», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Саратов, ул. Политехническая, 77, e-mail: alina\_tareeva@mail.ru).

**Olshanskaya Lyubov** (Saratov, Russian Federation) – Doctor of Chemistry, Professor of the Department “Natural and Technosphere Safety”, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A. (410054, Saratov, Polytechnicheskaya st., 77, e-mail: ecos123@mail.ru).

**Tatarintseva Elena** (Saratov, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Natural and Technosphere Safety”, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A. (410054, Saratov, Polytechnicheskaya st., 77, e-mail: tatarinceva-elen@mail.ru).

**Chernova Marina** (Saratov, Russian Federation) – Undergraduate Student of the Department “Natural and Technosphere Safety”, Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin (410054, Saratov, Polytechnicheskaya st., 77, e-mail: ecos123@mail.ru).

**Tareeva Alina** (Saratov, Russian Federation) – Undergraduate Student of the Department “Natural and Technosphere Safety”, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A. (410054, Saratov, Polytechnicheskaya st., 77, e-mail: alina\_tareeva@mail.ru).

# КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ПРИРОДНЫЕ СИСТЕМЫ

---

DOI 10.15593/2409-5125/2019.02.09

УДК 504.064.37:528.8

**И.Р. Рахматуллина<sup>1</sup>, З.З. Рахматуллин<sup>2</sup>,  
Ф.Ф. Исхаков<sup>1</sup>, О.В. Серова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы

<sup>2</sup>Башкирский государственный аграрный университет

## **ДИНАМИКА ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА NDVI НАСАЖДЕНИЙ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS L.*) В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ УФИМСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ЦЕНТРА**

Заложены семь пробных площадей в лесных культурах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*) в различных зонах нефтехимического и транспортного загрязнения г. Уфы. По августовским космоснимкам Landsat среднего пространственного разрешения (30 м) на пробные площади построены временные ряды вегетационного индекса NDVI с 1988 по 2017 год. Средние значения NDVI для сосновых насаждений  $0,600 \pm 0,003$ . Самые низкие значения вегетационного индекса получены на снимке от 05 августа 2010 года, они свидетельствуют о крайне низкой вегетационной активности, как следствии аномально длительного жаркого и засушливого весенне-летнего периода. Самые высокие значения вегетационного индекса наблюдаются на снимке от 13 августа 2013 года, в период, характеризующийся как теплый, с некоторым превышением количества осадков. Если рассматривать расположение пробных площадей, то самое высокое значение NDVI ( $0,613 \pm 0,005$ ) – в зоне относительного контроля – в юго-западной пригородной зоне города. Самое низкое значение NDVI ( $0,585 \pm 0,003$ ) – в зоне со средним уровнем нефтехимической и высоким уровнем автотранспортной и рекреационной нагрузки. В районе сильного нефтехимического загрязнения, на расстоянии 300 м с наветренной стороны от Уфимского нефтеперерабатывающего завода, значение NDVI относительно высокое и составляет  $0,605 \pm 0,008$ . Установлено, что в условиях уфимского промышленного центра совместное влияние транспортной, рекреационной нагрузки и возраста лесных культур сосны снижает уровень хлорофилла в них. Факт влияния нефтехимического производства на содержание хлорофилла в сосновых насаждениях не доказан.

---

Динамика вегетационного индекса NDVI насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*) в условиях загрязнения уфимского промышленного центра / И.Р. Рахматуллина, З.З. Рахматуллин, Ф.Ф. Исхаков, О.В. Серова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2019. – № 2. – С. 106–117. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.09

Rahmatullina I., Rahmatullin Z., Iskhakov F., Serova O. Dynamics of the NDVI Vegetation Index of Pine Forest Plantations (*Pinus sylvestris L.*) under Pollution in Industrial Center of Ufa. PNRPU. Applied Ecology. Urban Development. 2019. No. 2. Pp. 106-117. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.09

**Ключевые слова:** лесные культуры, сосна обыкновенная, содержание хлорофилла, нефтехимическое загрязнение, космические снимки Landsat, нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI).

**Введение.** Отрицательное влияние города проявляется в различных видах деградации природных ландшафтов. Вопросы оздоровления урбанизированной среды, улучшения условий жизни остаются актуальными уже несколько десятилетий.

Древесные растения являются эффективным средством снижения уровня распространения загрязнения территорий. Среди них особая роль принадлежит хвойным насаждениям, способным круглый год выполнять роль фитофильтров за счет многолетней хвои [1].

На территории уфимского промышленного центра (УПЦ) выделяются искусственные насаждения сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), успешно произрастающие даже в санитарно-защитных зонах промышленных предприятий. Так, в окрестностях нефтеперерабатывающих заводов г. Уфы, в условиях постоянной загазованности, наблюдается устойчивый рост и развитие сосны. В таких условиях адаптивный потенциал сосны проявляется изменениями в строении ассимиляционного аппарата и корневых систем [2].

Степень воздействия промышленного загрязнения на интенсивность фотосинтеза сосны обыкновенной неоднозначна [3]. При воздействии невысоких концентраций загрязняющих веществ происходит активация процессов фотосинтеза [4, 5]. Влияние высоких доз промышленных поллютантов, напротив, приводит к деградации фотосинтетических пигментов и снижению интенсивности фотосинтеза [6, 7].

Исследования влияния техногенных загрязнений на фотосинтетические процессы древостоев средствами наземного мониторинга являются дорогостоящими. Поэтому повышается роль дистанционного зондирования Земли [8]. Так, одним из самых распространенных индексов для характеристики количества фотосинтетически активной биомассы по космическим снимкам является NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный относительный вегетационный индекс). Расчет NDVI базируется на двух наиболее стабильных участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. В красной области спектра (0,6–0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области (0,7–1,0 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. Отношение этих показателей друг к другу позволяет оценить объем зеленой биомассы и концентрацию хлорофилла [9, 10].

Цель исследования – выявить динамику вегетационного индекса NDVI для насаждений сосны обыкновенной в условиях уфимского промышленного центра на основе космических снимков среднего пространственного разрешения (30 м).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- построение временных рядов значений NDVI по августовским снимкам за период 1998–2017 годов,
- анализ многолетней динамики вегетационного индекса,
- анализ вегетационного индекса в зависимости от степени загрязнения территории.

**Объекты исследований.** УПЦ относится к зоне повышенного смешанного загрязнения воздуха с преобладанием углеводородного типа загрязнения. Экологическая обстановка определяется влиянием выбросов нефтеперерабатывающей промышленности, автотранспорта и энергетики. В городе расположено свыше 960 предприятий, выбрасывающих загрязняющие вещества в атмосферу. Преобладающими ветрами являются ветра южных и юго-западных направлений [11].

В зависимости от характера расположения промышленных предприятий, селитебной зоны и направления господствующих ветров территория УПЦ была условно разделена на три зоны (рис. 1). При закладке пробных площадей использовались лесотаксационные описания (материалы лесоустройства) и материалы полевых исследований, проведенных ранее А.Ю. Кулагиным, Г.А. Зайцевым (2006 год) [5].

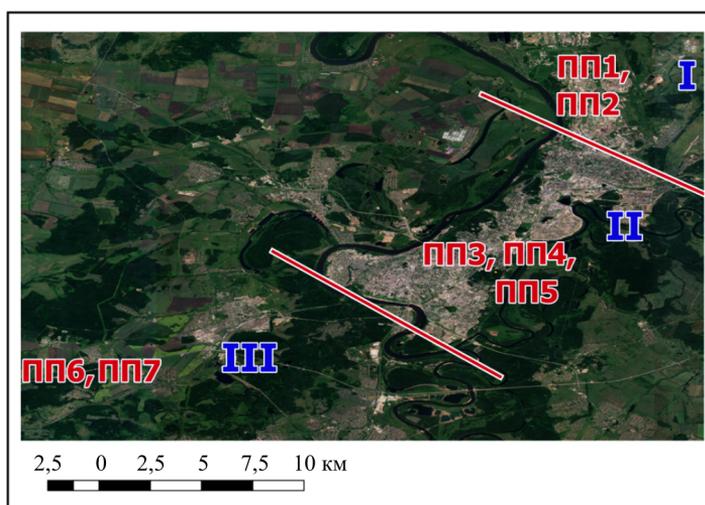


Рис. 1. Карта-схема расположения пробных площадей (ПП1–ПП7) и зон нефтехимического загрязнения (I–III)

1. Зона максимального уровня нефтехимического загрязнения (северная часть города), в которой расположены три нефтеперерабатывающих завода: «Уфанефтехим», «Уфимский НПЗ», «Новойл», являющиеся филиалами ПАО АНК «Башнефть». В средневозрастных лесных культурах сосны обыкновенной с примесью до 10 % твердолиственных пород естественного происхождения заложены две постоянные пробные площади (ПП):

ПП1. Расположена в непосредственной близости от «Башнефть-УНПЗ» (300 м, с западной стороны). На 2006 год лесные культуры имели следующие таксационные показатели: состав – 10 сосна обыкновенная + вяз шершавый + клен остролистный, возраст 45 лет, средний диаметр 12,8 см, высота 12,0 м, полнота 0,8.

ПП2. Расположена в непосредственной близости от «Башнефть-УНПЗ» (450 м, с западной стороны). На 2006 год лесные культуры сосны имели состав: 9 сосна обыкновенная, 1 клен остролистный + вяз шершавый, возраст 45 лет, средний диаметр 12,6 см, высота 12,6 м, полнота 0,9 [5].

