

Научная статья

УДК 543.05:628.31

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-4-506-513>



Получение адсорбентов из подсолнечной лузги для удаления хрома (VI) из сточных вод

Алексей Анатольевич Федотов, Елена Юрьевна Руденко

Самарский государственный технический университет,

г. Самара, Российская Федерация

Автор, ответственный за переписку: Руденко Елена Юрьевна, e_rudenko@rambler.ru

Аннотация. В последнее время в качестве сорбционных материалов для очистки воды от загрязняющих веществ часто используют отходы промышленного и сельскохозяйственного производства. Адсорбенты получали из подсолнечной лузги для очистки сточных вод от ионов хрома (VI). Исследования проводили на немодифицированной и модифицированной подсолнечной лузге и модельном растворе сточных вод, содержащем 10 мг/дм³ ионов хрома (VI). Для модификации подсолнечной лузги использовали растворы кислот (H_2SO_4 , HNO_3 , HCl , H_3PO_4) и щелочей (KOH , $NaOH$). Максимальную сорбционную емкость выявили у подсолнечной лузги, обработанной серной кислотой, поэтому в дальнейших опытах использовали только этот модифицирующий агент. Модификацию проводили 1–4 М растворами H_2SO_4 при температурах 30–75 °С в течение 30–120 мин. Результаты проведенных исследований показали, что кислотная модификация подсолнечной лузги более эффективна, чем ее обработка щелочами. До достижения 3 М концентрации серной кислоты сорбционная емкость модифицированной ей подсолнечной лузги увеличивается, а затем начинает снижаться. Был построен 3-уровневый полный факторный план эксперимента, который позволил определить, что максимальная сорбционная емкость подсолнечной лузги достигается при ее модификации серной кислотой, имеющей концентрацию, равную 2,5 М, и температуру 60 °С. Проведенные исследования показали, что адсорбенты, полученные из подсолнечной лузги, можно использовать для удаления ионов хрома (VI) из сточных вод. Наиболее оптимальной и эффективной является методика модификации, при которой подсолнечную лузгу обрабатывают 2,5 М раствором серной кислоты при температуре 60 °С в течение 30 мин, промывают дистиллированной водой и высушивают при температуре 105 °С до постоянной массы.

Ключевые слова: сточная вода, удаление, тяжелые металлы, хром (VI), сорбционная емкость, подсолнечная лузга

Для цитирования: Федотов А. А., Руденко Е. Ю. Получение адсорбентов из подсолнечной лузги для удаления хрома (VI) из сточных вод // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12. N 4. С. 506–513. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-4-506-513>.

CHEMICAL SCIENCES

Original article

Production of adsorbents based on sunflower husks for removal of chromium (VI) from wastewater

Aleksey A. Fedotov, Elena Yu. Rudenko

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

Corresponding author: Elena Yu. Rudenko, e_rudenko@rambler.ru

Abstract. At present, industrial and agricultural waste is often used as sorption materials for water remediation. Adsorbents obtained from sunflower husks were used for wastewater treatment from chromium (VI) ions. Studies were carried out using unmodified and modified sunflower husk and a model wastewater solution containing 10 mg/dm³ of chromium (VI) ions. Solutions of acids (H_2SO_4 , HNO_3 , HCl , H_3PO_4) and alkalis (KOH , $NaOH$) were used to modify sunflower husks. The maximum sorption capacity was revealed in sunflower husks treated with sulfuric acid; thus, this modifying agent only was used in further experiments. The modification was carried out using 1–4 M solutions of H_2SO_4 at 30–75 °C for 30–120 min. The research results showed that the acid treatment of sunflower husks is more effective than that using alkalis. The sorption capacity of the modified sunflower husk increased up to the concentration of sulfuric acid of 3 M, followed by a further decrease. A full factorial design having 3 factors of the experiment was set, which allowed the maximum sorption capacity to be identified. The optimal modification procedure was as follows: sunflower husks are

© Федотов А. А., Руденко Е. Ю., 2022

treated using 2.5 M sulfuric acid solution at 60 °C for 30 min, washed with distilled water and dried at 105 °C to a constant weight. Studies showed that adsorbents obtained from sunflower husks can be used to remove chromium (VI) ions from wastewater.

Keywords: wastewater, removal, heavy metals, chromium (VI), sorption capacity, sunflower husk

For citation: Fedotov A. A., Rudenko E. Yu. Production of adsorbents based on sunflower husks for removal of chromium (VI) from wastewater. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(4):506-513. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-4-506-513>.

