

УДК 628.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАТИВНОГО И МОДИФИЦИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ ЖОМА САХАРНОЙ СВЕКЛЫ (*BETA VULGARIS*) В КАЧЕСТВЕ СОРБЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ВОДНЫХ СРЕД

© *К.И. Шайхиева¹, С.В. Степанова¹, И.Г. Шайхиев¹, С.В. Свергузова^{2*}*

¹ *Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, 68, Казань, 420015, Россия*

² *Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, 46, Белгород, 308012, Россия, re@intbel.ru*

В данной обзорной статье обобщены зарубежные и отечественные литературные данные по использованию жома сахарной свеклы в качестве сорбционного материала для удаления ионов металлов, красителей, нефти и нефтепродуктов из водных сред. Свекловичный жом является доступным, ежегодно возобновляемым, дешевым эффективным отходом от переработки сельскохозяйственного сырья. При среднем выходе сахара 10–12% к массе переработанной свеклы образуется около 83% свежего свекловичного жома. Российскими сахарными заводами в сезоне 2021/2022 г. переработано 37.5 млн т сахарной свеклы, при этом образовалось 30 млн т сырого жома сахарной свеклы. Кратко показан состав свекловичного жома, а также пути его использования в качестве сорбционного материала. Выявлено, что в большинстве случаев изотермы адсорбции ионов различных металлов и красителей более точно описываются моделью Ленгмюра, а кинетика процесса соответствует модели псевдотортого порядка. Показано, что химическая модификация способствует увеличению сорбционных характеристик жома по различным загрязняющим веществам. Также выявлено, что в большинстве случаев адсорбция носит физический характер. Учитывая многотоннажность образования свекловичного жома, последний является перспективным прекурсором для получения активированных углей и карбонизатов, которые также являются эффективными сорбентами для извлечения ионов металлов, красителей и нефтепродуктов из модельных и реальных сточных вод.

Ключевые слова: жом сахарной свеклы, сорбционный материал, поллютанты, водная среда, удаление, активированный уголь.

Для цитирования: Шайхиева К.И., Степанова С.В., Шайхиев И.Г., Свергузова С.В. Использование нативного и модифицированных образцов жома сахарной свеклы (*Beta vulgaris*) в качестве сорбционных материалов для удаления загрязняющих веществ из водных сред // Химия растительного сырья. 2024. №3. С. 49–70. DOI: 10.14258/jcprm.20240313555.

Введение

Загрязнение окружающей среды различными поллютантами достигло в настоящее время угрожающих размеров. Нефть и продукты ее переработки, ионы металлов, красители, пестициды, лекарственные препараты в огромных количествах попадают в природные водные объекты в составе сточных вод или в результате техногенных аварий. Для удаления различных загрязняющих веществ из сточных вод применяют разнообразные методы – механические, химические, физико-химические и биологические. Для удаления или утилизации того или иного химического вещества применяют различные способы в зависимости от строения, природы, количества поллютанта.

Однако в практике очистки сточных и природных вод существует универсальный метод, с помощью которого можно очищать водные среды от различных загрязняющих веществ с любой начальной концентрацией до практически нулевых остаточных значений – адсорбция. На промышленных предприятиях в ка-

* Автор, с которым следует вести переписку.

честве сорбентов используются активированные угли (АУ) различных марок, полученные из разнообразного сырья (лигноцеллюлозная биомасса, различные природные угли, промышленные и бытовые отходы производства и потребления и др.). Недостатком использования АУ является избирательность, высокая стоимость, истираемость, унос с очищаемой водой и необходимость регенерации, что увеличивает стоимость очистки воды.

Выходом из создавшегося положения является использование в качестве сорбционных материалов разнообразных доступных, ежегодно возобновляемых, дешевых эффективных лигноцеллюлозных отходов от переработки сельскохозяйственного сырья [1–10] и древесной биомассы [11–20]. Особый интерес представляют многотоннажные сельскохозяйственные отходы, которые образуются в местах переработки сельскохозяйственного сырья, и, в этой связи, обеспечивающие отсутствие проблем с их сбором и обработкой.

Одним из массовых сельскохозяйственных культур, выращиваемых, в частности, в Российской Федерации, является сахарная свекла (*Beta vulgaris* var. *saccharifera*). В процессе ее переработки с целью получения сахарозы образуются различные отходы, такие как ботва, жом, сатурационный осадок (дефекат), меласса и др. [21, 22]. Наиболее многочисленным отходом от переработки сахарной свеклы является жом сахарной свеклы (ЖСС). При среднем выходе сахара 10–12% к массе переработанной свеклы образуется около 83% свежего свекловичного жома, 5.4% мелассы, 12% фильтрационного осадка, 15% транспортно-моечного осадка, 1.4% отсева известнякового камня, ~10% свекловичного «боя» и хвостиков [22]. Объемы образования ЖСС огромны. Так, российскими сахарными заводами в сезоне 2021/22 г. переработано 37.5 млн т сахарной свеклы, при этом образовалось 30 млн т сырого ЖСС [21].

В свежем свекловичном жоме содержится (в % от массы сухих веществ): пектиновых веществ – 24–32, целлюлозы – 22–30, гликанов – 22–30, белков – 1.5–3.0, золы – 3.0–8.2, лигнина – 1.5–3.0, простых сахаров – 0.2–0.3. В зависимости от способа хранения жом может иметь кислую реакцию [23]. В работе [24] указывается, что клетчатка свеклы содержит около 8% белков (по весу) и 67% углеводов, таких как гемицеллюлозы (28%), целлюлоза (19%) и пектин (18%). Определено содержание некоторых веществ в составе сухого ЖСС: углеводы – 68%, глюкоза – 22%, арабиноза – 18%, уроновые кислоты – 18%, галактоза – 5%, рамноза – 2%, ксилоза – 2%, манноза – 1%, остаточная сахароза – 4%, феруловая кислота – 0.5%, уксусная кислота – 1.6%, метиловый спирт – 0.4 и 8% протеинов [24].

В сыром ЖСС общее содержание аминокислот колеблется в пределах от 0.3 до 0.5%. В состав аминокислот входят: аланин, валин, лейцин, аргинин, фенилаланин, тирозин, пролин и триптофан. Амиды (глютамин и аспарагин) находятся в ЖСС в сравнительно небольшом количестве [23]. В 1 кг сухого ЖСС содержится: корм. ед. – 0.85, Са – 7.2 г, Р – 0.7, К – 3.4, лизина – 4.23, метионина – 0.60, триптофана – 0.57, аргинина – 2.44, гистидина – 1.24, треонина – 2.91, изолейцина – 1.90, лейцина – 3.67, валина – 3.28, фенилаланина – 2.14, аспарагиновой кислоты – 4.59, серина – 3.20, глутаминовой кислоты – 7.86, пролина – 2.64, глицина – 2.81, аланина – 2.99 и тирозина – 2.62 г. Сумма аминокислот составляет 49.69 г, в том числе незаменимых – 22.98 г [25].

Основные пути использования ЖСС, мелассы и дефеката в качестве вторичных материальных ресурсов приведены в работе [26]. Одним из направлений применения сырого или высушенного ЖСС является его использование в качестве корма для крупного рогатого скота [25, 27], свиней [27], бройлерных кур [28]. Недостатком является то, что данное направление имеет ограниченный характер вследствие сезонности работы сахарных заводов. Другими направлениями применения свекловичного жома служит его использование в качестве удобрения [29] для выращивания сельскохозяйственных культур, компостирование [30], использование в качестве топлива [31]. ЖСС является источником для получения пектинов [32, 33], пищевых волокон [34], кормовых [35] и белковых [36] добавок.

Кроме того, показано, что в результате химического или микробиологического воздействия из свекловичного жома возможно получать водород [37], биоэтанол [38, 39], биогаз [40]. Также возможно получение из ЖСС олигосахаридов, таких как D-глюкоза, L-арабиноза, D-галактуроновая кислота [41], арабиногалактаны [42], ванилина [43], пропиленгликоля [44], флавоноидов [45].

Одним из путей использования ЖСС является его применение в качестве сорбционного материала для удаления различных загрязняющих веществ из природных и сточных вод.

Использование свекловичного жома для извлечения ионов металлов из водных сред

В мировой и отечественной литературе имеется множество публикаций по использованию ЖСС для сорбции ионов различных металлов из водных сред. Для удобства рассмотрения материала ионы металлов приведены в алфавитном порядке.

Ионы Cr(III) и Cr(VI). В литературе имеется несколько публикаций по удалению ионов Cr(III) и Cr(VI) свекловым жомом. В частности, проведены исследования по удалению ионов Cr(III) из водных растворов депектинированным ЖСС. Определено, что, наибольшая эффективность извлечения ионов Cr(III) составляет 86% для исходной концентрации последних 10 мг/дм³ при 20 °С, дозировке адсорбента 20 г/дм³ и pH=4.5. Изотерма адсорбции одинаково описывается моделями Ленгмюра и Фрейндлиха, а кинетика процесса подчиняется модели псевдопервого порядка [46].

Также ЖСС использовался для извлечения ионов Cr(VI) из шахтных вод. Эксперименты проводились с варьированием параметров, таких как начальная концентрация ионов хрома(VI) (10–50 мг/дм³), время контактирования (30–180 мин), pH и дозировка сорбционного материала. Выявлено, что максимальная сорбционная емкость 11.299 мг/г достигалась при pH=2, времени контактирования 90 мин и дозировке реагента 3 г/дм³. Найдено, что изотерма адсорбции наиболее точно описывается моделью Ленгмюра [47].

Для увеличения сорбционных характеристик ЖСС модифицируют различными реагентами. Так, определено, что ЖСС, пропитанный раствором FeCl₃, способствует 83.1%-ному удалению ионов Cr(VI) при их начальной концентрации в растворе 10 мг/дм³ при pH=4.4, времени контактирования 120 мин и 25 °С [48].

В работе [49] указывается, что обработка ЖСС раствором HCl способствует увеличению его максимальной сорбционной емкости по ионам Cr(VI) с 0.837 мг/г до 3.01 мг/г. Выявлено, что изотермы адсорбции более точно описываются моделью Ленгмюра, а кинетика процесса соответствует модели псевдovторого порядка. При этом процесс адсорбции является эндотермическим и термодинамически несамопроизвольным [49].

Также исследовано удаление ионов Cr(III) и Cr(VI) из водных растворов с использованием свекловичного жома в качестве сорбционного материала. Кинетику удаления Cr(III) и Cr(VI) изучали при 20.0±0.5 °С и различных условиях эксперимента. Определено, что ионы Cr(III) сорбировались на биосорбент по ионообменному механизму с катионами Ca²⁺. Установлено, что pH раствор сильно влияет на эффективность адсорбции ионов Cr(VI). Также найдено, что ионы Cr(VI) при низких значениях pH восстанавливались до ионов Cr(III) [50].

Ионы Cu(II). Также ЖСС исследовался для извлечения ионов Cu²⁺ из водных сред. В работе [51] изучалась адсорбция ионов Cu²⁺ отходами от переработки древесины различных пород и сельскохозяйственного сырья. Определено, что максимальная сорбционная емкость по ионам Cu²⁺ для жома составила 5.5 мг/г, что выше таковых показателей других лигноцеллюлозных сорбционных материалов [51].

Так, определено, что при начальной концентрации ионов Cu²⁺ 250 мг/дм³, максимальная сорбционная емкость по названным ионам составила 28.5 мг/г при 25 °С и pH=4. Выявилось, что модель Ленгмюра лучше всего описывает изотермы адсорбции, а кинетика биосорбции соответствует кинетическим моделям псевдопервого и псевдovторого порядка [52].

Исследовано извлечение ионов Cu²⁺ индивидуально или в смеси с различными гербицидами из воды. Найдено, что при начальной концентрации ионов меди 500 мг/дм³ и дозировке ЖСС 20 г/дм³, степень удаления ионов Cu²⁺ составляет 60%. Значение максимальной сорбционной емкости, определенное из уравнения Ленгмюра, составило 21.2 мг/г [53]. В работе [54] определено, что максимальная сорбционная емкость по ионам Cu²⁺ ЖСС составляет 16.01 мг/г, а время достижения равновесия – 2 ч. Указывается, что время достижения сорбционного равновесия возможно сократить до 30 мин за счет измельчения частиц ЖСС до размеров 0.125–0.25 мм. Удаление ионов меди осуществляется за счет ионного обмена с гидроксильными группами пектина [54].

Для увеличения сорбционных показателей по ионам Cu²⁺ ЖСС обрабатывали NaOH и лимонной кислотой. Найдено, что катионообменная емкость модифицированного ЖСС увеличилась с 0.86 до 3.21 мг·экв/г. Изотерма адсорбции более точно описывается моделью Ленгмюра, а кинетика процесса соответствует модели псевдovторого порядка. Вычисленное значение максимальной сорбционной емкости из уравнения Ленгмюра для модифицированного ЖСС составило 119.43 мг/г. Найденные значения свободной энергии, рассчитанные по модели Дубинина–Радушкевича и концепции потенциала Поланьи, оказались в

диапазоне 10.91–11.95 кДж/моль, что свидетельствует о том, что основным механизмом, регулирующим процесс сорбции, является ионный обмен. Значения энтальпии (-14.797 кДж/моль в диапазоне 25–55 °С) и свободной энергии (-19.361 кДж/моль при 25 °С) свидетельствуют о том, что процесс сорбции имеет экзотермический и самопроизвольный характер [55].

Также исследован процесс удаления ионов Cu^{2+} сорбционно-флотационным способом, где в качестве сорбента использовался нативный и обработанный растворами HCl или KOH ЖСС. При начальной концентрации ионов меди $2 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³, дозировке ЖСС 6 г/дм³, рН=7, степень удаления ионов Cu^{2+} нативным и модифицированным ЖСС составила более 96% в зависимости от наличия мешающих веществ в растворе [56].

Исследована возможность использования экстрактов, полученных из ЖСС, с различными значениями рН для удаления из модельных растворов ионов Cu^{2+} . Определены зависимости значений массы осадка, рН, светопропускания, ХПК и остаточного содержания ионов Cu^{2+} в фильтратах. Найдено, что степень удаления ионов Cu^{2+} с концентрацией 100 мг/дм³ при приливании экстрактов в соотношении 2 : 1 составляет 82–88% [57].