2. Зона среднего уровня нефтехимического и повышенного транспортного загрязнения, высокой рекреационной нагрузки (центральная часть города). В последние годы отмечается некоторое снижение выбросов от стационарных источников на фоне возрастания выбросов от автотранспорта. Постоянные пробные площади заложены в чистых высокопродуктивных снытьевых сосняках:

ПП3. Заложена в Лесопарке имени лесоводов Башкирии. Примыкает непосредственно к улице Менделеева, характеризующейся высокой транспортной нагрузкой. Уфимское участковое лесничество Уфимского лесничества, квартал 19, выдел 19. На момент лесоустройства, 2014 год, насаждение имело следующие таксационные показатели: состав – 10 сосна обыкновенная, возраст 75 лет, средний диаметр 28 см, высота 27 м, полнота 0,9, запас 400 м<sup>3</sup>/га.

ПП4. Расположена в Лесопарке имени лесоводов Башкирии: Уфимское участковое лесничество Уфимского лесничества, квартал 19, выдел 14. На момент лесоустройства насаждение имело следующие таксационные показатели: состав – 10 сосна обыкновенная, возраст 82 года, средний диаметр 32 см, высота 28 м, полнота 0,9, запас 410 м<sup>3</sup>/га.

ПП5. Расположена в лесопарке имени лесоводов Башкирии: Уфимское участковое лесничество Уфимского лесничества, квартал 19, выдел 35. На момент лесоустройства насаждение имело следующие таксационные показатели: состав – 10 сосна обыкновенная, возраст 77 лет, средний диаметр 32 см, высота 29 м, полнота 0,8, запас 380 м<sup>3</sup>/га.

3. В качестве фоновой территории подобраны лесохозяйственные выделы, состоящие из лесных насаждений сосны обыкновенной в южных пригородах в аналогичных типах леса, схожих по показателям продуктивности. Эти выделы отнесены к дендрологическому памятнику природы регионального значения «Юматовские опытные лесные культуры» Постановлением СМ БАССР от 17.08.1965 года [12].

ПП6. Заложена в Юматовском участковом лесничестве Уфимского лесничества, квартал 43, выдел 20, состав – 10 сосна обыкновенная + клен остролистный + вяз шершавый, возраст 75 лет, средний диаметр 32 см, высота 30 м, полнота 0,7, запас 340 м<sup>3</sup>/га.

ПП7. Заложена в Юматовском участковом лесничестве Уфимского лесничества, квартал 43, выдел 22, состав – 10 сосна обыкновенная + вяз шершавый + клен остролистный, возраст 59 лет, средний диаметр 24 см, высота 27 м, полнота 1, запас 440 м<sup>3</sup>/га [13].

Установление конфигурации и размеров пробных площадей проводили в два этапа. На первом этапе их определяли по расположению лесохозяйственные выделы. На втором – в соответствии с разрешением снимка (30 м) ограничивали пробные площади только пикселями, целиком входящими в лесохозяйственный выдел, т.е. исключали пограничные области.

**Программа и методика работ.** В исследованиях использованы 14 снимков Landsat (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) за август 1998–2017 годов с облачностью менее 10 %, покрывающие территорию г. Уфы. Обработку снимков проводили с помощью инструментов программного продукта SAGA GIS ver.6.3.0 (System for Automated Geoscientific Analyses, <http://www.saga-gis.org>). Обработка снимка включала в себя радиометрическую калибровку красных (RED) и ближних инфракрасных (NIR) спектральных каналов снимков. Для этого безразмерные нормализованные значения (Digital Number / DN) каждого пикселя пересчитали в отражательную способность (reflectance) с помощью инструмента Top of Atmosphere Reflectance.

Для каждого снимка, используя откалиброванные спектральные каналы, с помощью инструмента Vegetation Index – Slope Based построили индексное изображение – нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI).

Пробные площади в виде векторных слоев были наложены на разновременные изображения NDVI. Используя инструмент Grid Values to Point, в пределах каждой пробной площади создали векторные точечные слои таким образом, чтобы на каждый пиксель индексного изображения NDVI приходилась одна векторная точка, в атрибутах которой содержалось значение вегетационного индекса (рис. 2).



Рис. 2. Пробная площадь № 4: а – общий вид; б – значения NDVI

Всего собраны значения вегетационного индекса по 1022 пикселям каждого снимка. На каждую пробную площадь приходилось от 56 до 322 пикселей. Их обработка и анализ производились в программных продуктах Microsoft Excel и Statistica.

**Результаты и их обсуждение.** Среднее значение NDVI августовских снимков по годам и пробным площадям составило 0,60. Наблюдается высокая изменчивость вегетационного индекса по годам (рис. 3).

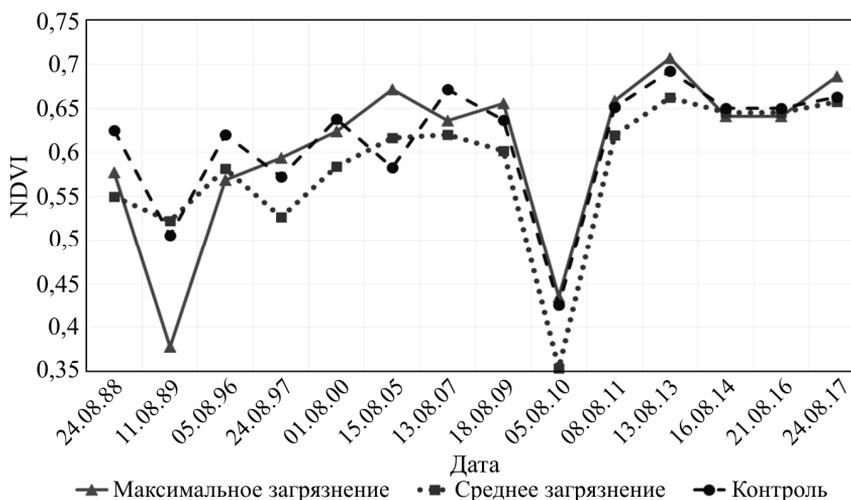


Рис. 3. Варьирование NDVI по зонам и годам (зона максимального загрязнения построена только по ПП1)

Так, самые низкие показатели получены 5 августа 2010 года (таблица), среднее значение по пробным площадям 0,39, минимальное зафиксировано на пробной площади № 4 и составило 0,35. Такие показатели свидетельствуют о крайне низкой для данного сезона вегетационной активности. Лето

2010 года оказалось аномальным и по температуре, и по количеству осадков. Такого длительного жаркого и засушливого периода на территории Республики Башкортостан не было за все время наблюдений. Особенно засушливым оказался вегетационный период – с мая по октябрь, когда наблюдался значительный дефицит осадков. Среднемесячная температура воздуха мая, июня, июля оказалась выше нормы на 3–5 °С, августа – на 8 °С. Многократно перекрывались температурные максимумы [14].

### Средние значения NDVI

Пробные площади	По всем снимкам		5 августа 2010 года		13 августа 2013 года	
	Среднее	Стандартная ошибка среднего	Среднее	Стандартная ошибка среднего	Среднее	Стандартная ошибка среднего
ПП1	0,605	0,008	0,435	0,004	0,707	0,002
ПП2	0,627	0,008	0,447	0,004	0,723	0,003
ПП3	0,587	0,007	0,367	0,004	0,663	0,002
ПП4	0,583	0,005	0,346	0,002	0,661	0,002
ПП5	0,586	0,010	0,366	0,005	0,671	0,006
ПП6	0,609	0,005	0,426	0,003	0,689	0,001
ПП7	0,625	0,010	0,424	0,006	0,706	0,003
По всем ПП	0,600	0,003	0,393	0,005	0,684	0,003

Низкие значения NDVI наблюдались и на снимке от 13 августа 1989 года, что также связано с недостатком осадков в июле и начале августа рассматриваемого года.

Самый высокий вегетационный индекс наблюдается на снимке от 13 августа 2013 года, среднее значение по пробным площадям 0,68, максимальное – 0,72 (пробная площадь № 2). Этот год характеризовался как теплый, с некоторым превышением количества осадков. В августе средняя температура воздуха составила 16–19 °С, что на 1–2 °С выше многолетних значений, количество осадков превысило норму в 1,5 раза, особенно дождливой оказалась первая декада месяца [15].

Пробные площади ПП1 и ПП2, заложенные в условиях максимального уровня загрязнения в окрестностях нефтеперерабатывающих заводов, имеют сходный характер динамики NDVI. Однако на ПП2 вегетационный индекс во все наблюдаемые годы имеет повышенные значения, в среднем на 0,02–0,04. В самый засушливый 2010 год эта разница опустилась до 0,01. Высокие значения ПП2 объясняются относительно смешанным составом насаждений, только на этой пробной площади сосна представлена 9 единицами, 1 единицу занимает твердолиственная поро-

да – клен остролистный. Поэтому при характеристике территории, приуроченной к зоне максимального загрязнения, ограничились ПП1.

Среднее значение NDVI на ПП1 – 0,605. Если проследить по годам, то вегетационный индекс с 1988 по 1996 год был самым низким среди всех пробных площадей. Однако с 1997 по 2017 год тенденция противоположная – вегетационный индекс самый высокий. Таким образом, при достижении насаждений сосны 35-летнего возраста наблюдается высокое содержание хлорофилла на этом участке. Факт влияния нефтехимического загрязнения на содержание хлорофилла не установлен, что может быть связано с расположением пробной площади с наветренной стороны по отношению к нефтехимическому заводу.