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение воды тяжелыми металлами представляет серьезную угрозу как для здоровья человека, так и для окружающей среды. Большинство тяжелых металлов являются чрезвычайно токсичными и наносят серьезный вред всем формам жизни, в том числе людям, при превышении допустимого уровня их содержания в различных оболочках биосферы. Тяжелые металлы также не поддаются биологическому разложению и имеют тенденцию накапливаться в живых организмах. В связи с быстрым развитием цивилизации в течение последнего столетия повышенные количества тяжелых металлов регулярно попадают в поверхностные и грунтовые воды через сбросы сточных вод промышленных предприятий [1, 2].

Хром (особенно 6-валентный) является одним из наиболее токсичных загрязнителей подземных и сточных вод. У человека Cr (VI) вызывает ряд заболеваний, таких как аллергический дерматит, повреждение печени, застой в легких, диарею, тошноту и рвоту или изъязвления [3, 4]. Загрязнение гидросферы хромом (VI) в основном происходит из сточных вод гальванического, кожевенного, красильных, текстильных и других производств, использующих Cr (VI) [4].

Большинство распространенных методов удаления тяжелых металлов из водных растворов имеют многочисленные недостатки, среди которых низкая эффективность и высокая стоимость [5]. Адсорбция является одним из наиболее широко используемых и эффективных, удобных и недорогих методов очистки сточных вод с целью удаления из них широкого спектра загрязняющих веществ, в том числе ионов тяжелых металлов [6–10].

В последнее время интенсивно развивается новое направление в практике очистки воды от различных загрязняющих веществ – использование в качестве сорбционных материалов отходов промышленного и сельскохозяйственного производства. Отходы переработки сельскохозяйственного сырья имеют ежегодно возобновляемую базу, они дешевы, нетоксичны и экологически безопасны, практически повсеместно доступны для использования, обладают удовлетворительными сорбционными показателями по отношению к различным загрязнителям природных и сточных вод [9, 11], но часто их утилизация является серьезной проблемой для производителей и переработчиков сельскохозяйственной продукции [11].

Подсолнечник – один из самых распространенных масличных культур в мире [12]. Лидерами по производству подсолнечного масла являются Рос-

сийская Федерация, Украина, Евросоюз, Аргентина и Турция. Из-за постоянного роста населения планеты неуклонно увеличивается спрос на семена подсолнечника, подсолнечное масло и побочные продукты переработки подсолнечника. Подсолнечная лузга образуется при производстве пищевого масла, и ее утилизация является важной экологической проблемой [9]. Большую часть образующейся подсолнечной лузги применяют для производства энергии путем сжигания [13], что может создать проблемы ее переработки и увеличить загрязнение атмосферы [14], а также для получения биоэтанола и биодизеля, которые используют в качестве альтернативных видов топлива [13]. Развивается новое направление утилизации подсолнечной лузги – применение ее в качестве адсорбента для извлечения различных поллютантов из сточных и природных вод [13–15]. Достоинствами подсолнечной лузги как исходного материала для производства адсорбентов для очистки воды являются ее доступность в течение всего года, разнообразная химическая гетерогенность входящих в ее состав лигнина и целлюлозы, а также наличие различных кислородсодержащих функциональных групп, таких как гидроксильные и карбоксильные группы [9]. Недостатками подсолнечной лузги являются большой удельный объем и способность к самовозгоранию [16].

Для очистки воды лузгу используют в нативном и модифицированном виде [17, 18], также применяют биоугли, полученные из подсолнечной лузги [4, 7, 10, 13–15, 19, 20]. Применение подсолнечной лузги для очистки воды может улучшить экологическое состояние гидросферы и способствовать решению проблемы утилизации отходов производства растительных масел [11].

Цель исследования – получение адсорбентов из подсолнечной лузги для очистки сточных вод от ионов хрома (VI).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектом исследований являлась подсолнечная лузга, полученная в ЗАО «Самараагропром-переработка» и высушенная в сушильном шкафу ПЭ-4610 (Экоприбор, Россия) при температуре 105 °C до постоянной массы. Модельный раствор сточных вод, содержащий ионы хрома (VI), приготовлен путем растворения заданной массы бихромата калия ($K_2Cr_2O_7$) в дистиллированной воде, чтобы достичь концентрации ионов хрома (VI), равной 10 мг/дм³.

