

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 628.31:66.081

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-105-117

А.А. ВОРОНОВ¹, С.В. МАКСИМОВА¹, Е.Ю. ОСИПОВА²,

¹Тюменский индустриальный университет,

²Томский государственный архитектурно-строительный университет

ОЧИСТКА ТАЛЫХ ВОД УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИТОСОРБЕНТОВ

Рассматривается проблема очистки талых вод, образующихся на территориях населенных пунктов. Для получения относительно недорогого сорбционного материала для извлечения из поверхностных сточных вод основных видов загрязнений предлагается использовать древесные отходы от опиловки городских насаждений.

Целью настоящей работы является исследование сорбционных свойств материала, полученного при обрезке городских деревьев. В работе проведено экспериментальное моделирование процесса сорбции растворенных нефтепродуктов и ионов меди из водного раствора на измельченных ветках тополя черного в статических условиях. Процесс сорбции изучался в соответствии с трехфакторным планом эксперимента. Лабораторное моделирование осуществлялось с целью определения оптимальных параметров очистки воды и степени взаимного влияния загрязнений на процесс сорбции. Природный материал, полученный из компонентов и отходов переработки тополей с городских территорий, проявил сорбционные свойства по отношению к нефтепродуктам и ионам меди в водной среде. Использование фильтров из измельченных веток городских насаждений в локальных очистных установках позволит решить сразу несколько задач коммунальных служб города: утилизацию отходов сезонной опиловки деревьев и эффективную очистку талого стока с низкими затратами на расходные фильтрующие материалы.

Ключевые слова: талые воды; фитосорбенты; сорбция; планирование эксперимента; уравнения регрессии.

Для цитирования: Воронов А.А., Максимова С.В., Осипова Е.Ю. Очистка талых вод урбанизированных территорий с использованием фитосорбентов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 105–117.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-105-117

A.A. VORONOV¹, S.V. MAKSIMOVA¹, E.Yu. OSIPOVA²,

¹Tyumen Industrial University,

²Tomsk State University of Architecture and Building

PURIFICATION OF MELT WATER WITH PLANT SORBENTS

The article deals with the problem of purification of melt water generated by the urbanized territories. It is proposed to use wood residue from sawing of plantings to obtain relatively inexpensive sorption material for the contamination extraction from surface wastewater. The aim of this work is to study the sorption properties of the material obtained by sawing of plantings. Experimental modeling of sorption of dissolved petroleum products and copper ions from an aqueous solution of milled branches of black poplar is carried out under static conditions. The sorption process is studied in accordance with a three-factor design experiment. Laboratory modeling determines the optimum parameters of water purification and the degree of mutual influence of contaminants on the sorption process. Natural material obtained from the poplar components shows the sorption properties in relation to oil products and copper ions in the water environment. The filters made of milled branches and used in local treatment plants will allow solving the problems of municipal services, namely utilization of wood residue from sawing of plantings and effective melt water purification due to the low-cost filtering materials.

Keywords: melt water, plant sorbents, sorption, design experiment, regression equation.

For citation: Voronov A.A., Maksimova S.V., Osipova E.Yu. Ochistka talykh vod urbanizirovannykh territorii s ispol'zovaniem fitosorbentov [Purification of urbanized melt water with plant sorbents]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 2. Pp. 105–117.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-105-117

Введение

Для городских дождевых и талых сточных вод характерна высокая степень неравномерности поступления в систему сбора и очистки. Качество и количество поверхностного стока существенно изменяются в зависимости от сезона и места формирования. Фактические значения концентраций загрязняющих веществ поверхностных сточных вод часто не соответствуют установленным в нормативной литературе примерным значениям. Это касается таких загрязняющих веществ, как нефтепродукты, хлориды и ионы тяжелых металлов [1].

Снежные полигоны, как накопители огромного количества городского снега, являются источниками талого поверхностного стока особого качества. В результате проведенного исследования в талых водах обнаружены весьма токсичные загрязнения, такие как свинец, медь, марганец, никель, цинк, железо и другие, содержание которых превышает установленные предельно допустимые концентрации (ПДК) в 1,2–12 раз. Эксплуатация подобных объектов приводит, как правило, к подтоплению прилегающих территорий. В результате миграции специфических загрязняющих веществ во внешнюю среду происходит деградация почв и водоемов. Рассматриваемые выше геоэкологические проблемы характерны для промышленных городов России, Европы и Азии [2].

Установлено, что концентрации загрязнений талого стока отдельных районов г. Тюмени существенно превышают нормативно допустимые значе-

ния, установленные для сброса в водный объект: по взвешенным веществам – в 1088 раз, ХПК – в 400 раз, нефтепродуктам – в 34 раза, хлоридам – в 26 раз и железу – в 805 раз [3, 4].

В Ханты-Мансийском автономном округе – Югре (ХМАО – Югре), на территории г. Нижневартовска, была проведена оценка экологического состояния городской среды. С помощью атомно-абсорбционной спектрофотометрии измерялось содержание тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd, Pb, Fe, Mn, Cr, Ni) в фильтрате талого снега и твердом остатке. В результате исследования было выявлено значительное увеличение (в 10–50 раз) содержания в твердой фракции ионов Mn, Ni, Fe, Zn по сравнению с фоновыми значениями [5].