Пробные площади ПП3, ПП4, ПП5, заложенные в условиях среднего нефтехимического загрязнения и сильного автотранспортного и рекреационного, в Лесопарке имени лесоводов Башкирии, имеют очень близкие значения вегетационного индекса. Разница между ними в отдельные годы (1996, 1997, 2000, 2010 годы) не превышает 0,02 ед., в большинстве случаев эта разница не превышает 0,008 ед. (2005, 2007, 2009, 2011, 2014, 2016 годы).

В целом сосновые насаждения территории лесопарка имеют самые низкие значения вегетационного индекса (0,58–0,59) по сравнению с зоной сильного нефтехимического загрязнения (УНПЗ) и относительного контроля (Юматово). Это объясняется сильной автотранспортной и рекреационной нагрузкой. К лесопарку примыкает оживленная ул. Менделеева с высокой транспортной загруженностью. Лесопарк, располагаясь в центре города, испытывает длительную нагрузку большого количества рекреантов в течение всего года. При этом здесь расположены самые возрастные насаждения сосны – 82 года (ПП4), в которых процессы фотосинтеза имеют тенденцию к ослаблению.

Пробные площади, заложенные к юго-западу от города и характеризующиеся как относительный контроль, имеют более высокие значения вегетационного индекса, но в то же время значительные расхождения между собой. Несмотря на большой размах стандартной ошибки средней и доверительного интервала, ПП7 имеет более высокие значения NDVI (рис. 4). Так, среднее значение NDVI на ПП6 – 0,61, на ПП7 – 0,625. Более высокие значения 7-й пробной площади объясняются более молодым возрастом сосновых культур (59 лет по сравнению с 75 годами) и более высокой полнотой (полнота 1 против 0,7).

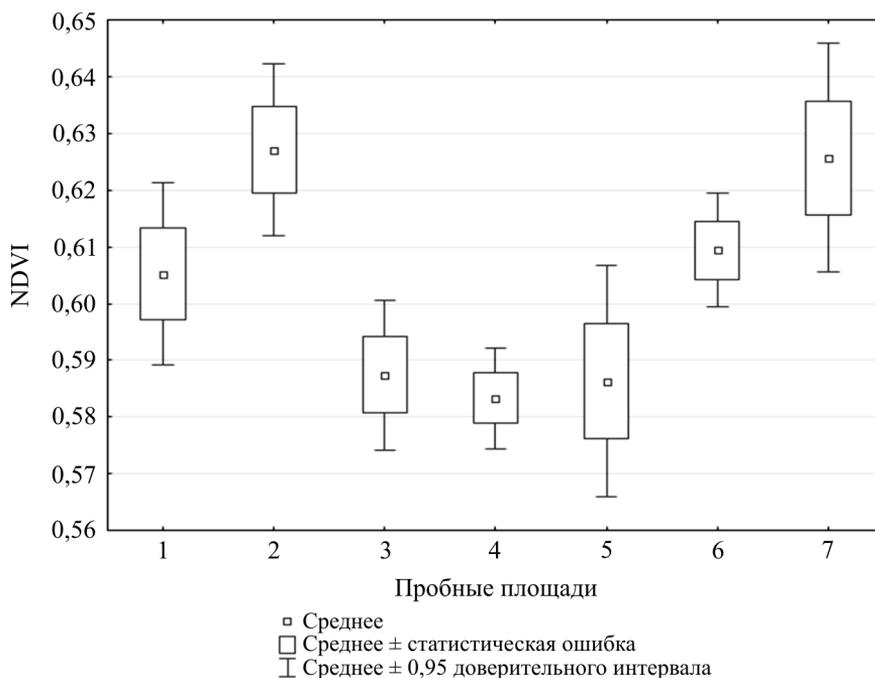


Рис. 4. Статистические показатели NDVI по пробным площадям

**Выводы.** Таким образом, временные ряды значений NDVI по августовским снимкам Landsat позволяют охарактеризовать количественный отклик сосновых культур на тип загрязнения, оценить их многолетнюю динамику. Отчетливо выделяются летние периоды с низким (2010 год) и высоким (2013 год) значением биомассы и содержанием хлорофилла.

Обнаружено, что в условиях уфимского промышленного центра совместное влияние транспорта, рекреационной нагрузки и возраста лесных культур сосны снижает уровень хлорофилла в них. Однако на основании полученных данных не выявлено, что нефтехимическое загрязнение сказывается на уровне содержания хлорофилла в сосновых насаждениях, находящихся с наветренной стороны к нефтехимическим предприятиям. Это может служить обоснованием при озеленении лесными культурами сосны обыкновенной санитарно-защитных зон нефтехимических предприятий.

#### Библиографический список

1. Зайцев Г.А., Кулагин А.А., Мельникова Г.А. Особенности формирования ассимиляционного аппарата хвойных в условиях нефтехимического загрязнения (Предуралье, Уфимский промышленный центр) // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2007. – № S (75). – С. 130–132.
2. Зайцев Г.А., Сметанина Е.Э., Кулагин А.Ю. Перспективность использования хвойных в создании санитарно-защитных насаждений в условиях нефтехимического загрязнения // Биологиче-

ская рекультивация нарушенных земель: материалы междунар. совещания. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2003. – С. 104–111.

3. Сметанина Е.Э. Содержание хлорофилла в хвое представителей семейства *Sosnovye* в условиях уфимского промышленного центра. Принципы формирования высокопродуктивных лесов. – Уфа: Изд-во БГАУ, 2000. – С. 94–95.

4. Коршиков И.И. Адаптация растений к условиям техногенно загрязненной среды. – Киев: Наукова думка, 1996. – 238 с.

5. Зайцев Г.А., Кулагин А.Ю. Сосна обыкновенная и нефтехимическое загрязнение: дендроэкологическая характеристика, адаптивный потенциал и использование. – М.: Наука, 2006. – 124 с.

6. Тарханов С.Н., Бирюков С.Ю. Влияние атмосферного загрязнения на фотосинтезирующий аппарат *Pinus sylvestris* L. и *Picea obovata* Ledeb. × *P. abies* (L.) karst в северной тайге бассейна Северной Двины // Лесной журнал. – 2014. – № 1 (337). – С. 20–26.

7. Григоренко А.В. Физиологические и морфологические показатели хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях аэротехногенного загрязнения // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 4. – С. 15–19.

8. Сравнительный анализ спутниковых снимков высокого разрешения при дешифрировании древостоев, загрязненных отходами силикатного производства / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, Ю.А. Полевщикова, С.А. Незамаев, Е.Н. Демишева // Вестник Пермского государственного университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2013. – № 2 (18). – С. 74–90.

9. Price K.P., Pyke D.A., Mendes L. Shrub dieback in a semiarid ecosystems: The integration of remote sensing and geographic information systems for detecting vegetation change // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1992. – № 58 (4). – P. 455–463.

10. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. – 2009. – № 3. – С. 28–32.

11. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды в Республике Башкортостан за 2017 г. – Уфа: Министерство природопользования и экологии, 2018. – 330 с.

12. Лесохозяйственный регламент Уфимского лесничества Республики Башкортостан. – Уфа: Институт стратегических исследований Республики Башкортостан, 2018. – 198 с.

13. Таксационное описание Уфимского лесничества / Рослесинфорг. – Уфа, 2014.

14. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан за 2010 г. / Министерство природопользования и экологии. – Уфа, 2011. – 343 с.

15. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан за 2014 г. / Министерство природопользования и экологии. – Уфа, 2015. – 326 с.

## References

1. Zajcev G.A., Kulagin A.A., Mel'nikova G.A. Osobnosti formirovaniya assimilacionnogo apparata hvojnyn v usloviyah neftekhimicheskogo zagryazneniya (Predural'e, Ufimskij promyshlennyj centr) [Features of formation of the assimilation apparatus of conifers in the conditions of petrochemical pollution]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2007, no. S (75), pp. 130-132.

2. Zajcev G.A., Smetanina E. E.H., Kulagin A.YU. Perspektivnost' ispol'zovaniya hvojnyn v sozdanii sanitarno-zashchitnyh nasazhdenij v usloviyah neftekhimicheskogo zagryazneniya [Prospects for the use of conifers in the creation of sanitary-protective plantings in the conditions of petrochemical pollution]. *Biologicheskaya rekul'tivaciya narushennyh zemel': materialy Mezhdunarodnogo soveshchaniya*. Ekaterinburg: UrO RAN, 2003, pp. 104-111.

3. Smetanina E.E.H. Soderzhanie hlorofilla v hvoe predstavitelej semejstva Sosnovye v usloviyah Ufimskogo promyshlennogo centra [The content of chlorophyll in the coniferous pine family in the conditions of the Ufa industrial center]. *Principy formirovaniya vysokoproduktivnyh lesov*. Ufa: BGAU, 2000, pp. 94-95.

4. Korshikov I.I. Adaptaciya rastenij k usloviyam tekhnogenno zagryaznennoj sredy [Adaptation of plants to the conditions of technogenic polluted environment]. Kiev: Naukova dumka, 1996, 238 p.

5. Zajcev G.A., Kulagin A.Yu. Sosna obyknovennaya i neftekhimicheskoe zagryaznenie: dendroekologicheskaya harakteristika, adaptivnyj potencial i ispol'zovanie [Pine and petrochemical pollution: dendroecological characteristics, adaptive potential and use.]. Moscow: Nauka, 2006, 124 p.