Для улучшения сорбционных свойств был проведен ряд модификаций подсолнечной лузги. Для выбора наиболее эффективного реагента-модификатора к навескам подсолнечной лузги массами

по 10 г каждая приливали по 200 см³ 1 М растворов кислот (H₂SO₄, HNO₃, HCl, H₃PO₄) и щелочей (KOH, NaOH) и перемешивали. Для исследования влияния концентрации реагента на сорбционные свойства к навескам подсолнечной лузги массами по 10 г каждая приливали по 200 см³ 2 М, 3 М, 4 М растворов H₂SO₄ и перемешивали. Процесс модификации проводили в термостате при температуре 30 °С в течение 30 мин. Для определения влияния температуры модификации на сорбционные свойства к навескам подсолнечной лузги массой по 10 г каждая приливали по 200 см³ 1 М раствора H₂SO₄ и перемешивали. Модификацию проводили в термостатах при температурах 30, 45, 60 и 75 °С в течение 30 мин. Для изучения влияния продолжительности воздействия реагента на сорбционные свойства навески подсолнечной лузги массами по 10 г каждая заливали 1 М раствором H₂SO₄ объемом 200 см³ и перемешивали. Процесс обработки проводили в термостате при температуре 30 °С в течение 30, 60, 90 и 120 мин.

Для оптимизации методики получения сорбента из модифицированной подсолнечной лузги для очистки сточных вод от хрома (VI) использовали систему статистического анализа Statistica 10.0, в которой для построения 3-уровневого полного факторного плана потребовалось проведение дополнительных опытов. При постановке дополнительных опытов к 2-м навескам подсолнечной лузги массами по 10 г каждая приливали по 200 см³ 2 М раствора H₂SO₄. Один процесс модификации проводили в термостате при температуре 45 °С, а другой – при температуре 60 °С в течение 30 мин. Еще к 2-м навескам подсолнечной лузги массами по 10 г каждая приливали по 200 см³ 3 М раствора H₂SO₄. Один процесс модификации проводили в термостате при температуре 45 °С, а другой – при температуре 60 °С в течение 30 мин.

Модифицированную лузгу отфильтровывали через марлю и 3 раза промывали дистиллированной водой объемом 200 см³. Модифицированную лузгу высушивали в сушильном шкафу ПЭ-4610 (Экоприбор, Россия) при температуре 105 °С до постоянной массы и использовали для проведения опытов по очистке модельного раствора сточных вод.

Для изучения сорбирующих свойств к навескам немодифицированной (контроль) и модифицированной подсолнечной лузги массами по 1 г каждая приливали по 200 см³ модельного раствора сточных вод, содержащего 10 мг/дм³ ионов хрома (VI). Колбы плотно закрывали пробками и энергично встряхивали в течение 2 ч на орбитальном шейкере-инкубаторе ES 20/60 (Biosan, Латвия) с частотой вращения 150 оборотов в минуту при комнатной температуре. Сорбенты удаляли фильтрацией через фильтровальную бумагу «красная лента». В фильтратах определяли остаточные концентрации ионов хрома фотометрическим методом с дифенилкарбазидом¹.

Сорбционную емкость подсолнечной лузги рассчитывали по формуле²:

$$A_r = \frac{(C_0 - C_r) \cdot V}{m \cdot 1000}, \text{ мг/г,}$$

где C₀ – начальная концентрация ионов хрома (VI) в модельном растворе сточных вод, мг/дм³; C_r – концентрация ионов хрома (VI) в модельном растворе сточных вод в определенный момент времени, мг/дм³; V – объем модельного раствора сточных вод, используемый для проведения исследований, см³; m – масса сорбционного материала, используемая для очистки модельного раствора сточных вод, г; 1000 – коэффициент пересчета см³ в дм³.

Эксперименты проводили в 3-кратной повторности. Математическую обработку результатов осуществляли с применением программы Statistica 10.0.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты проведенных исследований показали, что модификация подсолнечной лузги растворами гидроксидов калия и натрия снижает адсорбционные свойства подсолнечной лузги до такой степени, что полученные адсорбенты полностью теряют способность адсорбировать ионы хрома (VI). Вероятно, это связано с тем, что гидроксиды калия и натрия откладываются на волокнах лигнина и целлюлозы, входящих в состав подсолнечной лузги, и таким образом блокируют центры связывания ими ионов хрома (VI).