Ионы Fe(III). Нами исследовано влияние различных параметров (рН водной среды, дозировка сорбционного материала, концентрация ионов Fe^{3+} , наличие анионов SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- и PO_4^{3-}) на эффективность удаления ионов Fe^{3+} из модельных растворов с начальной концентрацией 100 мг/дм³ ЖСС, модифицированного слабым раствором уксусной кислоты. Найдено, что наибольшая степень удаления ионов Fe^{3+} наблюдается при рН=4. С увеличением дозировки ЖСС, эффективность удаления сорбата повышается. Присутствие в модельном растворе сульфат-, хлорид- и фосфат-ионов в соотношении 1 : 1 по отношению к ионам железа значительно снижают эффективность сорбционного процесса. При дозировке ЖСС 10 г/дм³, эффективность удаления ионов железа составила 55% [58]. Определено значение максимальной сорбционной емкости, равное 39.6 мг/г. Для увеличения сорбционных показателей проведена обработка образцов ЖСС 1, 2, 3 и 5%-ными растворами HNO_3 , H_2SO_4 , HCl и CH_3COOH . Найдено, что наибольшая сорбционная емкость (70.4 мг/г) достигается в случае обработки жомом 3 %-ным раствором CH_3COOH . По адекватности описания изотермы сорбции ионов Fe^{3+} модифицированным жомом расположились в следующий ряд: Дубинина-Радушкевича > Ленгмюра > Флори-Хиггинса > Темкина > Френкеля-Хелси-Хилла > Гаркинса-Джура > БЭТ > Фрейндлиха. Найдено, что кинетика сорбции подчиняется уравнению псевдо-второго порядка. Определенные термодинамические параметры ($\Delta G^\circ = -5.548$ кДж/моль и $E = 8.22$ кДж/моль) свидетельствуют о протекании физического процесса [59].

Ионы Hg(II). Исследована адсорбция ионов Hg(II) пектином, выделенным из ЖСС. Определялось влияние различных параметров, таких как рН, время, температура, начальная концентрация поллютанта на эффективность очистки. Определено, что максимальная сорбционная емкость ЖСС по ионам Hg(II) составляет 23.6 мг/г. Выявлено, что сорбционная емкость по ионам Hg(II) увеличилась с повышением значений рН водной среды. Изотерма адсорбции более точно описывается моделью Ленгмюра. Установлено, что основными центрами адсорбции являются группировки -ОН и -С(О)ОН [60].

Ионы Mn(II). Исследована адсорбция ионов Mn(II) ЖСС в интервале температур от 20 до 60 °С. Определено, что максимальная сорбционная емкость свекловичного жома по ионам Mn(II) при начальных концентрациях ионов марганца от 155 до 290 мг/дм³ составляет от 4.69 до 6.80 мг/г. Авторами выявлено, что изотермы адсорбции наиболее точно описываются моделью Ленгмюра, а кинетика процесса соответствует модели псевдovторого порядка. На основании термодинамических величин найдено, что в данном случае имеет место химическое взаимодействие [61].

Жом сахарного тростника и ЖСС использовались для удаления ионов Mn(II) из шахтных вод. Выявлено, что при рН=6, дозировке сорбентов 1 г/дм³ и начальной концентрации ионов Mn(II) 2 мг/дм³, степень удаления последних жомом сахарного тростника составила 62.5%, ЖСС – 86.4%. Определено, что кинетика процесса соответствует модели псевдо-второго порядка [62].

Ионы Ni(II). Исследовано удаление ионов Ni^{2+} магнитным сорбционным материалом – ЖСС, пропитанный Fe_3O_4 . Выявлено, что эффективность удаления ионов Ni^{2+} была достигнута при оптимальных условиях (начальная концентрация поллютанта 25 мг/дм³, дозировка сорбционного материала – 5 г/дм³, рН=6.6) составила 81.2%. Найдено, что уравнение Ленгмюра более точно описывает изотерму адсорбции, а кинетика процесса соответствует модели псевдovторого порядка. Также определено, что имеет место хемосорбция, а сам процесс носит экзотермический несамопроизвольный характер [63].

Ионы Pb(II). Пектин и целлюлоза, выделенные из свекловичного жома, использовались для выделения ионов Pb^{2+} из модельных вод. Выявлено, что целлюлоза, полученная из свекловичного жома, имеет максимальную сорбционную емкость по ионам свинца 350 мг/г, пектин – 600 мг/г [64]. Сам ЖСС также возможно использовать для извлечения ионов Pb^{2+} в статических и динамических условиях [65].

Ионы Tl(I). В качестве сорбента для удаления ионов таллия(I) из водных растворов в периодическом процессе предлагается использовать ЖСС, обработанный раствором NaOH. Максимальная эффективность удаления Tl(I) наблюдается при значениях $pH=5-9$ при количестве сорбента 7 г/дм³. Максимальная сорбционная емкость, вычисленная из уравнения Ленгмюра, составила 185 мг/г. Найдено, что изотерма адсорбции хорошо согласуется с моделью Ленгмюра, а термодинамические параметры (ΔG , ΔH и ΔS) свидетельствуют о том, что процесс является самопроизвольным и экзотермическим [66].

Ионы U(VI). В качестве биосорбентов для удаления ионов U(VI) из водной среды использовали нативный и химически модифицированный 0.25 М раствором HNO_3 ЖСС. Исследовалось влияние pH раствора ($pH=2-9$), количество адсорбента (50–500 мг/дм³), время контакта (0–180 мин), температуры (293–323 К) и начальной концентрации (20–60 мг/дм³). Полученные значения максимальной сорбционной емкости по ионам U(VI) для нативного и модифицированного ЖСС составила 20.45 и 19.80 мг/г соответственно. Выявлено, что изотермы адсорбции более точно описываются моделью Ленгмюра, а кинетика процесса подчиняется модели псевдоторого порядка [67].

Композиционный сорбционный материал из ЖСС и цедры помело исследовался для удаления ионов U(VI) из модельных растворов. Выявлено, что изотермы адсорбции более точно описываются моделью Ленгмюра, а кинетика процесса подчиняется модели псевдоторого порядка. Максимальная сорбционная емкость по ионам U(VI) составила 79.36 мг/г. Исследование десорбции показало, что извлечение ионов U(VI) 0.1 М раствором $NaHCO_3$ составило 99.24 % в первом цикле [68].

Ионы Zn(II). Изучены сорбционные свойства ЖСС по отношению к ионам Zn^{2+} в режиме статической адсорбции в нейтральной и кислой средах. Установлено, что изотермы адсорбции относятся к I типу согласно классификации ИЮПАК и описывают мономолекулярную адсорбцию ионов Zn^{2+} на поверхности ЖСС. Установлено, что процесс сорбции ионов Zn^{2+} свекольным жомом при $pH \sim 7$ лучше всего описывается уравнением Дубинина-Радускевича ($R^2=0.9993$), а при $pH \sim 2$ – уравнением Темкина ($R^2=0.9994$) [69]. Обнаружено, что адсорбционная способность ЖСС зависит от pH , увеличиваясь при повышении pH [70]. Выявлено, что процессы сорбции ионов Zn^{2+} ЖСС при $pH \sim 7$ и $pH \sim 2$ относятся к процессам физической адсорбции. В рамках диффузионной модели адсорбции установлено, что сорбция осуществляется благодаря одновременному протеканию двух процессов: диффузии сорбата к поверхности и в порах сорбционного материала [69].

Проведенные данные по сорбционным характеристикам, выполненные различными группами авторов, не дают возможности сравнивать полученные данные в связи с отличающимися условиями проведения процессов. Более корректные данные получаются при проведении экспериментов в одинаковых условиях. В мировой литературе зафиксированы исследования по использованию ЖСС в качестве сорбционного материала для удаления 2-х и более ионов металлов из модельных и реальных вод.

Удаление двух ионов металлов. Ионы Cd(II) и Pb(II). Проведены исследования по удалению ионов Cd^{2+} и Pb^{2+} из модельных растворов при начальной концентрации последних 2.5 ммоль/дм³ и $pH=5.5$. Определены значения максимальной сорбционной емкости, найденные из уравнения Ленгмюра, которые составили по ионам Cd^{2+} 0.217 ммоль/г, по ионам Pb^{2+} 0.356 ммоль/г [71], т.е. сорбционная емкость ЖСС по ионам свинца выше, чем по ионам кадмия. Несколько иные результаты получены в другом исследовании [72]. Определено, что максимальная сорбционная емкость по ионам Cd^{2+} при $pH=5.3$ составила 46.1 мг/г и 43.5 мг/г по ионам Pb^{2+} при $pH=5.0$. Выявлено, что адсорбция названных ионов осуществляется за счет ионного обмена, физической сорбции и комплексообразования. Дозы 8 г/дм³ было достаточно для оптимального удаления ионов обоих металлов. Выявлено, что процесс адсорбции был относительно быстрым, и равновесие достигалось примерно через 70 мин контактирования [72].

Достичь увеличения сорбционных показателей по названным ионам удалось после обработки ЖСС лимонной кислотой. Найдено, что изотермы адсорбции более точно описываются моделью Ленгмюра. А кинетика процесса подчиняется модели псевдоторого порядка. Найдено, что максимальные сорбционные емкости при 25 °С для ионов Cd^{2+} и Pb^{2+} составляют 115 мг/г и 310 мг/г соответственно. Выявлено, что

процесс носит экзотермический, самопроизвольный характер ($\Delta H^\circ = -21.19$ кДж/моль и $\Delta H^\circ = -35.68$ кДж/моль соответственно) [73].

Ионы Cu(II) и других металлов. Исследовано удаление ионов Cu^{2+} и Cr(VI) нативным ЖСС и образцами после выделения пектинов и последующего ферментативного гидролиза целлюлозы. Определено, что по ионам Cu^{2+} значения максимальной сорбционной емкости, вычисленные из уравнения Ленгмюра, составляют 19.81, 7.02 и 6.75 мг/г соответственно, по ионам Cr(VI) – 12.17, 13.58 и 19.16 мг/г соответственно. Определено, что сорбция названных ионов металлов протекает по функциональным группам сорбционных материалов (гидроксильным, фенольным, карбонильным, аминогруппам). Равновесные исследования показали, что адсорбция ионов Cu^{2+} и Cr(VI) всеми сорбционными материалами лучше всего описывается моделью Ленгмюра [74].

Проведено сравнительное исследование по адсорбции ионов Cu^{2+} и Ni^{2+} нативным и модифицированным 0.05 М растворами HCl и NaOH ЖСС. Найдено, что все изотермы адсорбции хорошо согласуются с моделью Ленгмюра, а кинетика процесса соответствует модели второго порядка. Определено, что образцы ЖСС, обработанные раствором NaOH , имеют наибольшие значения максимальной сорбционной емкости (0.457 ммоль/г по ионам Cu^{2+} , 0.355 ммоль/г по ионам Ni^{2+}) по сравнению с кислотообработанным (0.241 ммоль/г и 0.183 ммоль/г соответственно) и нативным образцами ЖСС (0.33 ммоль/г и 0.203 ммоль/г соответственно) [75].

Также для удаления названных выше ионов металлов использовался ЖСС, модифицированный полианилином. Найдено, что модификация позволяет повысить эффективность извлечения металлов по сравнению с нативным ЖСС. Определено, что нативный жом свеклы позволяет извлекать ионы Cu^{2+} с эффективностью 65%, ионы Ni^{2+} – на 75%, модифицированный ЖСС – на 78 и 95% соответственно [76]. Найдено, что максимальное удаление ионов Cu^{2+} достигается при начальной концентрации поллютанта 50 мг/дм³, pH=4, дозировке сорбционного материала 1.0 г/дм³ и времени контактирования 30 мин. По ионам Ni^{2+} названные параметры составляют 50 мг/дм³, pH=7.5, 3.0 г/дм³ и 60 мин соответственно [76].

Для удаления ионов Cu^{2+} и Pb^{2+} использовался депектинизированный ЖСС, модифицированный лимонной кислотой и аморфными частицами оксидов железа. Определено, что из-за присутствия аморфных форм оксидов железа адсорбционная способность по ионам Cu^{2+} и Pb^{2+} примерно в три раза выше, чем у образца, модифицированного только лимонной кислотой. Кроме того, полученные экспериментальные данные по адсорбции названных ионов металлов хорошо согласуются с моделью Ленгмюра, и кинетическая модель псевдвторого порядка может быть использована для описания кинетики процесса. Согласно рассчитанным термодинамическим параметрам, процесс адсорбции носил эндотермический и самопроизвольный характер [77].

Также нативный ЖСС исследовался в качестве сорбционного материала для удаления ионов Cu^{2+} и Zn^{2+} из модельных растворов. Определено, что при начальной концентрации ионов металлов $1 \cdot 10^{-3}$ М/дм³, дозировке жома 8 г/дм³ степень удаления ионов Cu^{2+} составила 66% при pH=5.5, ионов Zn^{2+} – 70 при pH=6.0. Выявлено, что максимальная сорбционная емкость при вышеназванных значениях pH по ионам меди составляет 30.9 мг/г, по ионам цинка – 35.6 мг/г. Изотермы адсорбции более точно описываются моделью Фрейндлиха [78].

Ионы двух металлов. Исследованы адсорбционные свойства ЖСС и жома сахарного тростника по удалению ионов Pb^{2+} и Na^+ при варьировании pH раствора, времени установления равновесия, массы адсорбента и концентрации ионов металлов. Названные сорбционные материалы показали высокую эффективность извлечения ионов Pb^{2+} (100 и 100%) и Na^+ (97.5 и 98.9%) соответственно. Определено, что изотермы адсорбции описываются моделями Ленгмюра и Фрейндлиха, а кинетика процесса соответствует модели псевдвторого порядка [79].

Для увеличения сорбционных характеристик по ионам Pb^{2+} и Zn^{2+} и снижения водопоглощения ЖСС подвергали взаимодействию с 1 М раствором NaOH , с формальдегидом и эпихлоргидрином. Выявлено, что названная обработка свекловичного жома снижает водопоглощение с 32 до 2 г/г. Выявлено, что модификация нативного ЖСС обработкой щелочью и формальдегидом снижает сорбционные характеристики, а после обработки эпихлоргидрином, наоборот, способствует увеличению сорбционных показателей по ионам Pb^{2+} и Zn^{2+} . Эффективность связывания ионов металлов изучали только для отношения $[\text{Me}^{2+}]/[\text{C}_p]=1$, соответствующего теоретической реакции двух карбоксильных групп с одним катионом металла. Так, у сырого ЖСС данный показатель по ионам Pb^{2+} и Zn^{2+} составил 0.68 и 0.59 соответственно, после всех модификаций – 0.88 и 0.76 [80].

ЖСС как слабый катионит использовался для очистки низкорadioактивных сточных вод, содержащих в своем составе ионы $^{140}\text{Na}^+$ и $^{140}\text{La}^{3+}$ и имеющего активность около 10^{-2} мкКл/дм³. Определено, что катионоактивная емкость нативного ЖСС составляет 0.65 мг·экв/г. При обработке ЖСС формальдегидом растворами HCl и H₂SO₄ получают катионит с очень хорошими механическими и фильтрующими свойствами. Этот ионообменник имеет емкость ~1.3 мг·экв/г [81].