6. Tarhanov S.N., Biryukov S.Yu. Vliyanie atmosfernogo zagryazneniya na fotosinteziruyushchij apparat *Pinus sylvestris* L. i *Picea obovata* Ledeb. × *P. abies* (L.) karst v severnoj tajge bassejna Cevernoj Dviny [The impact of atmospheric pollution on photosynthetic apparatus of *Pinus sylvestris* L. and *Picea obovata* Ledeb. × *P. abies* (L.) karst in the Northern taiga of the Northern Dvina basin]. *Lesnoj zhurnal*. 2014, no. 1 (337), pp. 20-26.

7. Grigorenko A.V. Fiziologicheskie i morfologicheskie pokazateli hvoi sosny obyknovЕННОj (*Pinus sylvestris* L.) v usloviyah aehrotekhnogennogo zagryazneniya [Physiological and morphological parameters of pine needles (*Pinus sylvestris* L.) in conditions of aerotechnogenic pollution]. *Vestnik KrasGAU*. 2015, no. 4, pp. 15-19.

8. Kurbanov E.H.A., Vorob'ev O.N., Polevshchikova Yu.A., Nezamaev S.A., Demisheva E.N. Sravnitel'nyj analiz sputnikovyh snimkov vysokogo razresheniya pri deshifirovanii drevostoev, zagryaznennyh othodami silikatnogo proizvodstva [Comparative analysis of satellite images with high resolution for interpretation of forest stands polluted by the waste of silicate production]. *Vestnik PGU. Seriya: Les. EHkologiya. Prirodopol'zovanie*. 2013, no. 2 (18), pp. 74-90.

9. Price K.P., Pyke D.A., Mendes L. Shrub dieback in a semiarid ecosystems: The integration of remote sensing and geographic information systems for detecting vegetation change // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1992, no. 58(4), pp. 455-463.

10. CHerepanov A.S., Druzhinina E.G. Spektral'nye svoystva rastitel'nosti i vegetacionnye indeksy [Spectral properties of vegetation and vegetation indices]. *Geomatika*. 2009, no. 3, pp. 28-32.

11. Gosudarstvennyj doklad o sostoyanii prirodnyh resursov i okruzhayushchej sredy v Respublike Bashkortostan za 2017 g [State report on the state of natural resources and environment in the Republic of Bashkortostan for 2017]. Ufa: Ministerstvo prirodopol'zovaniya i ehkologii, 2018, 330 p.

12. Lesoazyajstvennyj reglament Ufmskogo lesnichestva Respubliki Bashkortostan [Forestry regulations of the Ufa forestry of the Republic of Bashkortostan]. Ufa: Institut strategicheskikh issledovaniy Respubliki Bashkortostan, 2018, 198 p.

13. Taksacionnoe opisanie Ufmskogo lesnichestva [Taxonomic description of the Ufa forestry]. Ufa: Roslesinforg, 2014.

14. Gosudarstvennyj doklad o sostoyanii prirodnyh resursov i okruzhayushchej sredy Respubliki Bashkortostan za 2010 g [State report on the state of natural resources and environment in the Republic of Bashkortostan for 2010]. Ufa: Ministerstvo prirodopol'zovaniya i ehkologii, 2011, 343 p.

15. Gosudarstvennyj doklad o sostoyanii prirodnyh resursov i okruzhayushchej sredy Respubliki Bashkortostan za 2014 g [State report on the state of natural resources and environment in the Republic of Bashkortostan for 2014]. Ufa: Ministerstvo prirodopol'zovaniya i ehkologii, 2015, 326 p.

Получено 20.03.2019

**I. Rahmatullina, Z. Rahmatullin, F. Iskhakov, O. Serova**

**DYNAMICS OF THE NDVI VEGETATION INDEX  
OF PINE FOREST PLANTATIONS (*PINUS SYLVESTRIS* L.)  
UNDER POLLUTION IN INDUSTRIAL CENTER OF UFA**

Seven test areas in the forestry plantations of pine (*Pinus sylvestris* L.) have been selected, located in various zones of petrochemical and transport pollution of the city of Ufa. Time series of NDVI vegetation index on the territories of the test areas based on the Landsat space images from 1988 to 2017 years have been constructed. Average values of NDVI for pine plantations are  $0.600 \pm 0.003$ . The lowest values of the vegetation index are received in the picture of August 05, 2010. It shows very weak vegetation activity because of the very long hot and dry spring-summer

season. The highest values of the vegetation index are received in the picture of August 13, 2013. This period was warm, precipitation was slightly exceeded.

When the location of the sample areas was considered, the highest value of NDVI ( $0.613 \pm 0.005$ ) was detected in the area of relative control – in the South-Western suburban area of the city. The lowest NDVI value ( $0.585 \pm 0.003$ ) was detected in the zone with an average level of petrochemical pollution and high levels of road and recreational load. In the area of heavy petrochemical pollution, at a distance of 300 m from the windward side of the Ufa oil refinery, the NDVI value is relatively high and is  $0.605 \pm 0.008$ . It is established that in the conditions of the Ufa industrial center, the combined influence of transport, recreational load and the age of pine forest cultures reduces the level of chlorophyll in them. The influence of petrochemical production on the chlorophyll content in pine plantations has not been proven.

**Keywords:** forest plantations, *Pinus sylvestris*, chlorophyll, petrochemical pollution, Landsat satellite images, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

**Рахматуллина Ирина Римилевна** (Уфа, Россия) – канд. биол. наук, доцент кафедры «Экология, география и природопользование», Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы (450008, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Октябрьской революции, 3а, e-mail: rahmat\_irina@mail.ru).

**Рахматуллин Загир Забирович** (Уфа, Россия) – канд. сельскохозяйств. наук, доцент кафедры «Лесоводство и ландшафтный дизайн», Башкирский государственный аграрный университет (450001, Республика Башкортостан, Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, e-mail: zagir1983@mail.ru).

**Исхаков Фанис Фаннурович** (Уфа, Россия) – канд. биол. наук, доцент кафедры «Экология, география и природопользование», Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы (450008, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Октябрьской революции, 3а, e-mail: ishff@mail.ru).

**Серова Оксана Васильевна** (Уфа, Россия) – канд. биол. наук, доцент кафедры «Экология, география и природопользование», Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы (450008, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Октябрьской революции, 3а, e-mail: serowa@mail.ru).

**Rakhmatullina Irina** (Ufa, Russian Federation) – Ph.D. in Biological Sciences, Associate Professor of Ecology, Geography and Nature Management chair, Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla (450008, Ufa, October Revolution st., 3a, e-mail: rahmat\_irina@mail.ru).

**Rakhmatullin Zagir** (Ufa, Russian Federation) – Ph.D. in Agricultural Sciences, Associate Professor of Forestry and Landscape design chair, Bashkir State Agrarian University (450001, Ufa, 50-years Otyabrya st., 34, e-mail: zagir1983@mail.ru).

**Iskhakov Fanis** (Ufa, Russian Federation) – Ph.D. in Biological Sciences, Associate Professor of Ecology, Geography and Nature Management chair, Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla (450008, Ufa, October Revolution st., 3a, e-mail: ishff@mail.ru).

**Serova Oksana** (Ufa, Russian Federation) – Ph.D. in Biological Sciences, Associate Professor of Ecology, Geography and Nature Management chair, Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla (450008, Ufa, October Revolution st., 3a, e-mail: serowa@mail.ru).

DOI 10.15593/2409-5125/2019.02.10

УДК 504.75: 628.5

**Д.В. Макаров<sup>1</sup>, Е.А. Кантор<sup>1</sup>, Р.Н. Вострова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет транспорта

## **ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА В МОНИТОРИНГЕ СОДЕРЖАНИЯ МУТНОСТИ СКВАЖИННЫХ ВОД ЮГО-ВОСТОЧНОГО РЕГИОНА БЕЛАРУСИ**

Проведен анализ стабильности значений мутности подземных и исходных вод двух инфильтрационных водозаборов (ИВ) юго-восточного региона Республики Беларусь. С этой целью были построены  $X-R$ -карты Шухарта, для подземных и  $X-MR$ -карты Шухарта для исходных вод. Помимо этого, проведено исследование изменчивости содержания мутности в исходных водах от их абсолютных значений. Для определения различий и общих закономерностей формирования значений мутности в подземных водах были построены матрицы парных корреляций между концентрацией по мутности и значениями по 18 показателям качества по каждой скважине. Установлено, что на 23 % скважин ИВ 1 и 18 % скважин ИВ 2 значения мутности нестабильны. Нестабильность значений на некоторых скважинах может быть вызвана периодическим присутствием нерастворимых минеральных веществ в подземных водах. Несмотря на нестабильность значений рассматриваемого показателя в подземных водах некоторых скважин, выявлена стабильность значений в исходных водах обоих ИВ. Это может быть вызвано смешиванием подземных вод, подаваемых с разных скважин. Выявлена тенденция к снижению значений мутности в исходных водах на обоих водозаборах. Возможной причиной этого может быть меньшая скорость фильтрации вод через грунт, связанная с долгосрочной эксплуатацией водозаборов. Построением матриц парных корреляций значений мутности и 18 показателей качества исходных вод установлено, что 87,5 % коэффициентов корреляции на первом водозаборе и 85,4 % коэффициентов корреляции на втором водозаборе характеризуются слабой связью. Это может быть связано со сложностью химического состава подземных вод.

**Ключевые слова:** подземные воды, показатели качества воды, карты контроля качества, мутность, экологический мониторинг.