Для территорий ХМАО – Югры, на которых ведется хозяйственная деятельность (добыча полезных ископаемых, производство сельскохозяйственной продукции), также характерно накопление снежными массами поллютантов. Изучение качественного состава снежных масс показало, что фоновые участки на нефтяных месторождениях характеризуются малой минерализацией (не более 50 мг/дм³) и невысоким содержанием твердых примесей (не более 20 мг/дм³). При этом концентрации нефтепродуктов в талых водах, образующихся на участках установки факелов сжигания попутного газа, возрастают в 2 раза. На участках нефтедобычи отчетливо выражен рост концентраций ряда тяжелых металлов (цинка, ртути, хрома и никеля), содержание которых может превышать нормы в 4–4,5 раза. На территории населенных пунктов наиболее велико загрязнение ртутью и нефтепродуктами [6].

Исследования, проведенные с 1996 по 2015 г. в Тверской области, показали, что в составе снежного покрова земель сельскохозяйственного значения обнаружены повышенные концентрации нитратов, хлоридов, сульфатов, а также наличие ионов свинца, кадмия, меди и других металлов. С целью предупреждения коррозии плодородных слоёв почвы талый снег должен подвергаться качественной очистке [7].

Современная проблема сбора и качественной очистки талого поверхностного стока характерна для территорий крупных городов, промышленных предприятий и сельскохозяйственных объектов. Применяемые технологические схемы очистки поверхностных сточных вод не учитывают в полной мере изменения количества и качества поверхностных сточных вод, связанных с увеличением доли водонепроницаемых покрытий селитебных зон и появлением новых видов техногенных загрязнений. Отсутствие данных по сезонному изменению специфических показателей качества воды усложняет выбор эффективных методов, сооружений и оборудования для локальных очистных станций (ЛОС) [3, 4].

В настоящее время на традиционных ЛОС применяются следующие методы очистки поверхностного стока: грубая первичная механическая очистка, отстаивание или флотация, доочистка от остаточных примесей с помощью фильтрования, ультрафиолетовое обеззараживание перед сбросом в водоем. Дополнительно могут использоваться реагенты с целью удаления специфических загрязнений, например ионов металлов и солей [8]. На стадии доочистки стоков сорбционные методы являются наиболее приемлемыми, легко поддаются автоматизации и не требуют больших эксплуатационных затрат [3].

В настоящее время активно ведется поиск эффективного, но относительно дешевого сорбционного материала для извлечения различных загрязнений из сточных вод. Интересны новые сорбционные материалы, полученные на основе природных материалов и отходов различных производств [9–15].

Для извлечения нефти и нефтепродуктов из сточных вод разработана полная классификация, в которую входят сорбенты на основе природных материалов и отходов производства. Классификация позволяет сделать комплексный анализ сорбционных материалов и выбрать наиболее оптимальный вариант для определенного состава стоков [10].

Большой интерес вызывают некоторые виды фитосорбентов, которые являются также отходами деревообрабатывающего производства и могут использоваться как сорбенты нефтепродуктов в технологиях очистки сточных вод. Интенсивно изучается сорбционная способность древесной стружки и опилок, отходов растениеводства, образующихся в процессе деятельности лесных и сельскохозяйственных предприятий в больших количествах. Данные материалы обладают всеми необходимыми свойствами для очистки воды, у них пористая структура, низкая плавучесть, высокая гидрофильность [11].

Опилки хорошо и быстро впитывают как нефть и нефтепродукты, так и влагу, но для повышения сорбционной активности необходимо предусматривать дополнительную модификацию их поверхности [12, 13]. Для этого можно использовать растворы кислот, щелочей с дальнейшей термообработкой в сушильном шкафу при различных температурах [14].

Например, предложен способ получения биоугольных материалов путем обработки коры осины и лиственницы 40%-м раствором формальдегида и последующей термической активацией модифицированной коры при температуре 350–900 °С. Полученный сорбент способен извлекать ионы меди из воды [15].

Доказано, что природные и модифицированные гидрозолы монтмориллонита способны извлекать ионы меди и никеля из водных растворов. В лабораторных условиях получены основные характеристики адсорбции ионов меди и никеля на монтмориллоните. Предложены оптимальные условия сорбционного извлечения ионов тяжелых металлов из водных растворов на природных и модифицированных монтмориллонитах [16].

Разработан и экспериментально проверен способ получения гранулированного сорбента для очистки сточных вод от ионов меди и цинка. В состав сорбента входит отход водоподготовки – железистый шлам, жидкое стекло, оксид кальция и вода. Степень извлечения ионов цинка составила 53,5 %, меди – 44,0 %. Внедрение данного сорбента в широкое производство позволит одновременно утилизировать отходы водоподготовки и обеспечить эффективными дешевыми сорбентами сооружения для очистки сточных вод [17].