Ионы трех и более металлов. Свекловичный жом исследовался также в качестве сорбционного материала для удаления трех и более ионов металлов. Так, в частности, ЖСС использовался для извлечения ионов Cu^{2+} , Ni^{2+} и Pb^{2+} из модельных растворов. Определены значения максимальных величин сорбционной емкости, которые при pH=6 для названных ионов составили 30, 12 и 60 мг/г соответственно. Определено, что основным механизмом процесса является ионный обмен и, в небольшой части – адсорбция [82]. В работе [83] получены аналогичные зависимости. Определено, что значения максимальной сорбционной емкости по ионам Cu^{2+} , Ni^{2+} и Pb^{2+} составили 0.28 ммоль/г (17.8 мг/г), 0.2 ммоль/г (11.7 мг/г) и 0.37 ммоль/г (76.6 мг/г) соответственно. Определено, что в мультиметаллических растворах с эквимольной концентрацией ионов металлов ионы Ni^{2+} демонстрируют наибольшее снижение эффективности удаления в присутствии двух других катионов (-61%) [83].

Увеличить сорбционные характеристики по ионам металлов возможно модификацией ЖСС. Так, в частности, показано, что свекольный жом, обработанный раствором FeCl₃, имеет значения максимальной сорбционной емкости по ионам Ca^{2+} , Cu^{2+} и Pb^{2+} 21.57, 38.25, 108.18 мг/г соответственно. Определено, что изотермы адсорбции хорошо согласуются с моделью Ленгмюра, а кинетика процесса следует модели псевдодвухго порядка. Вычисленные термодинамические параметры (ΔG° , ΔS° и ΔH°) показали, что адсорбция протекает спонтанно и эндотермична [84].

Исследовано извлечение ионов Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} и Ni^{2+} с варьированием параметров процесса: pH – от 2 до 5.5, концентрация металла ионов металлов – от 10^{-4} до 10^{-3} М при постоянной концентрации ЖСС, равной 2.5 г/дм³. В результате проведенных экспериментов выявлено, что сорбционные характеристики по названным ионам металлов ЖСС возможно расположить в следующем порядке: $\text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$ [85].

Проведены исследования адсорбции для удаления ионов Cd^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} и Zn^{2+} . Выявлено, что изотермы адсорбции наиболее точно описываются моделью Ленгмюра, а кинетика адсорбции соответствует модели псевдодвухго порядка. Значения максимальной сорбционной емкости, найденные из уравнения Ленгмюра, возможно расположить в следующей зависимости: Pb^{2+} (0.356 ммоль/г) $>$ Cu^{2+} (0.333 ммоль/г) $>$ Zn^{2+} (0.272 ммоль/г) $>$ Cd^{2+} (0.217 ммоль/г) $>$ Ni^{2+} (0.202 ммоль/г) [86, 87].

Исследована адсорбция катионов Cd^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} и Zn^{2+} из водных растворов ЖСС, модифицированным раствором NaOH. Найдено, что обработка щелочным раствором удвоила емкость катионного обмена. Изотермы сорбции свидетельствовали о высокой сорбционной способности, возрастающей с увеличением концентрации сорбента, и следовали следующему порядку селективности: $\text{Cu}^{2+} \sim \text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+} \sim \text{Cd}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$. Данные по сорбции лучше соответствовали модели Ленгмюра, чем модели Фрейндлиха, что свидетельствовало о том, что имеет место монослойная сорбция, в основном за счет ионного обмена. Значения максимальной сорбционной емкости по названным ионам имели значения 0.54, 0.46, 0.38, 0.27 и 0.15 ммоль/г [88, 89].

Также модифицированный ионами циркония (IV) ЖСС использовался для извлечения сульфат- и нитрат-ионов из водных сред. Показано, что максимальная сорбционная емкость по названным анионам составляет 114 и 63 мг/г соответственно [90].

Использование свеколовичного жома для извлечения красителей из водных сред

Красители входят в состав превалирующих поллютантов в составе сточных вод. Их попадание в природные водоемы приводит к окрашиванию воды, ухудшению гидродинамических показателей водоема, снижению активного кислорода, что приводит к нарушению естественных процессов в природных водоисточниках. Для извлечения красителей используют различные отходы сельскохозяйственного производства [91–95].

Эталонным соединением для определения сорбционных характеристик сорбционных материалов является краситель «Метиленовый синий». ЖСС, наряду с другими сорбционными материалами [95], исследовался для извлечения названного красителя из модельных вод. Найдено, что максимальная сорбционная емкость свеколовичного жома по красителю «Метиленовый синий» составляет 714.29 мг/г при pH=8 и 25 °С.

Определено, что изотерма адсорбции одинаково точно описывается моделями Ленгмюра и Фрейндлиха, а кинетика процесса подчиняется модели псевдovторого порядка ($R^2=0.9999$). Определено, что адсорбция красителя на ЖСС увеличивалась с повышением pH раствора и концентрации красителя [96].

ЖСС подвергался микроволновому излучению, этерификации малеиновым ангидридом и обработке гидроксидом железа. Выявлено, что изотерма адсорбции красителя «Метиленовый синий» соответствовала модели Ленгмюра с теоретической максимальной сорбционной емкостью 641.3 мг/г при pH=8, а кинетическая модель псевдovторого порядка больше подходила для описания кинетики процесса. Термодинамические расчеты указывали на спонтанную и экзотермическую адсорбцию. Найдено, что сорбционное равновесие устанавливается через 150 мин контактирования [97].

Исследована адсорбция красителя марки «Gemazol turquoise blue-G» на нативном ЖСС. Были проведены исследования адсорбции в статическом режиме для изучения влияния различных параметров, таких как начальный pH, температура и исходная концентрация красителя. Результаты показали, что адсорбция сильно зависит от pH и немного зависит от температуры. При исходной концентрации красителя 800 мг/дм³ ЖСС продемонстрировал самую высокую способность поглощения красителя – 234.8 мг/г при 25 °С и при начальном значении pH=2.0. Найдено, что модели Ленгмюра и Редлиха-Петерсона применимы для описания адсорбции красителя свекловичным жомом в исследованных диапазонах концентраций (100–800 мг/дм³) и температур (25–45 °С). Было обнаружено, что процесс сорбции контролируется, как поверхностной, так и поровой диффузией, при этом поверхностная диффузия на более ранних стадиях сменяется поровой диффузией на более поздних стадиях [98].

Также изучена одновременная биосорбция красителя «Gemazol Turquoise Blue-G» и ионов Cu²⁺ на нативном ЖСС из бинарных смесей и сравнена с ситуацией с одним красителем и ионом металла. Исследовалось влияние pH и концентраций одного и двух компонентов на равновесное поглощение каждого компонента как по отдельности, так и в смеси. Значение pH для биосорбции одного красителя «Gemazol Turquoise Blue-G» и ионов Cu²⁺, при котором наблюдалось максимальное удаление поллютантов составило pH=2.0 и 4.0 соответственно. Равновесное поглощение каждого компонента увеличивалось с повышением его исходной концентрации до 750 мг/дм³ для красителя и до 200 мг/дм³ для ионов Cu²⁺. Найдено, что изотермы адсорбции хорошо описываются моделью Ленгмюра [99].

ЖСС, модифицированный бромистым тетра-н-бутиламмонием, исследовался для удаления красителя «Reactive Yellow 2» из модельных растворов. Найдено, что максимальная сорбционная емкость модифицированного жома составляет $7.20 \cdot 10^{-5}$ моль/г. Определено, что изотерма адсорбции описывается моделью Ленгмюра, а кинетика процесса соответствует модели псевдovторого порядка. Кроме того, приготовленный биосорбент может регенерировать с использованием 0.01 М NaOH в течение 15 циклов биосорбции/десорбции. Экспериментальные результаты показали, что электростатическое взаимодействие, комплексообразование и ионный обмен были возможными взаимодействиями в процессе обесцвечивания [100].

Свекловичный жом, предварительно активированный омылением раствором NaOH, а затем модифицированный нагреванием с лимонной кислотой, использовался для удаления красителя «Basic Yellow 51» из водных растворов. Было обнаружено, что эффективность сорбции увеличивалась с увеличением времени контакта и температуры и уменьшалась с увеличением начального содержания красителя. Установлено, что изотерма адсорбции лучше соответствуют модели Ленгмюра и что процесс адсорбции был эндотермическим и самопроизвольным. Значения максимальной сорбционной емкости, вычисленные из уравнения Ленгмюра, составлял 200–222 мг/г в зависимости от температуры [101].

Также ЖСС, обработанный эпихлоргидрином, исследовался для удаления красителя «Reactive black 5» из модельных растворов. Найдено, что при концентрации красителя 100 мг/дм³, дозировке модифицированного жома 1 г/дм³, pH=6.5 и 15 мин контактирования, степень извлечения Reactive black 5 составила 98%. Эксперименты показали, что полученные данные соответствуют кинетике псевдо-второго порядка и модели Ленгмюра. Значения ΔH° (22.47 кДж/моль) и E_a (10.0 кДж/моль) предполагают протекание физической сорбции, которая обеспечивает возможность частого повторного использования сорбента [102].

Нативный высушенный жом использовался для извлечения красителя марки «Chemazol Reactive Red 195» из модельных растворов. Выявлено, что максимальная сорбционная емкость по названному красителю составила 58.0 мг/г при pH=1.0 и температуре 50 °С. Установлено, что изотерма адсорбции более точно описывается моделью Фрейндлиха, а кинетика процесса соответствует модели псевдопервого порядка.

Установлено, что как внешний массоперенос, так и внутричастичная диффузия играют важную роль в механизме адсорбции красителя на нативном жоме. Также определено, что адсорбция названного красителя на ЖСС носит эндотермический и самопроизвольный характер [103].

Исследовалась адсорбция красителя марки «Acid red 1» из модельных растворов ЖСС, обработанных солью четвертичного аммония (цетил триметиламмоний бромид). Найдено, что при оптимальном $\text{pH}=2.0$ адсорбция достигла равновесия за относительно короткое время (30 мин) и соответствовала кинетической модели псевдвторого порядка. Изотерма Ленгмюра лучше соответствовала равновесным данным с максимальной биосорбционной емкостью монослоя красителя 98.32 мг/г [104].

В работе [105] показано, что удаление красителя марки «Reactive red 2» жомом, модифицированным цетилтриметиламмоний бромидом, при $\text{pH}=3$ составила 98%, в то время как с использованием нативного ЖСС эффективность извлечения названного красителя при $\text{pH}=2$ составила всего 16%.

Нативный и модифицированный цетилтриметиламмоний бромидом жом также использовался для удаления красителя марки «Reactive basic black» в динамическом режиме. Выявлено, что максимальная сорбционная емкость зависит от pH среды и для нативного ЖСС составила 36.9 и 2.6 мг/г по ЖСС при $\text{pH}=2.0$ и 8.0 соответственно при максимальной концентрации красителя на входе 500 мг/дм³ и минимальной скорости потока 0.8 см³/мин. Определено, что в случае использования модифицированного образца жома наибольшее значение сорбционной емкости составило 140 мг/г при $\text{pH}=8$, что свидетельствует о положительном влиянии обработки на адсорбционные показатели [106].

Также свекловичный жом, обработанный четвертичной аммониевой солью тетрабутиламмония бромида, использовался для удаления красителя марки «Nuclear fast red». Выявлено, что при $\text{pH}=2$, концентрации растворителя 100 мг/дм³, дозировке адсорбента 0.6 г/дм³, времени контактирования 180 мин при температуре 25 °С эффективность удаления красителя модифицированным жомом составила 94.44%, нативным ЖСС – на 12% ниже. Выявлено, что, как и в предыдущих случаях, изотерма адсорбции хорошо описывается моделью Ленгмюра ($R^2=0.975$), а кинетика процесса соответствует модели псевдвторого порядка ($R^2=0.999$) [107].

Модифицированный раствором азотной кислоты ЖСС использовался также для удаления красителя марки «Red 254» в статических условиях. Определено, что максимальная сорбционная емкость по данному красителю составила 84.75 мг/г. Выявлено, что изотерма адсорбции хорошо согласуется с моделью Ленгмюра, а кинетика процесса соответствует модели псевдвторого порядка. Положительное значение ΔH° (2.7 кДж/моль) подтверждает, что процесс биосорбции носит эндотермический характер. Также определено, что адсорбция красителя Red 254 на модифицированном жоме представляет собой самопроизвольный и термодинамически благоприятный процесс [108].

Для извлечения красителя марки «Reactive Red 198» использовался свекловичный жом, модифицированный лимонной кислотой. Выявлено, что обработка названным реагентом способствует достижению максимальной сорбционной емкости 838 мг/г при температуре раствора 25 °С и $\text{pH}=8$ [109].

Нативный жом также использовался для удаления красителя марки «Basic violet 16» из модельных растворов при температурах 25–45 °С. Выявлено, что изотермы адсорбции одинаково хорошо описываются моделями Ленгмюра и Фрейндлиха, а максимальная сорбционная емкость составляет 172.4–192.3 мг/г в зависимости от температуры раствора. Вычисленные термодинамические параметры ($\Delta G^\circ=12.230$ –14.304 кДж/моль при температурах 25–45 °С, $\Delta H^\circ=-18.696$ кДж/моль и $\Delta S^\circ=-103.69$ Дж/моль·К) свидетельствуют о протекании физической экзотермической адсорбции [110].

Учитывая тот факт, что исследования по адсорбции красителей проводились в различных условиях, сравнивать сорбционные характеристики некорректно. Проведение экспериментов по удалению двух и более красителей нативным или модифицированным ЖСС дает возможность сравнивать значения по сорбционной емкости при проведении экспериментов в одинаковых условиях. В литературе нашлось несколько сообщений по сорбции двух красителей свекловичным жомом в одинаковых условиях. Так, в работе [111], ЖСС использовался для удаления Метиленового синего и Сафранина из модельных сред. Найдено, что максимальные значения сорбционной емкости достигались при $\text{pH}=10$ и составили 211 и 147 мг/г для Метиленового синего и Сафранина соответственно. Определено, что в обоих случаях изотермы адсорбции более точно описывались моделью Ленгмюра, а кинетика процесса соответствовала модели псевдвторого порядка [111].