**Введение.** Оценка водных объектов, выявление динамики изменения качества вод, а также факторов, влияющих на эти процессы, являются важными и актуальными задачами, поскольку они оказывают влияние на

---

Макаров Д.В., Кантор Е.А., Вострова Р.Н. Применение статистических методов анализа в мониторинге содержания мутности скважинных вод юго-восточного региона Беларуси // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2019. – № 2. – С. 118–127. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.10

Makarov D., Kantor E., Vostrova R. Application of Statistical Methods of Analysis for Monitoring of the Content of Turbidity of Supply Wells' Waters in the South-eastern Region of Belarus. PNRPU. Applied ecology. Urban development. 2019. No. 2. Pp. 118-127. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.02.10

здоровье людей [1]. Мутность воды – один из ключевых технологических параметров, определяющих работу станций водоподготовки [2–4]. Она характеризуется [2, 5]:

- наличием осадка, который может отсутствовать, быть незначительным, заметным, большим, очень большим, измеряясь в миллиметрах;
- взвешенными веществами (грубодисперсными и мелкодисперсными примесями), определение которых происходит гравиметрически после фильтрования пробы;
- прозрачностью.

Результаты построения контрольных карт Шухарта (ККШ) дают возможность оценить управляемость и стабильность процесса, соответствие показателей качества природных объектов нормативной документации [1]. Применение ККШ позволяет снизить риски следующих ошибок:

- рассматривать обычную флуктуацию изучаемого показателя как особую причину нарушения установленных требований;
- принимать отклонение в системе за естественную флуктуацию, не выявляя факторы, нарушающие установленные требования [6–8].

Использование ККШ позволяет выявить, когда флуктуация представляет естественную вариабельность системы, а когда технологический процесс требует вмешательства [9]. Кроме этого, ККШ позволяет оценить стабильность контролируемых показателей, характеризующих управляемость в соответствии с концепцией о статистическом управлении процессами (SPC) [10].

**Методика исследования.** В качестве исходных данных использовано ежеквартально определяемое качество вод 52 скважин инфильтрационных водозаборов (ИВ) юго-восточного региона Республики Беларусь в период 2001–2016 годов (для ИВ 1) и 2004–2016 годов (для ИВ 2). На ИВ 1 и большинстве скважин ИВ 2 эксплуатируется водоносный горизонт турон-маастрихтских отложений верхнего мела.

Для оценки стабильности формирования концентрации мутности в подземных водах ИВ 1 и ИВ 2 произведено построение  $X-R$  ККШ (карты средних и размахов), а в исходной –  $X-MR$  ККШ (карты индивидуальных значений и скользящего размаха)<sup>1</sup>. Построение ККШ проведено в программе Statistica 10.0. В качестве выборок для построения ККШ принималось содержание мутности в исходных и скважинных водах ИВ 1 с 2001 по 2016 год (64 значения) и ИВ 2 – с 2004 по 2016 год (51 значение). Построение  $X-MR$  ККШ проводилось аналогично работам [11, 12].

---

<sup>1</sup> ГОСТ Р 50779.42–99. Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 20 с.

Исследование анализа изменчивости содержания мутности ( $\Delta C[C_{(t)}] = C_{(t+1)} - C_{(t)}$ ) в исходных водах ИВ 1 и ИВ 2 от их абсолютных значений ( $C_{(t)}$ , где  $t$  – момент отбора проб) позволяет оценить ошибку выборочных измерений и выявить диапазон значений мутности, в котором опасно доверять единичным измерениям. Время не входит в явном виде в динамические ряды  $\Delta C[C_{(t)}]$ , по этой причине данные ряды можно интерпретировать как стационарные характеристики качества исходных вод исследуемых водозаборов.  $\Delta C[C_{(t)}]$  показывает компромисс воздействующих на концентрацию по мутности случайных факторов.

Для выявления связи содержания мутности с показателями качества (запах (при 20 и 60 °С), привкус, цветность, мутность, железо общее, окисляемость перманганатная, сухой остаток, жесткость общая, нефтепродукты, ПАВ, фенольный индекс, нитраты ( $\text{NO}_3^-$ ), хлориды ( $\text{Cl}^-$ ), фториды ( $\text{F}^-$ ), сульфаты ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), цинк ( $\text{Zn}^{2+}$ ), медь ( $\text{Cu}^{2+}$ ), водородный показатель) по каждой скважине нами проведен корреляционный анализ. Предварительно для визуальной оценки наличия связей и выбросов построены диаграммы рассеяния [13].

**Результаты и обсуждение.** По  $X$ -карте на 28 % скважин ИВ 1 и 18 % скважин ИВ 2 процесс формирования значений мутности нестабилен, а по  $R$ -карте – на 41 и 27 % скважин соответственно (рис. 1). Судя по  $X$ - $R$ -картам, на 23 % скважин ИВ 1 и 18 % скважин ИВ 2 формирование исследуемого показателя нестабильно как по средним значениям, так и по размахам. Зависимости стабильности процесса от географической близости между скважинами не выявлено [14].

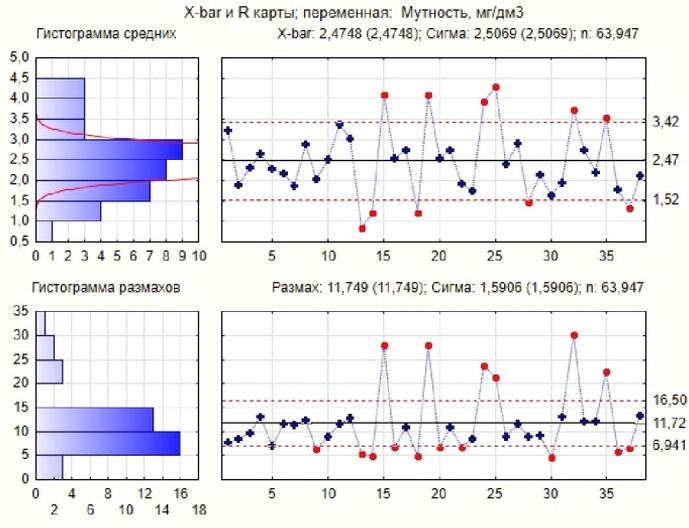
За 2001–2016 годы на ИВ 1 значения концентрации мутности в целом неоднородно (рис. 2). Отмечена нестабильность содержания исследуемого показателя со второго квартала 2001 года по четвертый квартал 2001 года, во втором квартале 2003 год, 2004 годов, втором и третьем кварталах 2005 года, четвертом квартале 2014 года, первом и третьем кварталах 2015 года. Большая часть показаний колеблется в пределах от 1 до 2,3 ПДК (ПДК равно  $1,5 \text{ мг/дм}^3$ )<sup>2</sup>. Результаты построения карт скользящих размахов (см. рис. 2) свидетельствуют о том, что процесс стабилен только по дисперсии, обладает значительной изменчивостью значений.

За 2004–2016 годы на ИВ 2 содержание мутности нестабильно в четвертом квартале 2004 года и во втором квартале 2005 года (см. рис. 2). На ИВ 2 точки на  $X$ -карте расположены преимущественно вдоль центральной

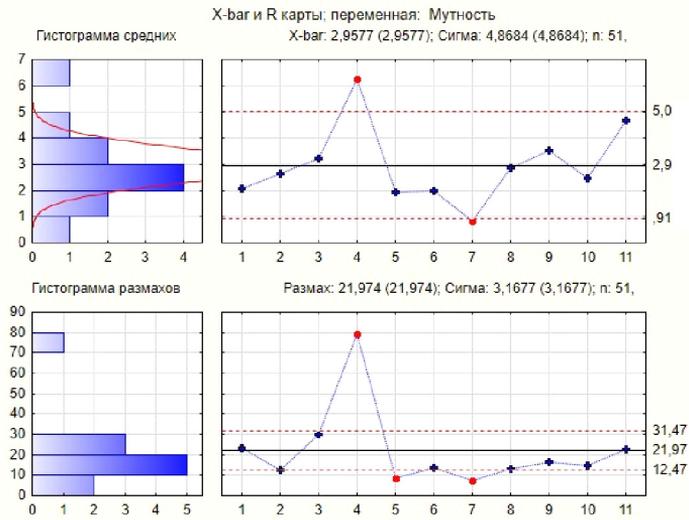
---

<sup>2</sup> Постановление об утверждении Санитарных норм и правил «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества» / Госстандарт. – Минск, 1999. – 48 с.

линии в диапазоне от 0 до 2,7 ПДК, в среднем составляя 2 ПДК. По  $X-MR$  ККШ на ИВ 2 с 2005 года все точки расположены в пределах контрольных границ, что свидетельствует о том, что концентрация мутности согласуется с требованиями статистического контроля по средним значениям и изменчивости [10].