Существует проблема утилизации большого количества древесных отходов от опилки городских насаждений. Это связано с весьма существенными затратами на сбор, измельчение, вывоз и хранение данного материала на свалках ТБО. Предлагается несколько вариантов вторичного использования измельченных веток, которые позволят покрыть вышеперечисленные расходы [18].

В видовом составе древесной растительности, используемой для озеленения населенных мест, преобладают лиственные породы [19]. Среди древесных растений, используемых для создания искусственных насаждений г. Томска, наиболее часто встречаются береза, клен, тополь, яблоня [20].

Материалы, полученные из компонентов и отходов переработки лиственных деревьев, произрастающих в средней полосе России, обладают сорбционными свойствами по отношению к различным поллютантам (ионам тяжелых металлов, нефтепродуктам, красителям), растворенным в водной среде [21]. Так, автогидролиз бересты березы с последующей гидрофобизацией позволил увеличить нефтеемкость образцов сорбционного материала до 6,2–8,7 г/г [22]. Эффективность удаления ионов Cu^{2+} из водного раствора с исходной концентрацией 25 мг/дм³ сорбционным материалом из кленовых опилок с дозами сорбента 0,5–10 г/дм³ составила 61,75–82,27 % соответственно [23]. Применение опилок тополя для извлечения из водного раствора ионов Cu^{2+} с исходной концентрацией 0,2 г/дм³ в статических условиях позволило добиться эффекта очистки 80 % [24]. Данный вид отхода является природным материалом, который может быть рассмотрен в качестве сорбента на стадии доочистки ЛОС стока.

В выполненном исследовании проведено экспериментальное моделирование процесса сорбции растворенных нефтепродуктов и ионов меди из водного раствора на измельченных ветках тополя черного (*Populus nigra*) в статических условиях. Выбор материала связан с тем, что различные виды рода тополь (*Populus*) достаточно часто используются в озеленении населенных пунктов в России и за рубежом [19, 25, 26].

Цель исследования заключается в определении условий очистки поверхностного талого стока, поступающего с урбанизированной территории, с использованием природных фитосорбентов. Загрузка фильтров из измельченных веток городских насаждений (деревьев и кустов) в локальных очистных установках позволит решить сразу несколько задач коммунальных служб города: утилизации отходов сезонной опиловки деревьев и эффективной очистки талого стока с низкими затратами на расходные фильтрующие материалы.

Материалы и методы исследования

В качестве фитосорбента были использованы измельченные ветки тополя, полученные во время зимней обрезки зеленых насаждений города. Перед помещением в модельный раствор измельченные ветки были высушены в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре 105 °С и просеяны через сито с размером ячеек 2 мм. Мелкие опилки обладают лучшей сорбционной способностью, чем крупные, из-за увеличения площади поверхности [13].

Процесс сорбции изучался на водных растворах нефтепродуктов и меди с концентрациями соответственно: 2 и 0,5, 6 и 1, 10 и 1,5 мг/дм³. Для приготовления модельного водного раствора использовались: дистиллированная вода, медный купорос $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, масло для воздушных компрессоров Mobil Rarus SHC 1025.

Сорбция изучалась в статических условиях: обрабатываемая вода (100 см³) интенсивно перемешивалась с сорбентом (5 г), затем сорбент отделялся от воды в результате отстаивания. Концентрации нефтепродуктов и меди фиксировались в рабочих растворах в периоды 24, 48 и 72 ч.

Измерение массовой концентрации растворенных нефтепродуктов в водных растворах осуществлялось флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02-3М», основанным на экстракции гексаном нефтепродуктов из пробы воды и измерении интенсивности флуоресценции полученного экстракта на анализаторе жидкости с последующим автоматическим вычислением концентрации.

Концентрация меди в водных растворах определялась объемным методом – титрованием. Определение тяжелых металлов основано на взаимодействии ионов, находящихся в анализируемом растворе, с трилоном Б в присутствии аммиачной буферной смеси (рН~10). В 30 мл исходного водного раствора меди добавляли 5 мл аммиачного буферного раствора и металлоиндикатор (мурексид). Титрование производили 0,05 н.р. трилона Б до смены окраски раствора. По показаниям бюретки определялся объем раствора трилона Б, пошедшего на титрование.

Лабораторные опыты проводились в соответствии с трехфакторным планом. Статистические методы планирования эксперимента достаточно широко используются при моделировании процессов очистки воды [27].

Результаты исследований

В данной работе рассматривается процесс сорбции растворенных нефтепродуктов и ионов меди на измельченных ветках в статических условиях. Лабораторное моделирование осуществлялось с целью определения оптимальных параметров очистки воды и степени взаимного влияния загрязнений на процесс сорбции. В процессе эксперимента проведены две серии опытов согласно трехфакторному плану для определения сорбционной емкости фитосорбента по нефтепродуктам и по ионам меди [28]. В качестве входных изменяемых параметров были приняты следующие: X_1 – концентрация рабочего раствора нефтепродуктов (от 2 до 10 мг/дм³); X_2 – концентрация рабочего раствора ионов меди (от 0,5 до 1,5 мг/дм³); X_3 – продолжительность контакта раствора с фитосорбентом (от 24 до 72 ч).