Также исследовалась сорбция красителей марок «Reactive Blue 21» и «Reactive Black 5» на свекловичном жоме, предварительно модифицированным обработкой NaOH и, в последующем, H₃PO₄ из модельных

растворов. Исследования проводились в интервале температур 25–55 °С и в диапазоне концентраций 50–600 мг/дм³. Определено, что оптимальное значение рН составляет рН=4. Обнаружено, что модель изотермы Ленгмюра удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными. Максимальная сорбционная емкость модифицированного жома через 6 ч контактирования сорбата с сорбционным материалом при 25 °С может достигать 204 и 192 мг/г для красителей «Reactive Blue 21» и «Reactive Black 5», соответственно [112].

Биокомпозиционный сорбционный материал на основе ЖСС с иммобилизованным на его поверхности хитозаном исследовался для удаления красителей марок «Acid Red 1» и «Reactive Red 2» в статических и динамических условиях. Эффективность удаления красителей при оптимальных условиях биосорбции (рН=3.0, количество модифицированного жома – 4 г/дм³, время контактирования – 10 мин) составила 81.23% для красителя Acid Red 1 и 86.79% для красителя Reactive Red 2. Максимальные сорбционные емкости по исследуемым красителям составили 358.0 и 379.2 мг/г соответственно. Также выявлено, что изотермы адсорбции лучше описываются моделью Ленгмюра, а кинетика процесса соответствует модели псевдопервого порядка [113]. Для улучшения сорбционных характеристик по красителям марок «Methyl orange» и «Methylene blue» свекольным жомом, последний предложено обрабатывать бромистой солью четвертичного фосфония и малеиновым ангидридом [114].

Использование свеколовичного жома для извлечения нефти и нефтепродуктов из водных сред

В мировой литературе найдено несколько публикаций, посвященных использованию ЖСС в качестве нефтесорбента. Так, в работе [115] показано, что максимальная нефтеемкость нативного высушенного ЖСС составляет 1.16 г/г. Этими же авторами предложен способ модификации жома органическим растворителем с последующим выжиганием. Данный метод способствует увеличению свободного пространства в структуре модифицированного материала и, соответственно, увеличению сорбционной емкости по нефти до 16 г/г [115–117].

Определена максимальная нефтеемкость нативного жома по отношению к нефти и дизельному топливу. Найдено, что данный показатель составляет 2.17 и 1.3 г/г. Показано, что одним из перспективных способов модификации свеколовичного жома является обработка СВЧ-излучением. Суть метода заключается в обработке сушеного продукта водными растворами КОН, Н₃Р₀₄, ННО₃, Н₂SO₄ и водой в течение получаса, далее обработанный жом подвергался термической обработке при помощи СВЧ-излучения до обугливания. В результате модификации нефтеемкость сорбента повышается до 3.5 г/г [118].

Ранее нами проведены исследования по возможности использования высушенного ЖСС различного фракционного состава в качестве сорбционного материала масел различного назначения при различных температурах в статических и динамических условиях. Определено, что значение максимальной маслосемкости жома уменьшается при понижении температуры. Найдено, что наилучшими сорбционными характеристиками обладает средняя фракция реагента с размерами 1.2–5 мм. Определено, что по значениям максимальной маслосемкости при 20 °С исследуемые масла расположились в следующий ряд зависимостей (по средней фракции жома): ТП-22С (3.18 г/г) > ТЭп-15В > М10Г2К > М8В > М63/12Г1 > АУ > И-20А (1.82 г/г) [119].

Также исследована возможность использования высушенного ЖСС различного фракционного состава в качестве сорбционного материала легких нефтепродуктов (керосин, бензин) при различных температурах в статических и динамических условиях. Определено, что максимальная нефтеемкость жома повышается при понижении температуры. Наибольшими сорбционными характеристиками обладает средняя фракция материала с размерами 1.2–5 мм. Определено, что максимальная нефтеемкость, определенная в статических условиях, по керосину составила 1.77 г/г, по бензину марки АИ-92 – 1.67 г/г. Также проведенными экспериментами определено, что нефтеемкость ЖСС, определенная в динамических условиях, составила по керосину – 1.81 и 2.07 г/г для крупной и мелкой фракции жома, для бензина марки АИ-92 – 1.75 и 1.98 г/г соответственно [120].

Использование жома сахарной свеклы в качестве прекурсора для получения активированных углей и их применение для очистки водных сред от различных загрязнителей

Учитывая многотоннажность образования ЖСС, одним из направлений его использования является получение активированных углей (АУ) и карбонизатов и применение последних для удаления различных загрязняющих веществ из водных сред. Так, установлена адсорбционная способность АУ из ЖСС удалять ионы Cd²⁺ из водных растворов. Найдено, что оптимальной температурой обжига жома является Т=700 °С

в течение 120 мин. Эффективность удаления ионов Cd^{2+} составила 99.0, 78.2 и 57.0% при начальной концентрации иона металла 100, 250 и 500 мг/дм³ соответственно, при дозировке АУ 2.5 г/дм³, рН=6.3 и времени контактирования 120 мин [121]. Для увеличения сорбционных характеристик АУ из жома проводилась активация раствором H_3PO_4 и отжиг при температуре 500 °С. Показано, что максимальная сорбционная емкость по ионам Cd^{2+} составила 72.99 мг/г [122].

АУ, полученный из свекловичного жома, предварительно пропитанный серной кислотой, при температуре 150 °С и обжиге в течение 6 ч, использовался для удаления ионов Cr(VI) . Максимальная адсорбционная способность по ионам Cr(VI) , рассчитанная по изотерме Ленгмюра, составляет 24.15 мг/г при 25 °С. Было выявлено, что образующийся газ, обогащенный SO_2 , является превосходным восстановителем ионов Cr(VI) [123].

Также АУ был приготовлен из свекловичного жома двухступенчатым методом, включающем химическую активацию КОН, и был использован для удаления ионов Cr(VI) из водных растворов. Результаты показали, что высокая удельная поверхность АУ достигала 2002.9 м²/г, а площадь поверхности микропор составляла 85% от общей площади. Максимальная сорбционная емкость 163.7 мг/г достигалась при исходной концентрации Cr(VI) 400 мг/дм³, дозировке адсорбента 2.0 г/дм³ и рН=4.5 [124]. Выявлено, что изотермы адсорбции в работах [123–125] более точно описываются моделью Ленгмюра, а кинетика процесса соответствует модели псевдвторого порядка. Выявлено, что процесс адсорбции ионов Cr(VI) носит спонтанный и экзотермический характер [125].

АУ, полученные из ЖСС термической обработкой при температурах 300–500 °С, использовались для удаления ионов Cu^{2+} из модельных растворов. Выявлено, что с увеличением температуры обработки максимальная сорбционная емкость повышается и составляет 12.34, 13.44 и 14.81 мг/г для образцов АУ, полученных при температуре 300, 400 и 500 °С соответственно. Также определено, что изотермы адсорбции более точно описываются моделью Ленгмюра, а кинетика процесса подчиняется модели Лагергрена [126].

Найдено несколько публикаций по применению АУ, полученных из свекловичного жома, для удаления красителей. В частности, показано, что максимальная сорбционная емкость АУ, полученного из ЖСС при 450 °С, активированного 3 М/дм³ раствором фосфорной кислоты, составляет по красителю марки «Methylene blue» 244.76 мг/г. Определено, что площадь поверхности микропор, площадь внешней поверхности, площадь поверхности Ленгмюра, общая пористость, объем микропор и средний размер пор составили 1029.31 м²/г, 629.30 м²/г, 290.03 м²/г, 1391.46 м²/г, 0.445 см³/г, 0.329 см³/г и 23.93 Å соответственно. Выявлено, что сорбционные характеристики повышаются с увеличением времени контакта, температуры и значений рН раствора, а также начальной концентрации красителя. Показано, что кинетическая модель псевдвторого порядка хорошо соответствует экспериментальными данным, а адсорбция красителя происходила по механизму пленочной диффузии [127].

Карбонизат, полученный термической обработкой жома, исследовался для удаления красителя марки «Remazol Turquoise Blue-G 133» из реальных сточных вод. Определено, что максимальная сорбционная емкость сорбента по названному красителю невысока и составляет 47 мг/г при рН=1 и температуре раствора 25 °С. Выявлено, что равновесные данные по адсорбции названного красителя соответствуют модели Фрейндлиха, а кинетика процесса соответствует модели псевдвторого порядка. Установлено, внешний массоперенос и внутричастичная диффузия являются основными механизмами процесса. Термодинамические данные показали, что процесс сорбции был экзотермическим и самопроизвольным по природе [128]. В таких же вышеназванных условиях изучено извлечение красителя марки «Remazol Black B» из реальных сточных вод. Определено, что максимальная сорбционная емкость сорбента по данному красителю составила 80 мг/г. В отличие от данных работы [128], определено, что изотерма адсорбции лучше описывается моделью Ленгмюра [129], а механизм процесса соответствует указанному выше.

Также АУ, полученный из ЖСС в атмосфере азота при 600 °С в течение 1.5 ч, использовался для адсорбции фенола из модельных растворов при исходных концентрациях загрязнителя 25–500 мг/дм³ и при температурах 25, 40 и 60 °С. Найдено, что максимальная адсорбционная емкость по фенолу составила 89.5 мг/г при температуре 60 °С и рН=6.0. Выявлено, что изотермы адсорбции более точно описываются моделью Ленгмюра, а кинетика процесса соответствует модели псевдвторого порядка. Термодинамические расчеты показывают, что адсорбция фенола на сорбенте носит эндотермический и самопроизвольный характер [130].

Выводы

Обобщены литературные данные по использованию свекловичного жома в качестве сорбционного материала для удаления ионов металлов, красителей, нефти и нефтепродуктов из водных сред. Выявлено, что в большинстве случаев изотермы адсорбции ионов металлов и красителей более точно описываются моделью Ленгмюра, а кинетика процесса соответствует модели псевдвторого порядка. Показано, что химическая модификация способствует увеличению сорбционных характеристик по различным загрязняющим веществам. Также выявлено, что в большинстве случаев адсорбция носит физический характер. Учитывая многотоннажность образования ЖСС, последний является перспективным прекурсором для получения активированных углей и карбонизатов, которые также являются эффективными сорбентами для извлечения ионов металлов, красителей и нефтепродуктов из модельных и реальных сточных вод.

Финансирование

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Chakraborty R., Asthana A., Singh A.K., Jain B., Susan A.B.H. Adsorption of heavy metal ions by various low-cost adsorbents: a review // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. 2022. Vol. 102, no. 2. Pp. 342–379. DOI: 10.1080/03067319.2020.1722811.
2. Othmani A., Magdouli S., Kumar P.S., Kapoor A., Chellam P.V., Gökkuş Ö. Agricultural waste materials for adsorptive removal of phenols, chromium (VI) and cadmium (II) from wastewater: A review // Environmental Research. 2022. Vol. 204. Article 111916. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111916.
3. Ogunlalu O., Oyekunle I.P., Iwuozor K.O., Aderibigbe A.D., Emenike E.C. Trends in the mitigation of heavy metal ions from aqueous solutions using unmodified and chemically-modified agricultural waste adsorbents // Current Research in Green and Sustainable Chemistry. 2021. Vol. 4. Article 100188. DOI: 10.1016/j.crgsc.2021.100188.
4. Joseph L., Jun B.M., Flora J.R., Park C.M., Yoon Y. Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: A review // Chemosphere. 2019. Vol. 229. Pp. 142–159. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.198.
5. Bhattacharjee C., Dutta S., Saxena V.K. A review on biosorptive removal of dyes and heavy metals from wastewater using watermelon rind as biosorbent // Environmental Advances. 2020. Vol. 2. Article 100007. DOI: 10.1016/j.envadv.2020.100007.
6. Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Svergzova S.V. Onion (*Allium cepa*) processing waste as a sorption material for removing pollutants from aqueous media // Biointerface Research in Applied Chemistry. 2022. vol. 12, no. 3. Pp. 3173–3185. DOI: 10.33263/BRIAC123.31733185.
7. Shaikhiev I.G., Kraysman N.V., Svergzova S.V. Using cucurbits by-products as reagents for disposal of pollutants from water environments (a literature review) // Biointerface Research in Applied Chemistry. 2021. vol. 11, no. 5. Pp. 12689–12705. DOI: 10.33263/BRIAC115.1268912705.
8. Bilal M., Ihsanullah I., Younas M., Shah M.U.H. Recent advances in applications of low-cost adsorbents for the removal of heavy metals from water: A critical review // Separation and Purification Technology. 2021. Vol. 278. Article 119510. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.119510.
9. Шайхиев И.Г., Свергузова С.В., Шайхиева К.И., Дебердеев Т.Р. Использование отходов от переработки ржи (*Secale cereale*) в качестве сорбционных материалов для удаления загрязняющих веществ из водных сред // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2023. №2. С. 2–10. DOI: 10.31044/1994-6260-2023-0-2-2-10.
10. Шайхиева К.И., Фридланд С.В., Свергузова С.В. Использование биомассы и отходов от переработки фасоли (*Phaseolus vulgaris*) и гороха (*Pisum sativum*) в качестве сорбционных материалов для удаления загрязнителей из водных сред (обзор литературы) // Химия растительного сырья. 2021. №4. С. 47–64. DOI: 10.14258/jcprm.2021049125.
11. Ighalo J.O., Adeniyi A.G. Adsorption of pollutants by plant bark derived adsorbents: an empirical review // Journal of Water Process Engineering. 2020. Vol. 35. Article 101228. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101228.