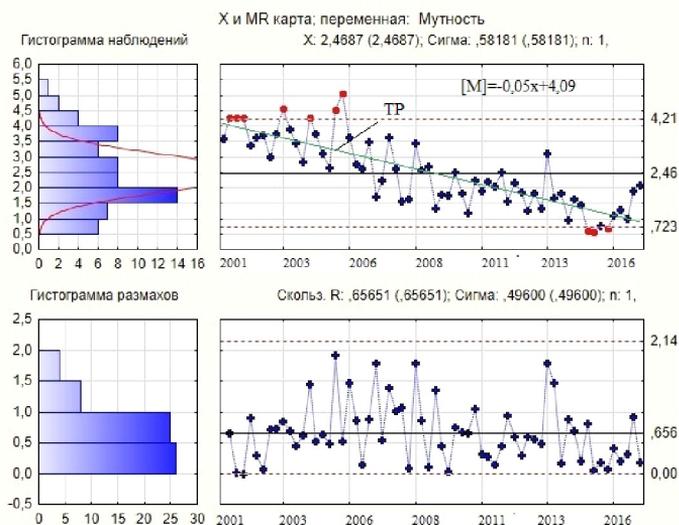


*a*

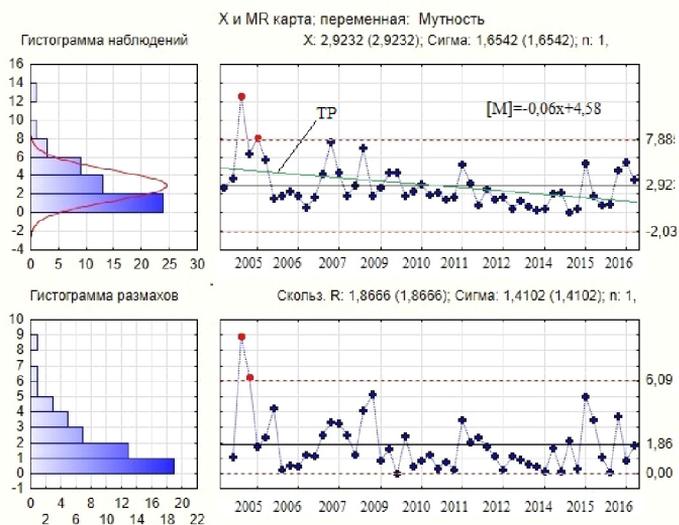


*б*

Рис. 1. Контрольные карты Шухарта ( $X-R$ -карты) на содержание мутности в скважинах ИВ 1 за 2001–2016 годы (*a*) и ИВ 2 за 2004–2016 годы (*б*)



*a*



*б*

Рис. 2. Контрольные карты Шухарта ( $X-MR$ -карты) на содержание мутности в исходных водах ИВ1 за 2001–2016 годы (*a*) и ИВ 2 за 2004–2016 годы (*б*).  $[M]$  – концентрация мутности,  $mg/dm^3$ ,  $x$  – номер измерения, ТР – линии тренда временных рядов

Поскольку на  $X$ -карте точки более центрированы относительно центральной оси и меньшее число точек на  $X-MR$  ККШ выходит за контрольные границы, процесс формирования значений исследуемого показателя на ИВ 2 более стабилен.

Среднее значение содержания мутности на ИВ 2 на 16 % больше, чем на ИВ 1 (2,94 мг/дм<sup>3</sup> для ИВ 2 и 2,47 мг/дм<sup>3</sup> для ИВ 1). Исходя из линий тренда (рис. 2), среднее значение концентрации мутности уменьшилось на 3,2 и 2,7 мг/дм<sup>3</sup> за 2001–2006 годы и 2004–2016 годы на ИВ 1 и ИВ 2 соответственно.

По графикам (рис. 3) линейный и полиномиальный тренды дают возможность сделать выводы о стабильности значений мутности. Исходя из изменений линий тренда, в случае наблюдения заметно большего содержания мутности относительно средних значений концентрация при последующем измерении наблюдается существенно меньше. Таким образом, система формирования концентрации по мутности в целом устойчива.

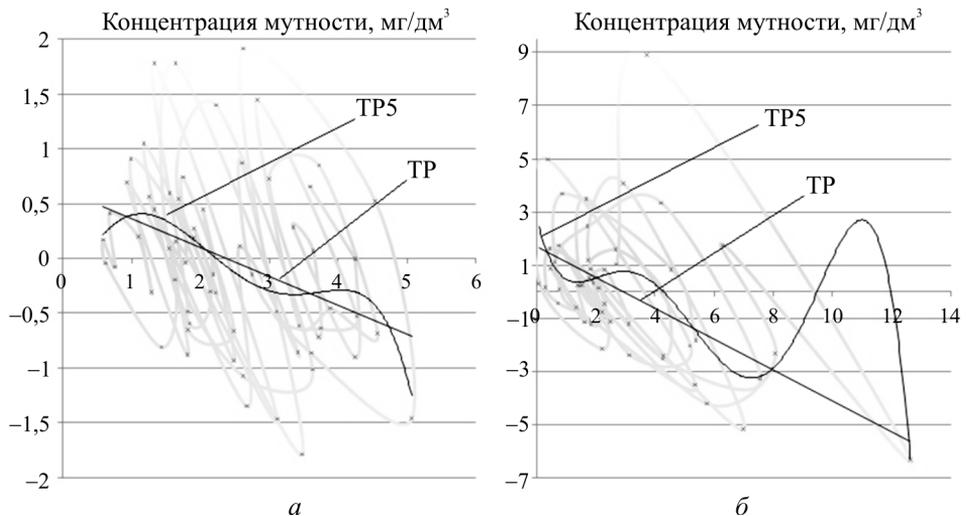


Рис. 3. Зависимость приращения содержания мутности  $C$  от  $\Delta C$  на содержание мутности в исходных водах ИВ1 за 2001–2016 годы (а) и ИВ 2 за 2004–2016 годы (б).

ТР, ТР5 – линейные и полиномиальные линии трендов временных рядов

Для выявления различий и общих закономерностей формирования качества скважинных вод по мутности проведено построение матриц парных корреляций между концентрацией мутности и показателями качества на каждой скважине (таблица). Предварительно для каждой связи были построены диаграммы рассеяния.

Полученные данные свидетельствуют о том, что 87,5 % коэффициентов корреляции (КК) на ИВ 1 и 85,4 % на ИВ 2 характеризуются слабой связью по шкале Чеддока [15] (значение КК 0,0–0,3); 9,4 % на ИВ 1 и 13,1 % на ИВ 2 характеризуются умеренной связью (значение КК 0,3–0,5); 2,4 % на ИВ 1 и 1 % на ИВ 2 характеризуются заметной связью (значение

КК 0,5–0,7); «высокая» связь (значение КК 0,7–0,9) отсутствует. На 5 скважинах ИВ 1 и одной скважине ИВ 2, отмечается «весьма высокая» связь (значение КК 0,9–1,0) между содержанием мутности и железом общим. Выявлено, что количество отрицательных и положительных КК на обоих водозаборах вполне сопоставимо (365 к 376 на ИВ 1 и 97 к 101 на ИВ 2).

Диапазон коэффициентов корреляции между мутностью  
и другими показателями качества воды

Показатели	Диапазон коэффициентов корреляции	
	ИВ 1	ИВ 2
Мутность/запах при 20 °С	-0,37÷0,29	-0,16÷0,36
Мутность/запах при 60 °С	-0,54÷0,23	-0,26÷0,32
Мутность/привкус	-0,41÷0,22	-0,19÷0,34
Мутность/цветность	-0,21÷0,62	-0,16÷0,56
Мутность/окисляемость перманганатная	-0,24÷0,38	-0,12÷0,37
Мутность/сухой остаток	-0,34÷0,66	-0,30÷0,21
Мутность/жесткость общая	-0,32÷0,37	-0,20÷0,26
Мутность/нефтепродукты	-0,25÷0,62	-0,29÷0,36
Мутность/ПАВ	-0,36÷0,43	-0,23÷0,14
Мутность/фенольный индекс	-0,26÷0,47	-0,18÷0,39
Мутность/нитраты (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	-0,40÷0,38	-0,24÷0,21
Мутность/железо общее	-0,44÷1,00	-0,24÷0,92
Мутность/хлориды	-0,35÷0,48	-0,31÷0,38
Мутность/фториды	-0,50÷0,46	-0,41÷0,32
Мутность/сульфаты	-0,31÷0,32	-0,35÷0,29
Мутность/цинк	-0,24÷0,46	-0,31÷0,31
Мутность/медь	-0,24÷0,66	-0,07÷0,41
Мутность/водородный показатель	-0,46÷0,44	-0,23÷0,43

**Заключение.** По  $X$ - $R$ -ККШ установлено, что на 23 % скважин ИВ 1 и 18 % скважин ИВ 2 значения мутности нестабильны. Эти результаты могут учитываться для обеспечения оптимальных значений рассматриваемого показателя при выборе рабочих скважин.

По результатам построения  $X$ - $MR$ -ККШ установлено, что процесс формирования значений исследуемого показателя в исходных водах несколько более стабилен на втором водозаборе. Так, на ИВ 2 нестабильно 15,6 % показаний, а на ИВ 1 – 5,9 %. Зависимостью содержания мутности от абсолютных значений выявлено, что формирование исследуемого показателя в исходных водах в целом стабильно на обоих ИВ. Таким образом, выявлено, что, несмотря на нестабильность формирования содержания мутности в подземных водах некоторых скважин, формирование в исходных водах стабильно на обоих ИВ. Вероятно, это связано со смещи-

ванием подземных вод, подаваемых с разных скважин. Несмотря на достаточно высокую концентрацию мутности в подземных водах, наблюдается тенденция к уменьшению значений исследуемого показателя. Возможной причиной этого может быть меньшая скорость фильтрации вод через грунт, связанная с долгосрочной эксплуатацией водозаборов.

Выявлено, что мутность с показателями качества подземных вод связана слабо (коэффициент корреляции 0,0–0,3) (87,5 % на ИВ 1 и 85,4 % на ИВ 2); 5 скважин ИВ 1 и одна скважина ИВ 2 характеризуется КК 0,9–1,0 между показателями мутности и общего железа. Вероятно, это связано с присутствием коллоидного железа в подземных водах скважин.