Варьирование входных параметров проведено в трех уровнях (значения –1, 0, +1). Основной уровень, интервалы варьирования и границы области исследования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Интервалы варьирования факторов

Факторы	Наименование, обозначение	Интервалы варьирования (кодировка)		
		+1	0	–1
X_1	Концентрация нефтепродуктов в исходном растворе, мг/дм ³ ($C_{нп\text{исх}}$)	10	6	2
X_2	Концентрация ионов меди в исходном растворе, мг/дм ³ ($C_{м\text{исх}}$)	1,5	1,0	0,5
X_3	Продолжительность контакта раствора с фитосорбентом, ч (T)	72	48	24

В качестве выходного параметра $Y01$ ($C_{нп_вых}$, мг/дм³) принята остаточная концентрация нефтепродуктов после сорбции на измельченных ветках, которая характеризует эффективность очистки воды от нефтепродуктов. В качестве выходного параметра $Y02$ ($C_{м_вых}$, мг/дм³) принята остаточная концентрация ионов меди после сорбции на измельченных ветках, которая характеризует эффективность очистки воды от ионов металла. В середине эксперимента опыты проводились в трех параллелях с целью определения средних значений и погрешностей измерений.

Результаты опытов обрабатывались методами математической статистики [27, 28]. Матрица планирования и результаты эксперимента, а именно остаточные концентрации нефтепродуктов и ионов меди после сорбции, сведены в табл. 2.

Таблица 2

Трехфакторный план эксперимента и результаты моделирования

№ опыта	X_1	X_2	X_3	$C_{нп_исх}$, мг/дм ³	$C_{м_вых}$, мг/дм ³	T , ч	$Y01$	$Y02$
1	-1	-1	-1	2	0,5	24	1,345	0,474
2	+1	-1	-1	10	0,5	24	3,81	0,49
3	-1	+1	-1	2	1,5	24	1,815	1,158
4	+1	+1	-1	10	1,5	24	3,48	0,88
5	-1	-1	+1	2	0,5	72	1,255	0,386
6	+1	-1	+1	10	0,5	72	5,47	0,5
7	-1	+1	+1	2	1,5	72	1,43	0,794
8	+1	+1	+1	10	1,5	72	4,35	1,202
9	0	0	0	6	1	48	2,422	0,632

На основании полученных данных рассчитаны погрешности измерений и получены коэффициенты регрессии для двух модельных уравнений первого порядка (1). Определена значимость коэффициентов регрессии, проверено соответствие критериям Стьюдента и Фишера, с учетом которых кодированные уравнения (2) и (3) адекватно описывают процессы сорбции нефтепродуктов и ионов меди из охлажденных водных растворов.

Уравнение регрессии первого порядка, описывающее процессы сорбции загрязнений на измельченных ветках тополя, имеет общий вид

$$Y0 = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{23}X_2X_3 + a_{13}X_1X_3 + a_{123}X_1X_2X_3. \quad (1)$$

Уравнение с рассчитанными в программном продукте Excel коэффициентами регрессии, описывающими процесс сорбции нефтепродуктов на измельченных ветках:

$$Y01 = 2,820 + 1,408X_1 - 0,1X_2 + 0,257X_3 - 0,262X_1X_2 - 0,135X_2X_3 + 0,375X_1X_3 - 0,062X_1X_2X_3. \quad (2)$$

На основании полученного уравнения (2) был проведен графический анализ влияния факторов X_1 , X_2 и X_3 на сорбцию растворенных нефтепродуктов (рис. 1).

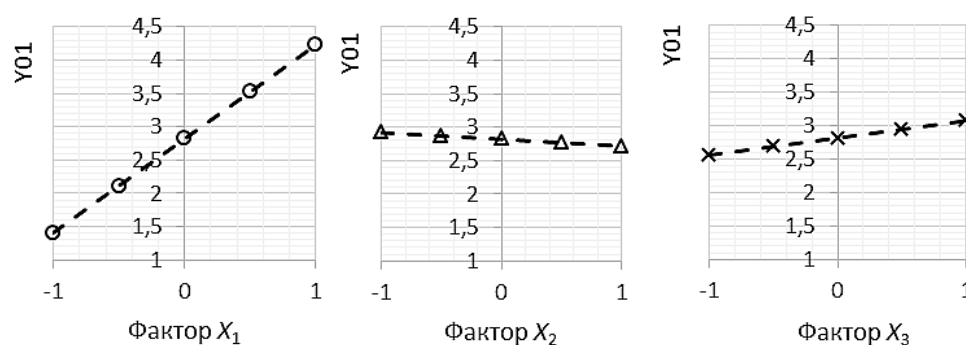


Рис. 1. Анализ влияния факторов X_1 , X_2 и X_3 на сорбцию нефтепродуктов из водных растворов

Наиболее влияющей на сорбцию является исходная концентрация нефтепродуктов в воде (фактор X_1). Наблюдается прямо пропорциональная зависимость: чем больше исходная концентрация загрязнения, тем больше остаточная концентрация нефтепродуктов в пробе. Это подтверждает тот факт, что исследуемый фитосорбент имеет предельное нефтепоглощение, после достижения которого материал практически перестает сорбировать загрязнения из воды. В этот момент достигается предельная сорбционная емкость.