12. Şen A., Pereira H., Olivella M.A., Villaescusa I. Heavy metals removal in aqueous environments using bark as a bio-sorbent // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2015. Vol. 12. Pp. 391–404. DOI: 10.1007/s13762-014-0525-z.
13. Meez E., Rahdar A., Kyzas G.Z. Sawdust for the removal of heavy metals from water: a review // *Molecules*. 2021. Vol. 26, no. 14. Article 4318. DOI: 10.3390/molecules26144318.
14. Шайхиев И.Г., Нгуен Т.К.Т., Шайхиева К.И. Использование компонентов деревьев рода *Acacia* для удаления поллютантов из природных и сточных вод. 1. Ионы тяжелых металлов // *Вестник Технологического университета*. 2017. Т. 20, №3. С. 171–179.
15. Шайхиев И.Г., Нгуен Т.К.Т., Шайхиева К.И. Использование компонентов деревьев рода *Acacia* для удаления поллютантов из природных и сточных вод. 2. Органические соединения // *Вестник Технологического университета*. 2017. Т. 20, №11. С. 153–155.
16. Шайхиев И.Г. Использование компонентов деревьев рода *Quercus* в качестве сорбционных материалов для удаления поллютантов из воды. Обзор литературы // *Вестник технологического университета*. 2017. Т. 20, №5. С. 151–160.
17. 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.
18. Шайхиев И.Г., Шайхиева К.И. Использование компонентов хвойных деревьев для удаления поллютантов из водных сред. 1. Сосновые // *Вестник Технологического университета*. 2016. Т. 19, №4. С. 127–141.
19. Шайхиев И.Г., Шайхиева К.И. Использование компонентов хвойных деревьев для удаления поллютантов из водных сред. 2. Еловые // *Вестник Технологического университета*. 2016. Т. 19, №5. С. 161–165.
20. Шайхиев И.Г., Шайхиева К.И. Использование компонентов хвойных деревьев для удаления поллютантов из водных сред. 3. Пихтовые // *Вестник Технологического университета*. 2016. Т. 19, №6. С. 160–164.
21. Славянский А.А., Митрошина Д.П., Грибкова В.А., Ермолаев В.А. Основные отходы сахарного производства и их использование // *Сахар*. 2022. №12. С. 30–37.
22. Протасова М.В., Миронов С.Ю., Лукьянчикова О. В., Бабкина Л.А. Перспективные направления использования отходов сахарного производства // *Auditorium*. 2016. №2(10). С. 32–41.
23. Кулишов Б.А., Зимагулова Л.А., Ле Ань Туан, Канарский А.В. Технические материалы на основе свекловичного жома // *Вестник Технологического университета*. 2015. Т. 18, №23. С. 72–78.
24. Finkenstadt V.L. A review on the complete utilization of the sugarbeet // *Sugar Technology*. 2014. Vol. 16, no. 4. Pp. 339–346. DOI: 10.1007/s12355-013-0285-y.
25. Радчиков В.Ф., Цай В.П., Гурин В.К., Кот А.Н., Сапсалева Т.Л. Жом в кормлении крупного рогатого скота // *Сахар*. 2016. №1. С. 52–55.
26. Сабетова Л.А., Левина М.В. Направления использования вторичных отходов свеклосахарного производства // *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*. 2017. №5(19). С. 132–141.
27. Буряков Н.П., Бурякова М.А., Медведев И.К. Использование свекловичного жома в кормлении сельскохозяйственных животных // *Сахар*. 2022. №9. С. 30–33.
28. Jiménez-Moreno E., Frikha M., de Coca-Sinova A., García J., Mateos G.G. Oat hulls and sugar beet pulp in diets for broilers 1. Effects on growth performance and nutrient digestibility // *Animal Feed Science and Technology*. 2013. Vol. 182. Pp. 33–43. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2013.03.011.
29. Гурин А.Г., Басов Ю.В., Гнеушева В.В. Жом как ценнейший продукт сахарного производства // *Russian Agricultural Science Review*. 2015. №5(5-1). С. 251–255.
30. Балабина И.П., Проценко Е.П., Алферова Е.Ю., Косолапова Н.И., Мирошниченко О.В. Утилизация органических отходов от сахарной промышленности компостированием // *Экология урбанизированных территорий*. 2019. №4. С. 27–33. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-14027.
31. Brachi P., Riianova E., Miccio M., Miccio F., Ruoppolo G., Chirone R. Valorization of sugar beet pulp via torrefaction with a focus on the effect of the preliminary extraction of pectins // *Energy & Fuels*. 2017. Vol. 31(9). Pp. 9595–9604. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b01766.
32. Донченко Л.В. Свекловичный жом – стабильный промышленный источник пектина в России // *Сахар*. 2018. №7. С. 46–49.
33. Fernández-Delgado M., del Amo-Mateos E., Coca M., López-Linares J.C., García-Cubero M.T., Lucas S. Enhancement of industrial pectin production from sugar beet pulp by the integration of surfactants in ultrasound-assisted extraction followed by diafiltration/ultrafiltration // *Industrial Crops and Products*. 2023. Vol. 194. Article 116304. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.116304.
34. Семенихин С.О., Городецкий В.О., Лукьяненко М.В., Даишева Н.М. Современные исследования в области получения пищевых волокон из свекловичного жома // *Новые технологии*. 2020. Т. 5, №1. С. 48–57. DOI: 10.24411/2072-0920-2020-10105.
35. Передня В.И., Бакач Н.Г., Жилич Е.Л., Кувшинов А.А. Инновационные технологии и комплекты оборудования для производства кормовых добавок на основе отходов от переработки сахарной свеклы и рапса // *Вестник ВНИИМЖ*. 2019. №4(36). С. 212–217.
36. Погарелова Ю.Н., Бондаренко Ж.В. Новые направления использования свекловичного жома в республике Беларусь // *Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология*. 2009. №1(4). С. 266–269.

37. Panagiotopoulos J.A., Bakker R.R., de Vrije T., Urbaniec K., Koukios E.G., Claassen P.A. Prospects of utilization of sugar beet carbohydrates for biological hydrogen production in the EU // *Journal of Cleaner Production*. 2010. Vol. 18. Pp. S9–S14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.02.025.
38. Berlowska J., Pielech-Przybylska K., Balcerek M., Cieciera W., Borowski S., Kregiel D. Integrated bioethanol fermentation/anaerobic digestion for valorization of sugar beet pulp // *Energies*. 2017. Vol. 10, no. 9. Article 1255. DOI: 10.3390/en10091255.
39. Vučurović D., Bajić B., Vučurović V., Jevtić-Mučibabić R., Dodić S. Bioethanol production from spent sugar beet pulp – process modeling and cost analysis // *Fermentation*. 2022. Vol. 8, no. 3. Article 114. DOI: 10.3390/fermentation8030114.
40. Ziemiński K., Kowalska-Wentel M. Effect of enzymatic pretreatment on anaerobic co-digestion of sugar beet pulp silage and vinasse // *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 180. Pp. 274–280. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.12.035.
41. Cárdenas-Fernández M., Bawn M., Hamley-Bennett C., Bharat P.K., Subrizi F., Suhaili N., Ward D.P., Bourdin S., Dalby P.A., Hailes H.C., Hewitson P., Svetlana Ignatova S., Kontoravdi C., Shah D.J.N., Sheppard T.D., Warda J.M., Lye G.J. An integrated biorefinery concept for conversion of sugar beet pulp into value-added chemicals and pharmaceutical intermediates // *Faraday Discussions*. 2017. Vol. 202. Pp. 415–431. DOI: 10.1039/c7fd00094d.
42. Семенихин С.О., Ачмиз А.Д., Лукьяненко М.В. Обоснование применения свекловичного жома в качестве сырья для производства арабиногалактанов // *X всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Актуальные вопросы биологии, селекции, технологии возделывания и переработки масличных и других технических культур»*. 2019. С. 173–177.
43. Aarabi A., Mizani M., Honarvar M. The use of sugar beet pulp lignin for the production of vanillin // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2017. Vol. 94A. Pp. 345–354. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2016.10.004.
44. Berlowska J., Binczarski M., Dudkiewicz M., Kalinowska H., Witonska I.A., Stanishevsky A.V. A low-cost method for obtaining high-value bio-based propylene glycol from sugar beet pulp // *RSC Advances*. 2015. Vol. 5, no. 3. Pp. 2299–2304. DOI: 10.1039/x0xx00000x.
45. Mohdaly A.A., Sarhan M.A., Smetanska I., Mahmoud A. Antioxidant properties of various solvent extracts of potato peel, sugar beet pulp and sesame cake // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2010. Vol. 90, no. 2. Pp. 218–226. DOI: 10.1002/jsfa.3796.
46. Özer A., Tümen F., Bildik M. Cr (III) removal from aqueous solutions by depectinated sugar beet pulp // *Environmental Technology*. 1997. Vol. 18, no. 9. Pp. 893–901. DOI: 10.1080/09593331808616608.
47. Muanda M., Farag H., Malash G. The Use of agricultural waste in solving of environmental problems in Democratic Republic of the Congo // *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*. 2022. Vol. 33, no. 2. Pp. 336–348.
48. Altundogan H.S. Cr (VI) removal from aqueous solution by iron (III) hydroxide-loaded sugar beet pulp // *Process Biochemistry*. 2005. Vol. 40, no. 3-4. Pp. 1443–1452. DOI: 10.1016/j.procbio.2004.06.027.
49. Demiral Y.F., Öztürk N. Adsorption of Cr (VI) From Aqueous Solution onto Sugar Beet Pulp and Hydrochloric Acid Modified Pulp // *Journal of Selcuk University Natural and Applied Science*. 2014. Pp. 321–330.
50. Reddad Z., Gerente C., Andres Y., Cloirec P.L. Mechanisms of Cr (III) and Cr (VI) removal from aqueous solutions by sugar beet pulp // *Environmental Technology*. 2003. Vol. 24, no. 2. Pp. 257–264. DOI: 10.1080/09593330309385557.
51. Rowell R.M. Removal of metal ions from contaminated water using agricultural residues // *2nd. International Conference on Environmentally-Compatible Forest Products «Ecowood, 2006»*. Oporto, Portugal, 2006. Pp. 241–250.
52. Aksu Z., İšoğlu İ.A. Removal of copper (II) ions from aqueous solution by biosorption onto agricultural waste sugar beet pulp // *Process Biochemistry*. 2005. Vol. 40, no. 9. Pp. 3031–3044. DOI: 10.1016/j.procbio.2005.02.004.
53. Huguenot D., Bois P., Jézéquel K., Cornu J.Y., Lebeau T. Selection of low cost materials for the sorption of copper and herbicides as single or mixed compounds in increasing complexity matrices // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 182, no. 1. Pp. 18–26. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.05.062.
54. Cornu J.Y., Huguenot D., Jezequel K., Lebeau T. Evaluation of sugar beet pulp efficiency for improving the retention of copper in stormwater basin // *Journal of Soils and Sediments*. 2013. Vol. 13. Pp. 220–229. DOI: 10.1007/s11368-012-0625-7.
55. Altundogan H.S., Arslan N.E., Tumen F. Copper removal from aqueous solutions by sugar beet pulp treated by NaOH and citric acid // *Journal of Hazardous Materials*. 2007. Vol. 149, no. 2. Pp. 432–439. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.04.008.
56. Ghazy S.E., Khedr A.E.S., Youssef H.M.M. Biosorptive-flotation of copper (II) from environmental water samples using sugar beet pulp as sorbent and oleic acid as surfactant // *Chemical Speciation & Bioavailability*. 2009. Vol. 21, no. 3. Pp. 131–140. DOI: 10.3184/095422909X457338.
57. Шайхиев И.Г., Бегишева В.Ю., Мавлетбаева А.И. Исследование экстрактов из жома сахарной свеклы в качестве реагентов для удаления ионов меди из модельных растворов // *Вестник Технологического университета*. 2016. Т. 19, №4. С. 145–149.
58. Овчинникова А.А., Шайхиев И.Г. Влияние различных факторов на эффективность сорбции ионов железа (III) жомом сахарной свеклы // *Вестник Технологического университета*. 2017. Т. 20, №15. С. 131–133.
59. Шайхиев И.Г., Овчинникова А.А. Исследование сорбции ионов железа (III) из модельных растворов с использованием модифицированного кислотами жома сахарной свеклы // *Вестник Технологического университета*. 2017. Т. 20, №4. С. 143–148.

60. Ma X., Li D., Wu Z., Zhang H., Chen X., Liu Z. Mercury removal by adsorption on pectin extracted from sugar beet pulp: optimization by response surface methodology // *Chemical Engineering & Technology*. 2016. Vol. 39, no. 2. Pp. 371–377. DOI: 10.1002/ceat.201400059.
61. Chwastowski J., Staroń P. Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies of manganese removal from aqueous solutions by adsorption process using beet pulp shreds as a biosorbent // *Desalination and Water Treatment*. 2021. Vol. 242. Pp. 117–127. DOI: 10.5004/dwt.2021.27844.
62. Ahmed S.A., El-Roudi A.M., Salem A.A. Removal of Mn (II) from ground water by solid wastes of sugar industry // *Journal of Environmental Science and Technology*. 2015. Vol. 8, no. 6. Pp. 338–351. DOI: 10.3923/jest.2015.338.351.
63. Sadat S.M.O., Kucukcongur S., Turkyilmaz M. Nickel adsorption from waters onto Fe₃O₄/sugar beet pulp nanocomposite // *International Journal of Phytoremediation*. 2023. Vol. 25, no. 5. Pp. 572–585. DOI: 10.1080/15226514.2022.2093832.
64. Tamova M.Yu., Barashkina E.V., Tretyakova N.R., Zhuravlev R.A., Penov N.D. Beet pulp dietary fiber exposed to an extremely low-frequency electromagnetic field: detoxification properties // *Foods and Raw Materials*. 2021. Vol. 9, no. 1. Pp. 2–9. DOI: 10.21603/2308-4057-2021-1-2-9.
65. Reddad Z., Gerente C., Andres Y., Le Cloirec P. Lead removal by a natural polysaccharide in membrane reactors // *Water Science and Technology*. 2004. Vol. 49, no. 1. Pp. 163–170. DOI: 10.2166/wst.2004.0048.
66. Zolgharnein J., Asanjarani N., Shariatmanesh T. Removal of thallium (I) from aqueous solution using modified sugar beet pulp // *Toxicological & Environmental Chemistry*. 2011. Vol. 93, no. 2. Pp. 207–214. DOI: 10.1080/02772248.2010.523424.
67. Nuhanović M., Grebo M., Draganović S., Memić M., Smječanin N. Uranium (VI) biosorption by sugar beet pulp: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2019. Vol. 322. Pp. 2065–2078. DOI: 10.1007/s10967-019-06877-z.
68. Nuhanović M., Smječanin N., Curic N., Vinković A. Efficient removal of U (VI) from aqueous solution using the biocomposite based on sugar beet pulp and pomelo peel // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021. Vol. 328. Pp. 347–358. DOI: 10.1007/s10967-021-07651-w.
69. Свергузова С.В., Ельников Д.А., Свергузова Ж.А. О возможности использования отхода сахарной промышленности для очистки сточных вод // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2011. №3. С. 128–133.
70. Castro L., Blázquez M.L., González F., Muñoz J.A., Ballester A. Biosorption of Zn (II) from industrial effluents using sugar beet pulp and *F. vesiculosus*: From laboratory tests to a pilot approach // *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 598. Pp. 856–866. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.138.
71. Reddad Z., Gérente C., Andrès Y., Thibault J.F., Le Cloirec P. Cadmium and lead adsorption by a natural polysaccharide in MF membrane reactor: experimental analysis and modelling // *Water Research*. 2003. Vol. 37, no. 16. Pp. 3983–3991. DOI: 10.1016/S0043-1354(03)00295-1.
72. Pehlivan E., Yanik B.H., Ahmetli G., Pehlivan M. Equilibrium isotherm studies for the uptake of cadmium and lead ions onto sugar beet pulp // *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99, no. 9. Pp. 3520–3527. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.07.052.
73. Arslanoğlu H., Tümen F. Sitrik asitle modifiye edilmiş seker pancarı küspesi ile sulu çözümlerden Pb(II) ve Cd(II) giderilmesi // *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2015. Vol. 27, no. 1. Pp. 85–99.
74. Kukić D., Šćiban M., Brdar M., Vasić V., Takačić A., Antov M., Prodanović J. Sugar beet lignocellulose waste as biosorbents: surface functionality, equilibrium studies and artificial neural network modeling // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2023. Vol. 20, no. 3. Pp. 2503–2516. DOI: 10.1007/s13762-022-04140-9.
75. Reddad Z., Gérente C., Andrès Y., Ralet M.C., Thibault J.F., Le Cloirec P. Ni (II) and Cu (II) binding properties of native and modified sugar beet pulp // *Carbohydrate Polymers*. 2002. Vol. 49, no. 1. Pp. 23–31.
76. Yigit K.I., Gursoy S.S. Nickel and copper removal from aqueous media using polyaniline/sugar beet pulp (PANI/SBP) composite // *Akademik Gıda*. 2020. Vol. 18, no. 4. Pp. 357–366. DOI: 10.24323/akademik-gida.850843.
77. Gao Z., Liu Q., Wang H., Xia N., Zhu S. Adsorption mechanism of Cu (II) and Pb (II) from aqueous solutions using citric acid modified beet pulp fiber (CDSBP) and Fe-modified CDSBP // *Desalination and Water Treatment*. 2019. Vol. 166. Pp. 321–333.
78. Pehlivan E., Cetin S., Yanik B.H. Equilibrium studies for the sorption of zinc and copper from aqueous solutions using sugar beet pulp and fly ash // *Journal of Hazardous Materials*. 2006. Vol. 135, no. 1-3. Pp. 193–199. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.11.049.
79. Ahmed S.A. Removal of lead and sodium ions from aqueous media using natural wastes for desalination and water purification // *Desalination and Water Treatment*. 2016. Vol. 57, no. 19. Pp. 8911–8926. DOI: 10.1080/19443994.2015.1024745.
80. Dronnet V.M., Axelos M.A.V., Renard C.M.G.C., Thibault J.F. Improvement of the binding capacity of metal cations by sugar-beet pulp. 1. Impact of cross-linking treatments on composition, hydration and binding properties // *Carbohydrate Polymers*. 1998. Vol. 35, no. 1-2. Pp. 29–37.
81. Langenhorst W.T.J., Tels M., Vlugter J.C., Waterman H.I. Cation exchangers on a sugar-beet pulp base. Application for decontaminating radioactive waste water // *Journal of Biochemical and Microbiological Technology and Engineering*. 1961. Vol. 3, no. 1. Pp. 7–20.
82. Gérente C., Du Mesnil P.C., Andrès Y., Thibault J.F., Le Cloirec P. Removal of metal ions from aqueous solution on low cost natural polysaccharides: sorption mechanism approach // *Reactive and Functional Polymers*. 2000. Vol. 46, no. 2. Pp. 135–144. DOI: 10.1016/S1381-5148(00)00047-X.