*Опубликовано в рамках научно-исследовательской работы № 5.12863.2018/8.9 «Разработка системы идентификации и количественного анализа экологических рисков, возникающих при водоснабжении крупной городской агломерации».*

#### Библиографический список

1. Статистический анализ данных экологического мониторинга родниковых вод урбанизированных территорий / М.И. Суслов, К.А. Булкина, А.Г. Бубнов, С.А. Буймова, Ю.В. Царев // Южно-сибирский научный вестник. – 2016. – № 3. – С. 15–19.
2. Жигалова А.В., Андреева В.А., Кантор Е.А. Сопоставление мутности воды реки Уфы в створах и резервуарах чистой воды городских водозаборов // Опыт прошлого – взгляд в будущее: материалы 6-й междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов. – Тула, 2016. – С. 42–45.
3. Об изменении мутности, цветности, перманганатной окисляемости и pH воды реки Уфы / А.В. Харабрин, С.В. Харабрин, Л.И. Кантор, Е.А. Кантор, М.С. Клявлин // Башкирский химический журнал. – 2003. – № 3. – С. 80–81.
4. Сопоставление показателей качества воды реки Уфа по мутности, цветности, окисляемости и pH в створах городских водозаборов / А.В. Харабрин, С.В. Харабрин, Л.И. Кантор, Е.А. Кантор, М.С. Клявлин // Башкирский химический журнал. – 2003. – № 3. – С. 82–83.
5. Муравьев А.Г. Руководство по определению показателей качества воды полевыми методами. – СПб.: Крисмас+, 2009. – 248 с.
6. Булдакова Т.В., Розенталь О.М., Шперт В.Л. Как повысить эффективность анализа качества воды // Методы оценки соответствия. – 2012. – № 3. – С. 16–20.
7. Уиллер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами: оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2016. – 410 с.
8. Деминг Э. Выход из кризиса. Новая парадигма управления людьми, системами и процессами. – М.: Альпина-бизнес, 2007. – 620 с.
9. Розенталь О.М., Серенькая Е.П. Визуальный контроль экологической безопасности на примере природных и сточных вод // Экология и промышленность России. – 2014. – № 5. – С. 50–55.
10. Миттаг Х.-Й., Ренни Х. Статистические методы обеспечения качества. – М.: Машиностроение, 1995. – 616 с.
11. Кондрагьева Т.А., Исмаилова Р.Н., Волостнова О.И. Выявление закономерностей пространственного распределения загрязнения поверхностных вод республики Татарстан с использованием методов многомерной статистики. Сообщение 2. Карты Шухарта // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 18. – С. 287–292.
12. Маслов Н.В., Мовчан Н.И., Трутнева В.А. Применение статистических методов при мониторинге содержания фенола в составе поверхностных вод озер экосистемы Кабан // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 6. – С. 179–184.

13. Бакуменко Л.П., Коротков П.А.. Статистический анализ влияния качества питьевой воды на здоровье населения региона // Прикладная эконометрика. – 2011. – № 2. – С. 32–47.
14. Макаров Д.В., Валева Э.Р., Вострова Р.Н., Кантор Е.А. Оценка эффективности очистки по железу общему подземных вод инфильтрационного водозабора юго-востока Беларуси // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 3. – С. 101–106.
15. Вашку П.Г., Пастер П.Л., Сторожук О.П. Теория статистики: учеб. пособие. – М.: Просвещение, 2001. – 320 с.

## References

1. Suslov M., Bulkina K., Bubnov A., Buymova S., Tsarev Y. Statisticheskij analiz dannyh ehkologicheskogo monitoringa rodnikovyh vod urbanizirovannyh territorij [Statistical analysis of data of environmental monitoring of spring water in urban areas]. *South-Siberian scientific bulletin*, 2016, no. 3, pp. 15-19.
2. Zhigalova A.V., Andreeva V.A., Kantor E.A. Sopostavlenie mutnosti vody reki Ufa v stvorah i rezervuarah chistoj vody gorodskih vodozaborov [Comparison of the turbidity of the water in the Ufa River in alignments and reservoirs of clean water in urban water intakes]. Materials of the 6th International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students: Past Experience – A Look into the Future. Vol. 2. Tula, Tula State University, 2016, pp. 42-45.
3. Kharabrin A.V., Kharabrin S.V., Kantor L.I., Kantor E.A., Klyavlin M.S. Ob izmenenii mutnosti, cvetnosti, permanganatnoj okislyaemosti i rN vody reki Ufy [About change of turbidity, color, permanganate oxidizability and pH of water of the river Ufa]. *Bashkirsky chemical journal*, 2003, no. 3, pp. 80-81.
4. Kharabrin A.V., Kharabrin S.V., Kantor L.I., Kantor E.A., Klyavlin M.S. Sopostavlenie pokazatelej kachestva vody reki Ufa po mutnosti, cvetnosti, okislyaemosti i pH v stvorah gorodskih vodozaborov [Comparison of water quality indicators of the Ufa River by turbidity, color, oxidizability and pH in urban water intake points]. *Bashkirsky Chemical Journal*, 2003, no. 3, pp. 82-83.
5. Muravyov A. G. Rukovodstvo po opredeleniyu pokazatelej kachestva vody polevymi metodami [Handbook for measuring the parameters of water quality by field methods]. Saint-Petersburg.: Christmas+, 2009, 248 p.
6. Buldakova T.V., Rosenthal O.M., Shpert V.L. Kak povysit' ehffektivnost' analiza kachestva vody [How to improve the efficiency of water quality analysis]. *Methods for assessing compliance*, 2012, no. 3, pp. 16-20.
7. Wheeler D., Chambers D. Statisticheskoe upravlenie processami: Optimizaciya biznesa s ispol'zovaniem kontrol'nyh kart Shuharta [Statistical Process Control: Optimizing Business Using Control Cards Shuharta]. Moscow. Alpina Biznes Buks, 2009, 410 p.
8. Deming E. Vyhod iz krizisa. Novaya paradigma upravleniya lyud'mi, sistemami i processami [The way out of the crisis. A New Paradigm for Managing People, Systems and Processes]. Moscow. Alpina Biznes Buks, 2007, 620 p.
9. Rosenthal O.M., Serenkaya E.P. Vizual'nyj kontrol' ehkologicheskoy bezopasnosti na primere prirodnyh i stochnyh vod [Visual control of ecological safety by the example of natural and waste water]. *Ecology and industry of Russia*, 2014, no. 5, pp. 50-55.
10. Mittag H.-J., Rennie H. Statisticheskie metody obespecheniya kachestva [Statistical methods of quality assurance]. Moscow. Machine-building, 1995, 616 p.
11. Kondratieva T.A., Ismailova R.N., Volostnova O.I. Vyyavlenie zakonomernostej prostranstvennogo raspredeleniya zagryazneniya poverhnostnyh vod respubliki Tatarstan s ispol'zovaniem metodov mnogomernoj statistiki. Soobshchenie 2. Karty Shuharta [Identification of regularities in spatial distribution of surface water pollution in the Republic of Tatarstan using multidimensional statistics methods. Communication 2. Maps of Shuhart]. *Bulletin of Kazan Technological University*, 2013, no. 18, pp. 287-292.
12. Maslov N., Movchan N.I., Trutneva V.A. Primenenie statisticheskikh metodov pri monitoringe sodержaniya fenola v sostave poverhnostnyh vod ozer ehkosistemy Kaban [Application of statistical methods in monitoring the phenol content in the surface waters of the lakes of the Kaban ecosystem]. *Bulletin of Kazan Technological University*, 2015, no. 6, pp. 179-184.
13. Bakumenko L.P., Kоротков P.A. Statisticheskij analiz vliyaniya kachestva pit'evoy vody na zdorov'e naseleniya regiona [Statistical analysis of the influence of drinking water quality on the health of the population of the region]. *Applied econometrics*, 2011, no. 2, pp. 32-47.
14. Makarov D.V., Valeeva E.R., Vostrova R.N., Kantor E.A. Ocenka ehffektivnosti ochistki po zhelezu obshchemu podzemnyh vod infil'tracionnogo vodozabора yugo-vostoka Belarusi [Monitoring and

assessment of well water quality in infiltration water intakes of the southeast of Belarus]. *Advances in current natural sciences*, 2018, no. 3, 101 p.

15. Vashku P.G., Paster P.L., Storozhuk O.P. *Teoriya statistiki: Uchebnoe posobie* [Theory of Statistics: Textbook]. Moscow. Enlightenment, 2001, 320 p.

Получено 11.02.2019

**D. Makarov, E. Kantor, R. Vostrova**

**APPLICATION OF STATISTICAL METHODS OF ANALYSIS  
FOR MONITORING OF THE CONTENT OF TURBIDITY OF SUPPLY WELLS'  
WATERS IN THE SOUTH-EASTERN REGION OF BELARUS**

In the article the stability of turbidity values of underground and source waters of two infiltration water intakes (IW) of the south-eastern region of the Republic of Belarus has been analyzed. To this end,  $X$ - $R$  Shuhart maps for underground waters and  $X$ - $MR$  Shuhart maps for source waters were built. In addition, the variability of the turbidity content in the source waters, from their absolute values have been studied. To determine the differences and general patterns of the formation of turbidity values in groundwater, matrices of pair correlations between the turbidity concentration and the values of 18 quality indicators for each well were constructed. It was established that 23% of IW-1 wells and 18% of IW-2 wells have unstable turbidity values. The instability of the turbidity values in some wells may be caused by the periodic presence of insoluble minerals in groundwater. Despite the instability of the turbidity values in the groundwater of some wells, the stability of the values in the source water of both IW was revealed. This may be due to mixing of groundwater supplied from different wells. A tendency to decrease the turbidity in the source waters at both water intakes was found. A possible reason for this may be a lower rate of water filtration through the soil, associated with the long-term operation of water intakes. By constructing matrices of paired correlations of turbidity values and 18 indicators of the quality of source water, it was established that 87.5% of the correlation coefficients at the first water intake and 85.4% of the correlation coefficients at the second water intake are characterized by a weak coupling. This may be due to the complexity of the chemical composition of groundwater.