Фактор X_2 (исходная концентрация ионов меди) практически не оказывает влияния на сорбционные свойства по нефтепродуктам (изменение результата в пределах погрешности измерения 6–7 %).

Фактор X_3 (продолжительность контакта модельного раствора с сорбентом) оказывает незначительное влияние на сорбционные свойства древесной крошки по нефтепродуктам, которое происходит за счет некоторого выделения части нефтепродуктов обратно в воду в результате длительного контакта: наблюдалось повышение остаточной концентрации на 15 % после контакта в течение 72 ч. Чтобы выход сорбированных нефтепродуктов в статических условиях не превышал 10 %, необходимо продолжительность контакта сократить до 48 ч.

Уравнение регрессии первого порядка с учетом только значимых коэффициентов, описывающее процесс сорбции ионов меди на измельченных ветках, имеет вид

$$Y02 = 0,724 + 0,033X_1 + 0,273X_2 - 0,015X_3 + 0,098X_2X_3 + 0,074X_1X_2X_3. \quad (3)$$

Полученное уравнение (3) позволило провести графический анализ влияния факторов X_1 , X_2 и X_3 на сорбцию ионов меди (рис. 2).

Наиболее влияющей на сорбцию ионов меди является исходная концентрация меди в воде (фактор X_2). Наблюдается прямо пропорциональная зависимость: чем больше исходная концентрация загрязнения, тем больше остаточная концентрация ионов меди в воде. Это объясняется тем, что после достижения предельной сорбционной емкости материал перестает сорбировать загрязнения из пробы модельного раствора.

Фактор X_1 (исходная концентрация нефтепродуктов) практически не оказывает влияния на сорбционные свойства по ионам меди (изменение результата в пределах погрешности измерения 8–9 %).

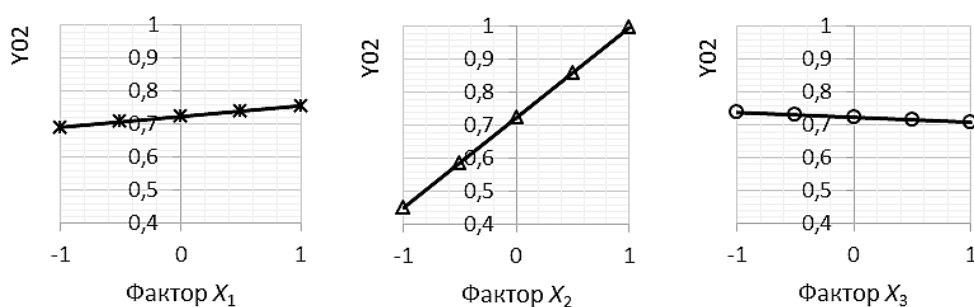


Рис. 2. Анализ влияния факторов X_1 , X_2 и X_3 на сорбцию ионов меди из водных растворов

Фактор X_3 (продолжительность контакта модельного раствора с сорбентом) также не оказывает влияния на сорбционные свойства исследуемого материала по ионам (отклонение от нулевого значения не превышает 4–5 %). Это говорит о том, что сорбционные центры сорбента более прочно удерживают ионы меди, чем нефтепродукты, которые в большей степени выделяются обратно в пробу после длительного контакта (остаточная концентрация возрастает на 15 %).

При изучении полученных модельных уравнений выяснилось, что значение сорбционной емкости для используемого фитосорбента по отношению к нефтепродуктам составило 0,17 мг/г; значение сорбционной емкости по ионам меди – 0,01 мг/г.

Заключение

Природный материал, полученный из компонентов и отходов переработки лиственных деревьев (тополей) с урбанизированных территорий, проявил сорбционные свойства по отношению к нефтепродуктам и ионам меди в водной среде.

В результате проведенных исследований определены значения сорбционной емкости: 0,17 мг/г (по нефтепродуктам) и 0,007 мг/г (по ионам меди Cu^{+2}). Оптимальные условия протекания процесса сорбции в статических условиях: время контакта – не более 48 ч (в этом случае обратный выход загрязнения в воду не превышает 10 %), исходные концентрации по нефтепродуктам – 2–10 мг/дм³, по ионам меди – 0,5–1,5 мг/дм³.

Взаимное влияние концентрации нефтепродуктов и ионов меди на процесс сорбции практически отсутствует. Медь занимает более прочное положение внутри фитосорбента и практически не выходит в раствор при длительном контакте.