83. Gerente C., Reddad Z., Andres Y., Le Cloirec P. Competitive adsorption of metals and organics onto a low cost natural polysaccharide // *Environmental Technology*. 2004. Vol. 25, no. 2. Pp. 219–225. DOI: 10.1080/09593330409355455.
84. Liu Q., Gao Z., Li N., Zhu S. Biosorption of Ca (II), Cu (II), Pb (II) from aqueous solution by a novel adsorbent of ferric hydroxide-loaded sugar beet pulp // *Desalination and Water Treatment*. 2020. Vol. 174. Pp. 336–343. DOI: 10.5004/dwt.2020.24891.
85. Reddad Z., Gerente C., Andres Y., Le Cloirec P. Modeling of single and competitive metal adsorption onto a natural polysaccharide // *Environmental Science & Technology*. 2002. Vol. 36, no. 10. Pp. 2242–2248. DOI: 10.1021/es010237a.
86. Reddad Z., Gerente C., Andres Y., Le Cloirec P. Comparison of the fixation of several metal ions onto a low-cost biopolymer // *Water Science and Technology: Water Supply*. 2002. Vol. 2, no. 5-6. Pp. 217–224. DOI: 10.2166/ws.2002.0172.
87. Reddad Z., Gerente C., Andres Y., Le Cloirec P. Adsorption of several metal ions onto a low-cost biosorbent: kinetic and equilibrium studies // *Environmental Science & Technology*. 2002. Vol. 36, no. 9. Pp. 2067–2073. DOI: 10.1021/es0102989.
88. Dronnet V.M., Renard C.M.G.C., Axelos M.A.V., Thibault J.F. Binding of divalent metal cations by sugar-beet pulp // *Carbohydrate Polymers*. 1997. Vol. 34, no. 1-2. Pp. 73–82.
89. Dronnet V.M., Axelos M.A.V., Renard C.M.G.C., Thibault J.F. Improvement of the binding capacity of metal cations by sugar-beet pulp. 2. Binding of divalent metal cations by modified sugar-beet pulp // *Carbohydrate Polymers*. 1998. Vol. 35, no. 3-4. Pp. 239–247.
90. Hassan M.L., Kassem N.F., Abd El-Kader A.H. Novel Zr (IV)/sugar beet pulp composite for removal of sulfate and nitrate anions // *Journal of Applied Polymer Science*. 2010. Vol. 117, no. 4. Pp. 2205–2212. DOI: 10.1002/app.32063.
91. Bharathi K.S., Ramesh S.T. Removal of dyes using agricultural waste as low-cost adsorbents: a review // *Applied Water Science*. 2013. Vol. 3. Pp. 773–790. DOI: 10.1007/s13201-013-0117-y.
92. Bushra R., Mohamad S., Alias Y., Jin Y., Ahmad M. Current approaches and methodologies to explore the perceptive adsorption mechanism of dyes on low-cost agricultural waste: A review // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2021. Vol. 319. Article 111040. DOI: 10.1016/j.micromeso.2021.111040.
93. Nayagam J.O.P., Prasanna K. Utilization of shell-based agricultural waste adsorbents for removing dyes: A review // *Chemosphere*. 2022. Vol. 291. Article 132737. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132737.
94. Kumar P.S., Joshiba G.J., Femina C.C., Varshini P., Priyadharshini S., Karthick M.A., Jothirani R. A critical review on recent developments in the low-cost adsorption of dyes from wastewater // *Desalination and Water Treatment*. 2019. Vol. 172. Pp. 395–416. DOI: 10.5004/dwt.2019.24613.
95. Hamad H.N., Idrus S. Recent developments in the application of bio-waste-derived adsorbents for the removal of methylene blue from wastewater: a review // *Polymers*. 2022. Vol. 14, no. 4. Article 783. DOI: 10.3390/polym14040783.
96. Vucurovic V.M., Razmovski R.N., Tekic M.N. Methylene blue (cationic dye) adsorption onto sugar beet pulp: Equilibrium isotherm and kinetic studies // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2012. Vol. 43. Pp. 108–111. DOI: 10.1016/j.jtice.2011.06.008.
97. Gao Y., Zeng J., Zhu S., Liu Q. Co-modification of lignocellulosic biomass by maleic anhydride and ferric hydroxide for the highly efficient biosorption of methylene blue // *New Journal of Chemistry*. 2021. Vol. 45, no. 42. Pp. 19678–19690. DOI: 10.1039/d1nj03259c.
98. Aksu Z., Isoglu I.A. Use of agricultural waste sugar beet pulp for the removal of Gemazol turquoise blue-G reactive dye from aqueous solution // *Journal of Hazardous Materials*. 2006. Vol. 137, no. 1. Pp. 418–430. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.02.019.
99. Aksu Z., Isoglu I.A. Use of dried sugar beet pulp for binary biosorption of Gemazol Turquoise Blue-G reactive dye and copper(II) ions: Equilibrium modeling // *Chemical Engineering Journal*. 2007. Vol. 127, no. 1-3. Pp. 177–188. DOI: 10.1016/j.ccej.2006.09.014.
100. Akar S.T., Celik S., Tunc D., Balk Y.Y., Akar T. Biosorption potential of surface-modified waste sugar beet pulp for the removal of Reactive Yellow 2 (RY2) anionic dye // *Turkish Journal of Chemistry*. 2016. Vol. 40. Pp. 1044–1054. DOI: 10.3906/kim-1606-4.
101. Türk F.N., Çiftçi H., Arslanoğlu H. Removal of Basic yellow 51 dye by using ion exchange resin obtained by modification of byproduct sugar beet pulp // *Sugar Technology*. 2023. Vol. 25, no. 3. Pp. 569–579. DOI: 10.1007/s12355-022-01207-2.
102. Karimi-Nazarabad M., Azizi-Toupkanloo H. Functionalization of beet waste by cross-linking to attach amine groups for efficient sorption of reactive black 5 anionic dye // *Journal of the Iranian Chemical Society*. 2022. Vol. 19. Pp. 1527–1537. DOI: 10.1007/s13738-021-02398-3.
103. Dursun A.Y., Tepe O. Removal of Chemazol Reactive Red 195 from aqueous solution by dehydrated beet pulp carbon // *Journal of Hazardous Materials*. 2011. Vol. 194. Pp. 303–311. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.07.105.
104. Akar S.T., Yilmazer D., Celik S., Balk Y.Y., Akar T. Effective biodecolorization potential of surface modified lignocellulosic industrial waste biomass // *Chemical Engineering Journal*. 2015. Vol. 259. Pp. 286–292. DOI: 10.1016/j.ccej.2014.07.112.
105. Akar S.T., Yilmazer D., Celik S., Balk Y.Y., Akar T. On the utilization of a lignocellulosic waste as an excellent dye remover: Modification, characterization and mechanism analysis // *Chemical Engineering Journal*. 2013. Vol. 229. Pp. 257–266. DOI: 10.1016/j.ccej.2013.06.009.

106. Aksu Z., Yazgi Z.A., Yücel H.G. pH shifting effect on anionic dye removal by surfactant-modified sugar beet pulp: Modeling of column studies // *Journal of the Indian Chemical Society*. 2023. Vol. 100, no. 2. Article 100899. DOI: 10.1016/j.jics.2023.100899.
107. Zhang Y., Yu X., Zhu S. Quaternization of sugar beet pulp and its adsorption property to Nuclear Fast Red // *Biomass Chemical Engineering*. 2021. Vol. 55, no. 2. Pp. 23–30. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5854.2021.02.004.
108. Demir F., Lacin O., Sincar H. Investigation of biosorption behavior of red-254, a textile waste paint on activated sugar beet pulp // *Global NEST Journal*. 2023. Vol. 25, no. 3. Pp. 17–26. DOI: 10.30955/gnj.003872.
109. Gezer B. Removal of Pb (II) from aqueous solution with Reactive Red 198 and carbonization of sugar beet pulp with citric acid // *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*. 2019. Vol. 3, no. 4. Pp. 250–256. DOI: 10.31015/jaefs.2019.4.9.
110. Harifi-Mood A.R., Hadavand-Mirzaie F. Adsorption of Basic violet 16 from aqueous solutions by waste sugar beet pulp: kinetic, thermodynamic, and equilibrium isotherm studies // *Chemical Speciation & Bioavailability*. 2015. Vol. 27, no. 1. Pp. 8–14. DOI: 10.1080/09542299.2015.1023086.
111. Malekbala M.R., Hosseini S., Yazdi S.K., Soltani S.M., Malekbala M.R. The study of the potential capability of sugar beet pulp on the removal efficiency of two cationic dyes // *Chemical Engineering Research and Design*. 2012. Vol. 90, no. 5. Pp. 704–712. DOI: 10.1016/j.cherd.2011.09.010.
112. Bahar N. Removal of reactive dyes from aqueous solutions by sugar beet pulp and modified products of sugar beet pulp in batch system // *International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering*. 2014. Vol. 74. Pp. 49–53.
113. Çelik S. Kitosan-şeker pancarı posası biyokompozit sorban sisteminin anyonik boyarmadde biyosorpsiyon potansiyeli // *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 2021. Vol. 11, no. 2. Pp. 325–338. DOI: 10.17714/gumusfenbil.732646.
114. He H., Gao Y., Zeng J., Yu M., Zhu S. Quaternary phosphonium modification of esterified sugar beet pulp with maleic anhydride and its biosorption property on anionic and cationic dyes // *Chemical Engineering Research and Design*. 2023. Vol. 195. Pp. 404–417. DOI: 10.1016/j.cherd.2023.05.030.
115. Зайцева Е.А., Еремин И.С. Вторичное использование жома сахарной свеклы // *Сборник статей II Международной научно-технической конференции «Интеграция и развитие научно-технического и образовательного сотрудничества – взгляд в будущее»*. Минск, 2020. С. 75–77.
116. Зайцева Е.А., Еремин И.С. Сорбционные свойства материалов, изготовленных из отходов агропромышленного комплекса // *Сборник статей III Международной научно-технической конференции «Эколого-экономические и технологические аспекты устойчивого развития Республики Беларусь и Российской Федерации»*. Минск, 2021. Т. 2. С. 62–65.
117. Мещеряков С.В., Еремин И.С., Сидоренко Д.О., Котелев М.С., Зайцева Е.А., Лаврентьев А.Е. Получение сорбирующего материала на основе жома сахарной свеклы // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2019. №6. С. 10–16.
118. Платонова А.М., Мельникова А.С., Кострюкова Н.В. Возможность использования отходов производства в качестве сорбентов на примере свекловичного жома // *III Международная научно-практическая конференция «Проблемы обеспечения безопасности»*. Уфа, 2021. С. 164–167.
119. Шайхiev И.Г., Степанова С.В., Шайхиева К.И., Мавлетбаева А.И. Исследование отхода от переработки сахарной свеклы в качестве сорбционного материала минеральных масел // *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. Т. 18. №17. С. 258–261.
120. Шайхiev И.Г., Степанова С.В., Шайхиева К.И., Мавлетбаева А.И. Исследование возможности использования жома сахарной свеклы в качестве сорбционного материала легких нефтепродуктов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. Т. 18, №13. С. 246–248.
121. Özer A., Tanyildizi M.S., Tümen F. Study of cadmium adsorption from aqueous solution on activated carbon from sugar beet pulp // *Environmental Technology*. 1998. Vol. 19, no. 11. Pp. 1119–1125. DOI: 10.1080/09593331908616770.
122. Ozer A., Tumen F. Cd (II) adsorption from aqueous solution by activated carbon from sugar beet pulp impregnated with phosphoric acid // *Fresenius Environmental Bulletin*. 2003. Vol. 12, no. 9. Pp. 1050–1058.
123. Altundogan H.S., Bahar N., Mujde B., Tumen F. The use of sulphuric acid-carbonization products of sugar beet pulp in Cr (VI) removal // *Journal of Hazardous Materials*. 2007. Vol. 144, no. 1-2. Pp. 255–264. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.018.
124. Zhao J., Yu L., Zhou F., Ma H., Yang K., Wu G. Synthesis and characterization of activated carbon from sugar beet residue for the adsorption of hexavalent chromium in aqueous solutions // *RSC Advances*. 2021. Vol. 11, no. 14. Pp. 8025–8032. DOI: 10.1039/d0ra09644j.
125. Ghorbani F., Kamari S., Zamani S., Akbari S., Salehi M. Optimization and modeling of aqueous Cr (VI) adsorption onto activated carbon prepared from sugar beet bagasse agricultural waste by application of response surface methodology // *Surfaces and Interfaces*. 2020. Vol. 18. Article 100444. DOI: 10.1016/j.surfin.2020.100444.
126. Ozer A., Tumen F. Cu (II) adsorption from aqueous solutions on sugar beet pulp carbon // *European Journal of Mineral Processing & Environmental Protection*. 2005. Vol. 5, no. 1. Pp. 26–34.
127. Li D., Yan J., Liu Z., Liu Z. Adsorption kinetic studies for removal of methylene blue using activated carbon prepared from sugar beet pulp // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2016. Vol. 13. Pp. 1815–1822. DOI: 10.1007/s13762-016-1012-5.