**Keywords:** groundwater, water quality indicators, quality control maps, turbidity, environmental monitoring.

**Макаров Дмитрий Вадимович** (Уфа, Россия) – аспирант кафедры «Прикладная экология», Уфимский государственный нефтяной технический университет (450062, Уфа, ул. Космонавтов, 1, e-mail: dmitrij.makarov-1990@yandex.ru).

**Кантор Евгений Абрамович** (Уфа, Россия) – д-р хим. наук, профессор кафедры «Физика», Уфимский государственный нефтяной технический университет (450062, Уфа, ул. Космонавтов, 1, e-mail: evgkantor@mail.ru).

**Вострова Регина Николаевна** (Гомель, Беларусь) – канд. техн. наук, доцент кафедры «Экология и энергоэффективность в техносфере», Белорусский государственный университет транспорта (246653, Гомель, ул. Кирова, 34, e-mail: vostrova@tut.by).

**Makarov Dmitry** (Ufa, Russia) – Graduate Student, “Applied Ecology” Department, Ufa State Petroleum Technological University (450062, Ufa, Kosmonavtov st., 1, e-mail: dmitrij.makarov-1990@yandex.ru).

**Kantor Evgeny** (Ufa, Russia) – Ph.D. in Technical Science, Professor of the Department of Physics, Ufa State Petroleum Technological University (450062, Ufa, Kosmonavtov st., 1, e-mail: evgkantor@mail.ru).

**Vostrova Regina** (Gomel, Belarus) – Ph.D. in Technical Science, Associate Professor of the Department of Ecology and Energy Efficiency in the Technosphere, Belarusian State University of Transport (246653, Gomel, Kirova st., 34, e-mail: vostrova@tut.by).

# ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

## 1. Общие положения

1.1. Журнал «Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика» является периодическим печатным научно-техническим *рецензируемым* журналом. Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), свидетельство ПИ № ФС77-59186 от 03.09.2014 г. Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» – 45008. Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (письмо Департамента аттестации научных и научно-педагогических работников от 01.12.2015 г. № 13-6518).

1.2. Журнал представлен в ведущих библиотеках страны, в научной электронной библиотеке (НЭБ) – головном исполнителе проекта по созданию Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

1.3. Журнал выходит 4 раза в год (март, июнь, сентябрь, декабрь). Прием материалов в очередной выпуск заканчивается 1 февраля (выпуск № 1), 1 мая (выпуск № 2), 1 августа (выпуск № 3), 1 ноября (выпуск № 4).

1.4. Правила оформления и список необходимых документов приведены на сайте <http://vestnik.pstu.ru/urbanistic>.

## 2. Требования к предоставляемым материалам

2.1. К опубликованию в «Вестнике ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика» принимаются ранее не публиковавшиеся статьи, содержащие результаты исследований, практических внедрений и статьи обзорного характера, соответствующие тематике журнала.

Согласно Перечню рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук в «Вестнике ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика» публикуются статьи по следующим группам научных специальностей:

Отрасль науки	Группы научных специальностей/научные специальности и соответствующие им отрасли науки, по которым присуждаются ученые степени
05.00.00 ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ 05.23.00 Строительство и архитектура	05.23.01 Строительные конструкции, здания и сооружения 05.23.02 Основания и фундаменты, подземные сооружения 05.23.04 Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов 05.23.05 Строительные материалы и изделия 05.23.11 Проектирование и строительство дорог, мостов и транспортных тоннелей 05.23.19 Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства 05.23.22 Градостроительство

2.2. Рукописи статей объемом до 8–10 страниц (для обзоров – до 20 стр.), подготовленные в редакторе текста Word for Windows 7, направляются по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, ПНИПУ, редакция журнала «Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика». Электронный вариант статьи направляется на адрес (e-mail): [vestnik.urbanistics@gmail.com](mailto:vestnik.urbanistics@gmail.com).

2.3. В редколлегию журнала должны быть представлены:

**1. Текст статьи, оформленный согласно требованиям.**

**2. Сведения об авторе (авторах)** на русском и английском языках (ФИО полностью; место работы, учебы; адрес места работы, учебы; должность, ученое звание, ученая степень; контактные телефоны, адрес электронной почты).

**3. Рецензия** на статью, подписанная специалистом, имеющим ученую степень, не являющимся сотрудником организации (учреждения) – основного места работы авторов. Подпись рецензента должна быть заверена. Рецензия отправляется вместе с текстом статьи и письмом на имя главного редактора.

**4. Экспертное заключение** о возможности опубликования статьи, подтверждающее, что в материалах не содержатся сведения, запрещенные к опубликованию в открытой печати.

**Правила оформления текста статьи.**

**Индекс УДК** в соответствии с классификатором.

**Название статьи** на русском и английском языках. Шрифт – Times New Roman Cug, полужирный; размер символов – 14; подзаголовки (при наличии): шрифт – Times New Roman Cug, полужирный; размер символов – 12, межстрочный интервал – одинарный. Выравнивание – по центру.

**Аннотация** на русском и английском языке. Аннотация должна давать представление о содержании статьи, актуальности проблемы, используемых методах, новизне, результатах. Объем – 200 слов.

**Ключевые слова** (до 10 слов) на русском и английском языке.

**Текст.** Шрифт – Times New Roman Cug; размер символов – 12; межстрочный интервал – одинарный; выравнивание по ширине страницы; переносы желательны не использовать; все поля страницы – 2,5 см. Для набора формул использовать редактор Equation 2.0, параметры: шрифт – Times New Roman Cug; размер 12 (обычный); формулы размещать в центре, а их номера – у правого поля страницы. Тензорные и векторные величины набираются прямым полужирным шрифтом, греческие символы – прямым шрифтом, латинские скалярные величины и индексы – наклонным.

**Рисунки** – в формате jpeg, tiff, диаграммы – сохраненные в формате MS Excel. Подрисуночные надписи не должны выходить за границы самого рисунка. **Таблицы** помещаются внутри текста, в центре страницы. **Фотоматериалы** допускаются в хорошем качестве.

**Библиографический список.** К публикации не принимаются статьи без списка литературы. В список не рекомендуется вносить законодательные и нормативные документы. Оформление ссылок должно быть выполнено в соответствии с требованиями ГОСТ 7.0.5–2008. Цитируемая литература приводится в конце статьи согласно нумерации ссылок, не по алфавиту, ссылки на литературу в тексте даются в квадратных скобках. Рекомендуемое количество цитируемых источников литературы – 15, для обзорных статей допускается расширенный перечень литературы.

Вначале дается список литературы на русском языке, имеющиеся в нем зарубежные публикации – на языке оригинала, затем **References** (список литературы в романском алфавите, который является комбинацией транслитерированной части русскоязычной ссылки и англоязычным переводом названия (статьи, книги), перевод дается в квадратных скобках).

**Сведения об авторе (авторах):** ФИО (полностью). Место работы (учебы) – наименование организации в именительном падеже. Должность, ученая степень, ученое звание, иные почетные звания. Адрес места работы (учебы) с указанием индекса. Адрес электронной почты.

### 3. Рассмотрение материалов

3.1. Предоставленные в редколлегию материалы первоначально рассматриваются на предмет выполнения требований к оформлению по п. 2.3. Все статьи «Вестника ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика» подлежат обязательному рецензированию. Вторая рецензия обеспечивается членами редколлегии журнала или тематического выпуска. После рассмотрения материалов (согласования вопросов с автором) редколлегия сообщает автору решение об опубликовании работ или направляет автору мотивированный отказ.

3.2. Редакция кроме бумажного издания журнала организует формирование полнотекстовых электронных версий статей журнала, доступных на сайте журнала и сайте ПНИПУ.

Научное издание

ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

**ПРИКЛАДНАЯ ЭКОЛОГИЯ.  
УРБАНИСТИКА**

---

---

BULLETIN OF THE PERM NATIONAL  
RESEARCH POLYTECHNIC UNIVERSITY  
**APPLIED ECOLOGY.  
URBAN DEVELOPMENT**

№ 2 (34)

*Ответственность за содержание материалов, достоверность статистической информации, точность изложения фактов, оформление библиографического списка и References несут авторы статей*

Журнал представлен в ведущих библиотеках страны и является рецензируемым, также представлен в научной электронной библиотеке (НЭБ) – головном исполнителе проекта по созданию Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) и имеет импакт-фактор Российского индекса научного цитирования (ИФ РИНЦ).

В электронном виде журнал можно найти по адресу: <http://www.pstu.ru>

Редактор и корректор *Н.А. Панова*  
Корректор метаданных на английском языке *А.В. Цыбина*

---

Выход в свет 25.06.2019. Формат 70×100/16.  
Усл. печ. л. 10,48. Тираж 100 экз. Заказ № 84/2019.  
Свободная цена

---

Отпечатано в типографии Издательства  
Пермского национального исследовательского  
политехнического университета.  
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.  
Тел. (342) 219-80-33.