Таким образом, образующийся талый сток вполне может очищаться с использованием природных измельченных веток городских насаждений (деревьев и кустов) в локальных очистных установках. Этот способ позволит решить проблему сокращения объемов и утилизации отходов сезонной опилочки деревьев. При этом становится возможным внедрить эффективную и малозатратную очистку поверхностных сточных вод.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Vialkova E., Zemlyanova M., Vorotnikova A., Cherkashin D., Voronov A., Maksimov L. The protection of urban areas from surface wastewater pollution // MATEC Web of Conferences. 2017. V. 106. 07008. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201710607008>
2. Лобкина В., Михалев М. Оценка опыта эксплуатации снежных полигонов в России, альтернативные способы борьбы со снегом // Экология и промышленность России. 2019. № 23 (1). С. 60–65. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-1-60-65>
3. Vialkova E., Maksimova S., Malyshkina E., Voronov A., Zemlyanova M., Maksimov L. Conceptual approach to the creation of “smart” sewerage system for city surface runoff // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 365. 022001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/2/022001>
4. Воронов А.А., Малышкина Е.С., Вялкова Е.И., Максимова С.В. Совершенствование рациональных городских инженерных систем очистки поверхностных сточных вод // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8. № 3. С. 43–50. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2018.03.10>
5. Пожитков Р.Ю., Московченко Д.В., Кудрявцев А.А. Геохимия снежного покрова г. Нижневартовска // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2018. Т. 4. № 1. С. 6–24.
6. Московченко Д.В., Бабушкин А.Г. Особенности формирования химического состава снеговых вод на территории Ханты-Мансийского автономного округа // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 1. С. 71–81.
7. Бабкина А.А., Зубкова В.М., Белозубова Н.Ю., Горбунова В.А. Анализ загрязненности снежного покрова в условиях антропогенной нагрузки // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2016. № 4. С. 78–87. DOI: 10.18384/2310-7189-2016-4-78-87
8. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов: ИТС 10-2019. Москва : БюроНДТ, 2019. 434 с.
9. Pimneva L., Malyshkina E., Salnikova E. Regularities of Sorption of Cations of Zinc and Copper by Natural Sorbent // Procedia Engineering. 2016. 165. P. 853–859.
10. Малышкина Е.С. Классификация сорбентов, используемых в технологиях очистки сточных вод от нефтепродуктов // Градостроительство и архитектура. 2020. Т.10. № 3. С. 26–34. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2020.03.5>
11. Малышкина Е.С., Вялкова Е.И., Осипова Е.Ю. Использование природных сорбентов в процессе очистки воды от нефтепродуктов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 1. С. 188–200. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2019-21-1-188-200>
12. Ikenyiri P.N., Ukpaka C.P. Overview on the Effect of Particle Size on the Performance of Wood Based Adsorbent // Journal of Chemical Engineering & Process Technology. 2016. V. 7. 315. DOI: 10.4172/2157-7048.1000315
13. Ismail A.S. Preparation and evaluation of fatty sawdust as a natural biopolymer for oil spill sorption // Chemistry Journal. 2015. V. 5. No. 5. Pp. 80–85.
14. Rafeah Wahi, Luqman Abdullah Chuah, Thomas Shean Yaw Choong, Zainab Ngaini, Mohsen Mobarekeh Nourouzi. Oil removal from aqueous state by natural fibrous sorbent: An overview // Separation and Purification Technology. 2013. 113. P. 51–63.
15. Микова Н.М., Скворцова Г.П., Мазурова Е.В., Чесноков Н.В. Влияние сшивающего эффекта на свойства сорбентов, получаемых из коры осины и лиственницы // Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92. Вып. 10. С. 1333–1343. DOI: 10.1134/S0044461819100128
16. Свиридов А.В., Юрченко В.В., Свиридов В.В., Ганебных Е.В. Сорбция катионов меди и никеля на слоистых алюмосиликатах // Сорбционные и хроматографические процессы. 2016. Т. 16. № 1. С. 78–86.
17. Лукашевич О.Д., Усова Н.Т. Сорбент из железистого шлама для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 1. С. 148–159. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-20-1-148-159>

18. Шаталов П.В., Подкопаева А.Л. Инновационный подход к утилизации древесных отходов при опилковке городских насаждений в г. Воронеже // Инновации, технологии и бизнес. 2020. № 1 (7). С. 102–108.
19. Горяева Е.В., Мохирев А.П. Инвентаризация зеленых насаждений с использованием ГИС-технологий на примере города Лесосибирска // Лесной журнал. 2015. № 2. С. 80–89.
20. Куклина Т.Э., Мерзлякова И.Е. Ассортимент древесных растений, используемых в озеленении г. Томска // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2013. № 4 (24). С. 47–66. doi: 10.17223/19988591/24/4
21. Денисова Т.Р., Шайхиев И.Г. Использование компонентов лиственных деревьев средней полосы России в качестве сорбционных материалов для удаления поллютантов из водных сред. Обзор литературы // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 24. С. 145–158.
22. Венприкова Е.В., Терещенко Е.А., Чесноков Н.В., Кузнецов Б.Н. Использование бересты коры березы для получения сорбционных материалов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2012. Т. 5. № 2. С. 178–188.
23. Rahman M.S., Islam M.R. Effects of pH on Isotherms Modeling for Cu (II) Ions Adsorption Using Maple Wood Sawdust // Chemical Engineering Journal. 2009. V. 149. P. 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.11.029>
24. Stankovic V., Bozic D., Gorgievski M., Bogdanovic G. Heavy metal ions adsorption from mine water by sawdust // Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly. 2009. V. 15. I. 4. P. 237–249. DOI:10.2298/CICEQ0904237S
25. Бессчетнов П.В., Бессчетнова Н.Н. Корреляция параметров листового аппарата тополей в условиях городских посадок // Вестник Казанского ГАУ. 2018. № 1 (48). С. 5–10. DOI 10.12737/article_5afafe02978e82.68901305
26. Cooke J.E.K., Rood S.B. Trees of the people: the growing science of poplars in Canada and worldwide // Canadian Journal of Botany. 2007. V. 85. P. 1103–1110. DOI: 10.1139/B07-125
27. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. Москва : Высшая школа, 1985. 327 с.
28. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. Москва : Финансы и статистика, 1981. 263 с.