128. Dursun A.Y., Tep O., Dursu G. Use of carbonised beet pulp carbon for removal of Remazol Turquoise Blue-G 133 from aqueous solution // *Environmental Science and Pollution Research*. 2013. Vol. 20. Pp. 431–442. DOI: 10.1007/s11356-012-0946-5.
129. Dursun A.Y., Tep O., Usl G., Dursu G., Saatci Y. Kinetics of Remazol Black B adsorption onto carbon prepared from sugar beet pulp // *Environmental Science and Pollution Research*. 2013. Vol. 20. Pp. 2472–2483. DOI: 10.1007/s11356-012-1133-4.
130. Dursun G., Çiçek H., Dursun A.Y. Adsorption of phenol from aqueous solution by using carbonised beet pulp // *Journal of Hazardous Materials*. 2005. Vol. 125, no. 1-3. Pp. 175–182. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.05.023.

Поступила в редакцию 19 сентября 2023 г.

После переработки 30 октября 2023 г.

Принята к публикации 6 июня 2024 г.

Shaikhieva K.I.¹, Stepanova S.V.¹, Shaikhiiev I.G.¹, Sverguzova S.V.^{2} USE OF NATIVE AND MODIFIED SAMPLES OF SUGAR BEET PULP (*BETA VULGARIS*) AS SORPTION MATERIALS TO REMOVE POLLUTANTS FROM WATER ENVIRONMENTS*

¹ Kazan National Research Technological University, K. Marksa st., 68, Kazan, 420015, Russia

² Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Kostyukova st., 46, Belgorod, 308012, Russia, pe@intbel.ru

This review article summarizes foreign and domestic literature data on the use of sugar beet pulp as a sorption material for the removal of metal ions, dyes, oil and oil products from aqueous media. Beet pulp is an affordable, annually renewable, cheap, efficient waste from the processing of agricultural raw materials. With an average sugar yield of 10-12% by weight of processed beets, about 83% of fresh beet pulp is formed. In the 2021/2022 season, Russian sugar refineries processed 37.5 million tons of sugar beet, while producing 30 million tons of raw sugar beet pulp. The composition of beet pulp is briefly shown, as well as the ways of its use as a secondary material resource. It was found that in most cases the adsorption isotherms of ions of various metals and dyes are more accurately described by the Langmuir model, and the kinetics of the process corresponds to the pseudo-second order model. It is shown that chemical modification contributes to an increase in the sorption characteristics of native and modified pulp samples for various pollutants. It was also found that in most cases adsorption is of a physical nature. Given the multi-tonnage formation of beet pulp, the latter is a promising precursor for the production of activated carbons and carbonizates, which are also effective sorbents for the extraction of metal ions, dyes and oil products from model and real wastewater.

Keywords: sugar beet pulp, sorption material, pollutants, aquatic environment, removal, activated carbon.

For citing: Shaikhieva K.I., Stepanova S.V., Shaikhiiev I.G., Sverguzova S.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2024, no. 3, pp. 49–70. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20240313555.

References

1. Chakraborty R., Asthana A., Singh A.K., Jain B., Susan A.B.H. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2022, vol. 102, no. 2, pp. 342–379. DOI: 10.1080/03067319.2020.1722811.
2. Othmani A., Magdouli S., Kumar P.S., Kapoor A., Chellam P.V., Gökkuş Ö. *Environmental Research*, 2022, vol. 204, article 111916. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111916.
3. Ogunlalu O., Oyekunle I.P., Iwuozor K.O., Aderibigbe A.D., Emenike E.C. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 2021, vol. 4, article 100188. DOI: 10.1016/j.crgsc.2021.100188.
4. Joseph L., Jun B.M., Flora J.R., Park C.M., Yoon Y. *Chemosphere*, 2019, vol. 229, pp. 142–159. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.198.
5. Bhattacharjee C., Dutta S., Saxena V.K. *Environmental Advances*, 2020, vol. 2, article 100007. DOI: 10.1016/j.envadv.2020.100007.
6. Shaikhiiev I.G., Kraysman N.V., Sverguzova S.V. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2022, vol. 12, no. 3, pp. 3173–3185. DOI: 10.33263/BRIAC123.31733185.
7. Shaikhiiev I.G., Kraysman N.V., Sverguzova S.V. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2021, vol. 11, no. 5, pp. 12689–12705. DOI: 10.33263/BRIAC115.1268912705.

* Corresponding author.

8. Bilal M., Ihsanullah I., Younas M., Shah M.U.H. *Separation and Purification Technology*, 2021, vol. 278, article 119510. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.119510.
9. Shaykhiyev I.G., Svergzova S.V., Shaykhiyeva K.I., Deberdeyev T.R. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2023, no. 2, pp. 2–10. DOI: 10.31044/1994-6260-2023-0-2-2-10. (in Russ.).
10. Shaykhiyeva K.I., Fridland S.V., Svergzova S.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2021, no. 4, pp. 47–64. DOI: 10.14258/jcprm.2021049125. (in Russ.).
11. Ighalo J.O., Adeniyi A.G. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, vol. 35, article 101228. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101228.
12. Şen A., Pereira H., Olivella M.A., Villaescusa I. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, vol. 12, pp. 391–404. DOI: 10.1007/s13762-014-0525-z.
13. Meez E., Rahdar A., Kyzas G.Z. *Molecules*, 2021, vol. 26, no. 14, article 4318. DOI: 10.3390/molecules26144318.
14. Shaykhiyev I.G., Nguyen T.K.T., Shaykhiyeva K.I. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 171–179. (in Russ.).
15. Shaykhiyev I.G., Nguyen T.K.T., Shaykhiyeva K.I. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, no. 11, pp. 153–155. (in Russ.).
16. Shaykhiyev I.G. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, no. 5, pp. 151–160. (in Russ.).
17. Denisova T.R., Shaykhiyev I.G. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, no. 24, pp. 145–158. (in Russ.).
18. Shaykhiyev I.G., Shaykhiyeva K.I. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 4, pp. 127–141. (in Russ.).
19. Shaykhiyev I.G., Shaykhiyeva K.I. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 5, pp. 161–165. (in Russ.).
20. Shaykhiyev I.G., Shaykhiyeva K.I. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 6, pp. 160–164. (in Russ.).
21. Slavyanskiy A.A., Mitroshina D.P., Gribkova V.A., Yermolayev V.A. *Sakhar*, 2022, no. 12, pp. 30–37. (in Russ.).
22. Protasova M.V., Mironov S.Yu., Luk'yanchikova O.V., Babkina L.A. *Auditorium*, 2016, no. 2(10), pp. 32–41. (in Russ.).
23. Kulishov B.A., Zimagulova L.A., Le An' Tuan, Kanarskiy A.V. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 23, pp. 72–78. (in Russ.).
24. Finkenstadt V.L. *Sugar Technology*, 2014, vol. 16, no. 4, pp. 339–346. DOI: 10.1007/s12355-013-0285-y.
25. Radchikov V.F., Tsay V.P., Gurin V.K., Kot A.N., Sapsaleva T.L. *Sakhar*, 2016, no. 1, pp. 52–55. (in Russ.).
26. Sabetova L.A., Levina M.V. *Tekhnologii pishchevoy i pererabatyvayushchey promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya*, 2017, no. 5(19), pp. 132–141. (in Russ.).
27. Buryakov N.P., Buryakova M.A., Medvedev I.K. *Sakhar*, 2022, no. 9, pp. 30–33. (in Russ.).
28. Jiménez-Moreno E., Frikha M., de Coca-Sinova A., García J., Mateos G.G. *Animal Feed Science and Technology*, 2013, vol. 182, pp. 33–43. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2013.03.011.
29. Gurin A.G., Basov Yu.V., Gneusheva V.V. *Russian Agricultural Science Review*, 2015, no. 5(5-1), pp. 251–255. (in Russ.).
30. Balabina I.P., Protsenko Ye.P., Alferova Ye.Yu., Kosolapova N.I., Miroshnichenko O.V. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy*, 2019, no. 4, pp. 27–33. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-14027. (in Russ.).
31. Brachi P., Riianova E., Miccio M., Miccio F., Ruoppolo G., Chirone R. *Energy & Fuels*, 2017, vol. 31(9), pp. 9595–9604. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b01766.
32. Donchenko L.V. *Sakhar*, 2018, no. 7, pp. 46–49. (in Russ.).
33. Fernández-Delgado M., del Amo-Mateos E., Coca M., López-Linares J.C., García-Cubero M.T., Lucas S. *Industrial Crops and Products*, 2023, vol. 194, article 116304. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.116304.
34. Semenikhin S.O., Gorodetskiy V.O., Luk'yanenko M.V., Daisheva N.M. *Novyye tekhnologii*, 2020, vol. 5, no. 1, pp. 48–57. DOI: 10.24411/2072-0920-2020-10105. (in Russ.).
35. Perednya V.I., Bakach N.G., Zhilich Ye.L., Kuvshinov A.A. *Vestnik VNIIMZh*, 2019, no. 4(36), pp. 212–217. (in Russ.).
36. Pogarelova Yu.N., Bondarenko Zh.V. *Trudy BGTU. Seriya 2: Khimicheskiye tekhnologii, biotekhnologiya, geoeкологиya*, 2009, no. 1(4), pp. 266–269. (in Russ.).
37. Panagiotopoulos J.A., Bakker R.R., de Vrije T., Urbaniec K., Koukios E.G., Claassen P.A. *Journal of Cleaner Production*, 2010, vol. 18, pp. S9–S14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.02.025.
38. Berlowska J., Pielech-Przybylska K., Balcerek M., Cieciora W., Borowski S., Kregiel D. *Energies*, 2017, vol. 10, no. 9, article 1255. DOI: 10.3390/en10091255.
39. Vučurović D., Bajić B., Vučurović V., Jevtić-Mučibabić R., Dodić S. *Fermentation*, 2022, vol. 8, no. 3, article 114. DOI: 10.3390/fermentation8030114.
40. Ziemiński K., Kowalska-Wentel M. *Bioresource Technology*, 2015, vol. 180, pp. 274–280. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.12.035.
41. Cárdenas-Fernández M., Bawn M., Hamley-Bennett C., Bharat P.K., Subrizi F., Suhaili N., Ward D.P., Bourdin S., Dalby P.A., Hailes H.C., Hewitson P., Svetlana Ignatova S., Kontoravdi C., Shah D.J.N., Sheppard T.D., Warda J.M., Lye G.J. *Faraday Discussions*, 2017, vol. 202, pp. 415–431. DOI: 10.1039/c7fd00094d.
42. Semenikhin S.O., Achmiz A.D., Luk'yanenko M.V. *X vserossiyskaya konferentsiya molodykh uchennykh i spetsialistov «Aktual'nyye voprosy biologii, selektsii, tekhnologii vzdelyvaniya i pererabotki maslichnykh i drugikh tekhnicheskikh kul'tur»*. [X All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists “Current Issues in Biology, Breeding, Technology of Cultivation and Processing of Oilseeds and Other Industrial Crops”]. 2019, pp. 173–177. (in Russ.).

43. Aarabi A., Mizani M., Honarvar M. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, vol. 94A, pp. 345–354. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2016.10.004.
44. Berlowska J., Binczarski M., Dudkiewicz M., Kalinowska H., Witonska I.A., Stanishevsky A.V. *RSC Advances*, 2015, vol. 5, no. 3, pp. 2299–2304. DOI: 10.1039/x0xx00000x.
45. Mohdaly A.A., Sarhan M.A., Smetanska I., Mahmoud A. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, vol. 90, no. 2, pp. 218–226. DOI: 10.1002/jsfa.3796.
46. Özer A., Tümen F., Bildik M. *Environmental Technology*, 1997, vol. 18, no. 9, pp. 893–901. DOI: 10.1080/09593331808616608.
47. Muanda M., Farag H., Malash G. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, 2022, vol. 33, no. 2, pp. 336–348.
48. Altundogan H.S. *Process Biochemistry*, 2005, vol. 40, no. 3-4, pp. 1443–1452. DOI: 10.1016/j.procbio.2004.06.027.
49. Demiral Y.F., Öztürk N. *Journal of Selcuk University Natural and Applied Science*, 2014, pp. 321–330.
50. Reddad Z., Gerente C., Andres Y., Cloirec P.L. *Environmental Technology*, 2003, vol. 24, no. 2, pp. 257–264. DOI: 10.1080/09593330309385557.
51. Rowell R.M. *2nd. International Conference on Environmentally-Compatible Forest Products «Ecowood, 2006»*. Oporto, Portugal, 2006, pp. 241–250.
52. Aksu Z., İšoğlu İ.A. *Process Biochemistry*, 2005, vol. 40, no. 9, pp. 3031–3044. DOI: 10.1016/j.procbio.2005.02.004.
53. Huguenot D., Bois P., Jézéquel K., Cornu J.Y., Lebeau T. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, vol. 182, no. 1, pp. 18–26. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.05.062.
54. Cornu J.Y., Huguenot D., Jezequel K., Lebeau T. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, vol. 13, pp. 220–229. DOI: 10.1007/s11368-012-0625-7.
55. Altundogan H.S., Arslan N.E., Tumen F. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, vol. 149, no. 2, pp. 432–439. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.04.008.
56. Ghazy S.E., Khedr A.E.S., Youssef H.M.M. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 2009, vol. 21, no. 3, pp. 131–140. DOI: 10.3184/095422909X457338.
57. Shaykhiyev I.G., Begisheva V.Yu., Mavletbayeva A.I. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 4, pp. 145–149. (in Russ.).
58. Ovchinnikova A.A., Shaykhiyev I.G. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, no. 15, pp. 131–133. (in Russ.).
59. Shaykhiyev I.G., Ovchinnikova A.A. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 143–148. (in Russ.).
60. Ma X., Li D., Wu Z., Zhang H., Chen X., Liu Z. *Chemical Engineering & Technology*, 2016, vol. 39, no. 2, pp. 371–377. DOI: 10.1002/ceat.201400059.
61. Chwastowski J., Staroń P. *Desalination and Water Treatment*, 2021, vol. 242, pp. 117–127. DOI: 10.5004/dwt.2021.27844.
62. Ahmed S.A., El-Roudi A.M., Salem A.A. *Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, vol. 8, no. 6, pp. 338–351. DOI: 10.3923/jest.2015.338.351.
63. Sadat S.M.O., Kucukongar S., Turkyilmaz M. *International Journal of Phytoremediation*, 2023, vol. 25, no. 5, pp. 572–585. DOI: 10.1080/15226514.2022.2093832.
64. Tamova M.Yu., Barashkina E.V., Tretyakova N.R., Zhuravlev R.A., Penov N.D. *Foods and Raw Materials*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 2–9. DOI: 10.21603/2308-4057-2021-1-2-9.
65. Reddad Z., Gerente C., Andres Y., Le Cloirec P. *Water Science and Technology*, 2004, vol. 49, no. 1, pp. 163–170. DOI: 10.2166/wst.2004.0048.
66. Zolgharnein J., Asanjarani N., Shariatmanesh T. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 2011, vol. 93, no. 2, pp. 207–214. DOI: 10.1080/02772248.2010.523424.
67. Nuhanić M., Grebo M., Draganović S., Memić M., Smječanin N. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2019, vol. 322, pp. 2065–2078. DOI: 10.1007/s10967-019-06877-z.
68. Nuhanić M., Smječanin N., Curić N., Vinković A. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2021, vol. 328, pp. 347–358. DOI: 10.1007/s10967-021-07651-w.
69. Svergzova S.V., Yel'nikov D.A., Svergzova Zh.A. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*, 2011, no. 3, pp. 128–133. (in Russ.).
70. Castro L., Blázquez M.L., González F., Muñoz J.A., Ballester A. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 598, pp. 856–866. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.138.
71. Reddad Z., Gérente C., Andrés Y., Thibault J.F., Le Cloirec P. *Water Research*, 2003, vol. 37, no. 16, pp. 3983–3991. DOI: 10.1016/S0043-1354(03)00295-1.
72. Pehlivan E., Yanik B. H., Ahmetli G., Pehlivan M. *Bioresource Technology*, 2008, vol. 99, no. 9, pp. 3520–3527. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.07.052.
73. Arslanoğlu H., Tümen, F. *Firat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2015, vol. 27, no. 1, pp. 85–99.
74. Kukić D., Šćiban M., Brdar M., Vasić V., Takači A., Antov M., Prodanović J. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2023, vol. 20, no. 3, pp. 2503–2516. DOI: 10.1007/s13762-022-04140-9.
75. Reddad Z., Gérente C., Andrés Y., Ralet M.C., Thibault J.F., Le Cloirec P. *Carbohydrate Polymers*, 2002, vol. 49, no. 1, pp. 23–31.
76. Yigit K.I., Gursay S.S. *Akademik Gıda*, 2020, vol. 18, no. 4, pp. 357–366. DOI: 10.24323/akademik-gida.850843.
77. Gao Z., Liu Q., Wang H., Xia N., Zhu S. *Desalination and Water Treatment*, 2019, vol. 166, pp. 321–333.
78. Pehlivan E., Cetin S., Yanik B.H. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, vol. 135, no. 1-3, pp. 193–199. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.11.049.

79. Ahmed S.A. *Desalination and Water Treatment*, 2016, vol. 57, no. 19, pp. 8911–8926. DOI: 10.1080/19443994.2015.1024745.
80. Dronnet V.M., Axelos M.A.V., Renard C.M.G.C., Thibault J.F. *Carbohydrate Polymers*, 1998, vol. 35, no. 1-2, pp. 29–37.
81. Langenhorst W.T.J., Tels M., Vlugter J.C., Waterman H.I. *Journal of Biochemical and Microbiological Technology and Engineering*, 1961, vol. 3, no. 1, pp. 7–20.
82. Gérente C., Du Mesnil P.C., Andrès Y., Thibault J.F., Le Cloirec P. *Reactive and Functional Polymers*, 2000, vol. 46, no. 2, pp. 135–144. DOI: 10.1016/S1381-5148(00)00047-X.
83. Gerente C., Reddad Z., Andres Y., Le Cloirec P. *Environmental Technology*, 2004, vol. 25, no. 2, pp. 219–225. DOI: 10.1080/09593330409355455.
84. Liu Q., Gao Z., Li N., Zhu S. *Desalination and Water Treatment*, 2020, vol. 174, pp. 336–343. DOI: 10.5004/dwt.2020.24891.
85. Reddad Z., Gerente C., Andres Y., Le Cloirec P. *Environmental Science & Technology*, 2002, vol. 36, no. 10, pp. 2242–2248. DOI: 10.1021/es010237a.
86. Reddad Z., Gerente C., Andres Y., Le Cloirec P. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2002, vol. 2, no. 5-6, pp. 217–224. DOI: 10.2166/ws.2002.0172.
87. Reddad Z., Gerente C., Andres Y., Le Cloirec P. *Environmental Science & Technology*, 2002, vol. 36, no. 9, pp. 2067–2073. DOI: 10.1021/es0102989.
88. Dronnet V.M., Renard C.M.G.C., Axelos M.A.V., Thibault J.F. *Carbohydrate Polymers*, 1997, vol. 34, no. 1-2, pp. 73–82.
89. Dronnet V.M., Axelos M.A.V., Renard C.M.G.C., Thibault J.F. *Carbohydrate Polymers*, 1998, vol. 35, no. 3-4, pp. 239–247.
90. Hassan M.L., Kassem N.F., Abd El-Kader A.H. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, vol. 117, no. 4, pp. 2205–2212. DOI: 10.1002/app.32063.
91. Bharathi K.S., Ramesh S.T. *Applied Water Science*, 2013, vol. 3, pp. 773–790. DOI: 10.1007/s13201-013-0117-y.
92. Bushra R., Mohamad S., Alias Y., Jin Y., Ahmad M. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2021, vol. 319, article 111040. DOI: 10.1016/j.micromeso.2021.111040.
93. Nayagam J.O.P., Prasanna K. *Chemosphere*, 2022, vol. 291, article 132737. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132737.
94. Kumar P.S., Joshiba G.J., Femina C.C., Varshini P., Priyadarshini S., Karthick M.A., Jothirani R. *Desalination and Water Treatment*, 2019, vol. 172, pp. 395–416. DOI: 10.5004/dwt.2019.24613.
95. Hamad H.N., Idrus S. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 4, article 783. DOI: 10.3390/polym14040783.
96. Vucurovic V.M., Razmovski R.N., Tekic M.N. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2012, vol. 43, pp. 108–111. DOI: 10.1016/j.jtice.2011.06.008.
97. Gao Y., Zeng J., Zhu S., Liu Q. *New Journal of Chemistry*, 2021, vol. 45, no. 42, pp. 19678–19690. DOI: 10.1039/d1nj03259c.
98. Aksu Z., Isoglu I.A. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, vol. 137, no. 1, pp. 418–430. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.02.019.
99. Aksu Z., Isoglu I.A. *Chemical Engineering Journal*, 2007, vol. 127, no. 1-3, pp. 177–188. DOI: 10.1016/j.cej.2006.09.014.
100. Akar S.T., Celik S., Tunc D., Balk Y.Y., Akar T. *Turkish Journal of Chemistry*, 2016, vol. 40, pp. 1044–1054. DOI: 10.3906/kim-1606-4.
101. Türk F.N., Çiftçi H., Arslanoğlu H. *Sugar Technology*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 569–579. DOI: 10.1007/s12355-022-01207-2.
102. Karimi-Nazarabad M., Azizi-Toupkanloo H. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 2022, vol. 19, pp. 1527–1537. DOI: 10.1007/s13738-021-02398-3.
103. Dursun A.Y., Tepe O. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, vol. 194, pp. 303–311. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.07.105.
104. Akar S.T., Yilmazer D., Celik S., Balk Y.Y., Akar T. *Chemical Engineering Journal*, 2015, vol. 259, pp. 286–292. DOI: 10.1016/j.cej.2014.07.112.
105. Akar S.T., Yilmazer D., Celik S., Balk Y.Y., Akar T. *Chemical Engineering Journal*, 2013, vol. 229, pp. 257–266. DOI: 10.1016/j.cej.2013.06.009.
106. Aksu Z., Yazgi Z.A., Yücel H.G. *Journal of the Indian Chemical Society*, 2023, vol. 100, no. 2, article 100899. DOI: 10.1016/j.jics.2023.100899.
107. Zhang Y., Yu X., Zhu S. *Biomass Chemical Engineering*, 2021, vol. 55, no. 2, pp. 23–30. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5854.2021.02.004.
108. Demir F., Lacin O., Sincar H. *Global NEST Journal*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 17–26. DOI: 10.30955/gnj.003872.
109. Gezer B. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 2019, vol. 3, no. 4, pp. 250–256. DOI: 10.31015/jaefs.2019.4.9.
110. Harifi-Mood A.R., Hadavand-Mirzaie F. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 2015, vol. 27, no. 1, pp. 8–14. DOI: 10.1080/09542299.2015.1023086.
111. Malekbala M.R., Hosseini S., Yazdi S.K., Soltani S.M., Malekbala M.R. *Chemical Engineering Research and Design*, 2012, vol. 90, no. 5, pp. 704–712. DOI: 10.1016/j.cherd.2011.09.010.
112. Bahar N. *International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering*, 2014, vol. 74, pp. 49–53.
113. Çelik S. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2021, vol. 11, no. 2, pp. 325–338. DOI: 10.17714/gumusfenbil.732646.

114. He H., Gao Y., Zeng J., Yu M., Zhu S. *Chemical Engineering Research and Design*, 2023, vol. 195, pp. 404–417. DOI: 10.1016/j.cherd.2023.05.030.
115. Zaytseva Ye.A., Yeremin I.S. *Sbornik statey II Mezhduna-rodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Integratsiya i razvitiye nauchno-tekhnicheskogo i obrazovatel'nogo sotrudnichestva - vzglyad v budushcheye»*. [Collection of articles of the II International scientific and technical conference "Integration and development of scientific, technical and educational cooperation – a look into the future"]. Minsk, 2020, pp. 75–77. (in Russ.).
116. Zaytseva Ye.A., Yeremin I.S. *Sbornik statey III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Ekologo-ekonomicheskiye i tekhnologicheskkiye aspekty ustoychivogo razvitiya Respubliki Belarus' i Rossiyskoy Federatsii»*. [Collection of articles of the III International scientific and technical conference "Ecological, economic and technological aspects of sustainable development of the Republic of Belarus and the Russian Federation"]. Minsk, 2021, vol. 2, pp. 62–65. (in Russ.).
117. Meshcheryakov S.V., Yeremin I.S., Sidorenko D.O., Kotelev M.S., Zaytseva Ye.A., Lavrent'yev A.Ye. *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse*, 2019, no. 6, pp. 10–16. (in Russ.).
118. Platonova A.M., Mel'nikova A.S., Kostyukova N.V. *III Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Problemy obespecheniya bezopasnosti»*. [III International scientific and practical conference "Problems of ensuring safety"]. Ufa, 2021, pp. 164–167. (in Russ.).
119. Shaykhiyev I.G., Stepanova S.V., Shaykhiyeva K.I., Mavletbayeva A.I. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 17, pp. 258–261. (in Russ.).
120. Shaykhiyev I.G., Stepanova S.V., Shaykhiyeva K.I., Mavletbayeva A.I. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 13, pp. 246–248. (in Russ.).
121. Özer A., Tanyildizi M.S., Tümen F. *Environmental Technology*, 1998, vol. 19, no. 11, pp. 1119–1125. DOI: 10.1080/09593331908616770.
122. Ozer A., Tumen F. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2003, vol. 12, no. 9, pp. 1050–1058.
123. Altundogan H.S., Bahar N., Mujde B., Tumen F. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, vol. 144, no. 1-2, pp. 255–264. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.10.018.
124. Zhao J., Yu L., Zhou F., Ma H., Yang K., Wu G. *RSC Advances*, 2021, vol. 11, no. 14, pp. 8025–8032. DOI: 10.1039/d0ra09644j.
125. Ghorbani F., Kamari S., Zamani S., Akbari S., Salehi M. *Surfaces and Interfaces*, 2020, vol. 18, article 100444. DOI: 10.1016/j.surfin.2020.100444.
126. Ozer A., Tumen F. *European Journal of Mineral Processing & Environmental Protection*, 2005, vol. 5, no. 1, pp. 26–34.
127. Li D., Yan J., Liu Z., Liu Z. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2016, vol. 13, pp. 1815–1822. DOI: 10.1007/s13762-016-1012-5.
128. Dursun A.Y., Tep O., Dursu G. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, vol. 20, pp. 431–442. DOI: 10.1007/s11356-012-0946-5.
129. Dursun A.Y., Tep O., Usl G., Dursu G., Saatci Y. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, vol. 20, pp. 2472–2483. DOI: 10.1007/s11356-012-1133-4.
130. Dursun G., Çiçek H., Dursun A.Y. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, vol. 125, no. 1-3, pp. 175–182. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.05.023.

Received September 19, 2023

Revised October 30, 2023

Accepted June 6, 2024

Сведения об авторах

Шайхиева Карина Ильдаровна – ассистент кафедры инженерной экологии, shaikhiyevak@gmail.ru
Степанова Светлана Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инженерной экологии, ssvkan@mail.ru
Шайхиев Ильдар Гильманович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной экологии, ildars@inbox.ru
Свергузова Светлана Васильевна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры промышленной экологии, pe@intbel.ru

Information about authors

Shaikhieva Karina Ildarovna – assistant of the Department of Engineering Ecology, shaikhiyevak@gmail.ru
Stepanova Svetlana Vladimirovna – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Engineering Ecology, ssvkan@mail.ru
Shaikhiev Ildar Gilmanovich – doctor of technical sciences, professor, head of the Department of Engineering Ecology, ildars@inbox.ru
Sverguzova Svetlana Vasilievna – doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of Industrial Ecology, pe@intbel.ru