REFERENCES

1. Vialkova E., Zemlyanova M., Vorotnikova A., Cherkashin D., Voronov A., Maksimov L. The protection of urban areas from surface wastewater pollution. *MATEC Web of Conferences*. 2017. V. 106. 07008. DOI: 10.1051/mateconf/201710607008
2. Lobkina V., Mikhalev M. Otsenka opyta ekspluatatsii snezhnykh poligonov v Rossii, al'ternativnye sposoby bor'by so snegom [Assessment of operating experience of snow polygons in Russia, alternative ways of dealing with snow]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2019. No. 23 (1). Pp. 60–65. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-1-60-65 (rus)
3. Vialkova E., Maksimova S., Malyshkina E., Voronov A., Zemlyanova M., Maksimov L. Conceptual approach to the creation of “smart” sewerage system for city surface runoff. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. V. 365. 022001. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022001
4. Voronov A.A., Malyshkina E.S., Vialkova E.I., Maksimova S.V. Sovershenstvovanie ratsional'nykh gorodskikh inzhenernykh sistem ochistki poverkhnostnykh stochnykh vod [Urban engineering systems for surface wastewater treatment]. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura*. 2018. V. 8. No. 3. Pp. 43–50. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.03.10 (rus)
5. Pozhitkov R.Yu., Moskovchenko D.V., Kudryavtsev A.A. Geokhimiya snezhnogo pokrova g. Nizhnevartovska [Geochemistry of snow cover in Nizhnevartovsk]. *Ekologiya i prirodopol'zovanie*. 2018. V. 4. No. 1. Pp. 6–24. (rus)
6. Moskovchenko D.V., Babushkin A.G. Osobennosti formirovaniya khimicheskogo sostava snegovykh vod na territorii Khanty-Mansiiskogo avtonomnogo okruga [Chemical composition of snow waters (the Khanty-Mansi case studies)]. *Kriosfera Zemli*. 2012. V. 15. No. 1. Pp. 71–81. (rus)
7. Babkina A.A., Zubkova V.M., Belozubova N.Yu., Gorbunova V.A. Analiz zagryaznennosti snezhnogo pokrova v usloviyakh antropogennoi nagruzki [Analysis of snow cover pollution

- under anthropogenic conditions]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*. 2016. No. 4. Pp. 78–87. DOI: 10.18384/2310-7189-2016-4-78-87 (rus)
8. Ochistka stochnykh vod s ispol'zovaniem tsentralizovannykh sistem vodootvedeniya poselenii, gorodskikh okrugov [Wastewater treatment in centralized sewerage systems of settlements, urban districts]. Moscow: ByuroNDT, 2019. 434 p. (rus)
 9. Pimneva L., Malyshkina E., Salnikova E. Regularities of sorption of cations of zinc and copper by natural sorbent. *Procedia Engineering*. 2016. 165. Pp. 853–859.
 10. Malyshkina E.S. Klassifikatsiya sorbentov, ispol'zuemykh v tekhnologiyakh ochistki stochnykh vod ot nefteproduktov [Classification of sorbents used in waste water purification from petroleum products]. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura*. 2020. V. 10. No. 3. Pp. 26–34. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.03.5 (rus)
 11. Malyshkina E.S., Vyalkova E.I., Osipova E.Yu. Ispol'zovanie prirodnnykh sorbentov v protsesse ochistki vody ot nefteproduktov [Water purification with natural sorbents]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019. V. 21. No. 1. Pp. 188–200. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-1-188-200 (rus)
 12. Ikenyiri P.N., Ukpaka C.P. Overview on the effect of particle size on the performance of wood based adsorbent. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*. 2016. V. 7. 315. DOI: 10.4172/2157-7048.1000315.
 13. Ismail A.S. Preparation and evaluation of fatty sawdust as a natural biopolymer for oil spill sorption. *Chemistry Journal*. 2015. V. 5. No. 5. Pp. 80–85.
 14. Rafeah Wahi, Luqman Abdullah Chuah, Thomas Shean Yaw Choong, Zainab Ngaini, Mohsen Mobarekeh Nourouzi. Oil removal from aqueous state by natural fibrous sorbent: An overview. *Separation and Purification Technology*. 2013. V. 113. Pp. 51–63.
 15. Mikova N.M., Skvortsova G.P., Mazurova E.V., Chesnokov N.V. Vliyanie sshivayushchego effekta na svoystva sorbentov, poluchaemykh iz kory osiny i listvennitsy [Cross-linking effect on sorbent properties obtained from bark of aspen and larch]. *Zhurnal prikladnoi khimii*. 2019. V. 92. No. 10. Pp. 1333–1343. DOI: 10.1134/S0044461819100128 (rus)
 16. Sviridov A.V., Yurchenko V.V., Sviridov V.V., Ganebnykh E.V. Sorbtsiya kationov medi i nikelya na sloistykh alyumosilikatakh [Sorption of copper and nickel cations in layered aluminum silicates]. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2016. V. 16. No. 1. Pp. 78–86. (rus)
 17. Lukashevich O.D., Usova N.T. Sorbent iz zhelezistogo shlama dlya ochistki stochnykh vod ot ionov tyazhelykh metallov [Iron sludge sorbing agent for sewage purification from heavy metal ions]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2018. V. 20. No. 1. Pp. 148–159. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-1-148-159 (rus)
 18. Shatalov P.V., Podkopaeva A.L. Innovatsionnyi podkhod k utilizatsii drevesnykh otkhodov pri opilovke gorodskikh nasazhdenii v g. Voronezhe [Innovative approach to wood waste disposal in sawing of urban plantations in Voronezh]. *Innovatsii, tekhnologii i biznes*. 2020. No. 1 (7). Pp. 102–108. (rus)
 19. Goryaeva E.V., Mokhirev A.P. Inventarizatsiya zelenykh nasazhdenii s ispol'zovaniem GIS-tekhnologii na primere goroda Lesosibirsk [Inventory of green planting using geographic information systems technology in Lesosibirsk]. *Lesnoi zhurnal*. 2015. No. 2. Pp. 80–89. (rus)
 20. Kuklina T.E., Merzlyakova I.E. Assortiment drevesnykh rastenii, ispol'zuemykh v ozelenenii g. Tomska [Assortment of woody plants used in Tomsk landscape gardening]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*. 2013. No. 4 (24). Pp. 47–66. DOI: 10.17223/19988591/24/4 (rus)
 21. Denisova T.R., Shaikhiev I.G. Ispol'zovanie komponentov listvennykh derev'ev srednei polosy Rossii v kachestve sorbtsionnykh materialov dlya udaleniya pollyutantov iz vodnykh sred. Obzor literatury [Deciduous tree components of central Russia as sorption materials for removing pollutants from aquatic environments. Literature review]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2017. V. 20. No. 24. Pp. 145–158. (rus)
 22. Veprikova E.V., Tereshchenko E.A., Chesnokov N.V., Kuznetsov B.N. Ispol'zovanie beresty kory berezy dlya polucheniya sorbtsionnykh materialov [Use of birch bark for sorption materials]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Khimiya*. 2012. V. 5. No. 2. Pp. 178–188. (rus)

23. *Rahman M.S., Islam M.R.* Effects of pH on isotherms modeling for Cu (II) ions adsorption using maple wood sawdust. *Chemical Engineering Journal*. 2009. V. 149. Pp. 273–280. DOI: 10.1016/j.cej.2008.11.029
24. *Stankovic V., Bozic D., Gorgievski M., Bogdanovic G.* Heavy metal ions adsorption from mine water by sawdust. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*. 2009. V. 15. No. 4. Pp. 237–249. DOI:10.2298/CICEQ0904237S
25. *Besschetnov P.V., Besschetnova N.N.* Korrelyatsiya parametrov listovogo apparata topolei v usloviyakh gorodskikh posadok [Parameter correlation of poplar leaf apparatus in urban landing conditions]. *Vestnik Kazanskogo GAU*. 2018. No. 1 (48). Pp. 5–10. DOI: 10.12737/article_5afafe02978e82.68901305 (rus)
26. *Cooke J.E.K., Rood S.B.* Trees of the people: the growing science of poplars in Canada and worldwide. *Canadian Journal of Botany*. 2007. V. 85. Pp. 1103–1110. DOI: 10.1139/B07-125
27. *Akhnazarova S.L., Kafarov V.V.* Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoi tekhnologii [Experiment optimization methods in chemical technology]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985. 327 p. (rus)
28. *Voznesenskii V.A.* Statisticheskie metody planirovaniya eksperimenta v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyakh [Statistical methods of design experiment in feasibility studies]. Moscow: Finansy i statistika, 1981. 263 p. (rus)

Сведения об авторах

Воронов Андрей Александрович, аспирант, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, teplooo@mail.ru

Максимова Светлана Валентиновна, канд. техн. наук, профессор, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, maksimovasv@tyuiu.ru

Осипова Елена Юрьевна, канд. геол.-мин. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kaf_wiw@tsuab.ru

Authors Details

Andrey A. Voronov, Research Assistant, Tyumen Industrial University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, teplooo@mail.ru

Svetlana V. Maksimova, PhD, Professor, Tyumen Industrial University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, maksimovasv@tyuiu.ru

Elena Yu. Osipova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kaf_wiw@tsuab.ru