Кислотная модификация подсолнечной лузги более эффективна, чем обработка щелочами. Самую высокую сорбционную емкость в отношении ионов хрома (VI) имеет подсолнечная лузга, обработанная 1 М раствором серной кислоты, а наименьшую – лузга, модифицированная 1 М раствором фосфорной кислоты (рис. 1).

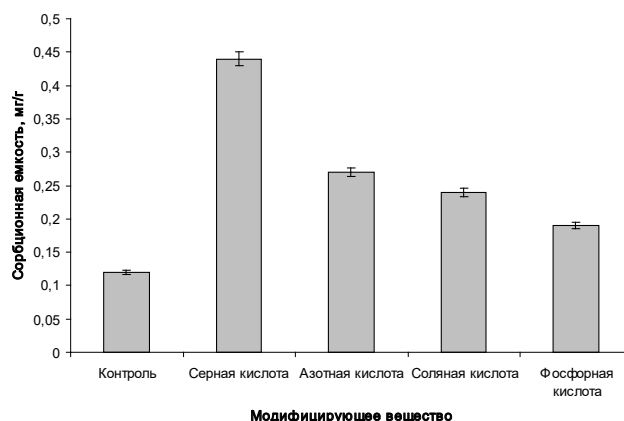


Рис. 1. Зависимость сорбционной емкости подсолнечной лузги от вещества, применяемого для ее модификации

Fig. 1. Effect of modifier on sorption capacity of sunflower seed husk

¹ ПНДФ 14.1:2:4.52-96. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации ионов хрома в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с дифенилкарбазидом. М., 2016. 22 с.

² Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Химия, 1988. 464 с.

В связи с тем, что максимально сорбционную емкость к ионам хрома (VI) увеличила обработка подсолнечной лузги серной кислотой, в дальнейших опытах в роли модифицирующего реагента была использована только серная кислота.

С увеличением концентрации серной кислоты сорбционная емкость модифицированной ей подсолнечной лузги увеличивается до достижения кислотой 3 М концентрации, а затем начинает снижаться (рис. 2). Вероятно, это связано с тем, что слишком высокая концентрация серной кислоты нарушает пористую структуру лузги, разъедая стенки пор, в результате чего лузга начинает терять возможность удерживать ионы хрома. Данные литературы свидетельствуют о том, что при возрастании концентрации кислоты, используемой для обработки растительного материала, благодаря образованию и расширению пор, а также более неоднородному распределению их по размерам увеличиваются удельная поверхность и сорбционная емкость получающихся адсорбентов [21–24].

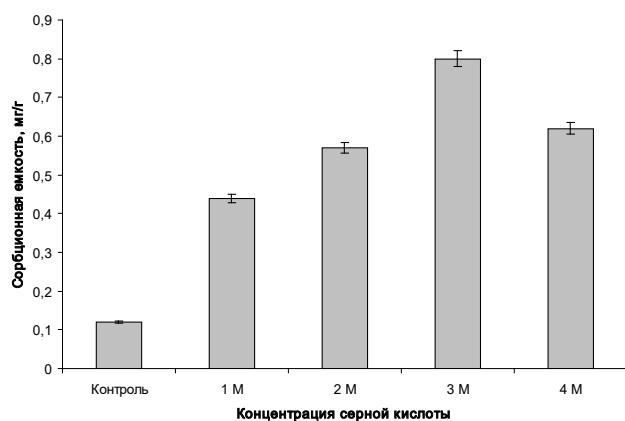


Рис. 2. Зависимость сорбционной емкости подсолнечной лузги от концентрации серной кислоты, применяемой для ее модификации

Fig. 2. Relationship between sorption capacity of sunflower seed husk and sulfuric acid concentration applied as its modifier

Температура воздействия 1 М раствора серной кислоты оказывает благоприятное влияние на сорбционные свойства модифицированной ей подсолнечной лузги. Сорбционная емкость постепенно увеличивается при возрастании температуры модифицирующего реагента (рис. 3). Возможно, повышенная температура обеспечивает гидратацию и набухание обрабатываемого растительного материала, что облегчает доступ серной кислоты к молекулам лигнина и целлюлозы, расположенным внутри подсолнечной лузги [21].

Изменение продолжительности воздействия реагента практически не оказывает влияния на сорбционные свойства подсолнечной лузги (рис. 4), т. к. различия в сорбционных емкостях минимальны и скорее вызваны погрешностью. По-видимому, продолжительность воздействия серной кислоты на подсолнечную лузгу при ее модификации не является достаточно существенным фактором, поэтому в дальнейших расчетах его можно не учитывать.

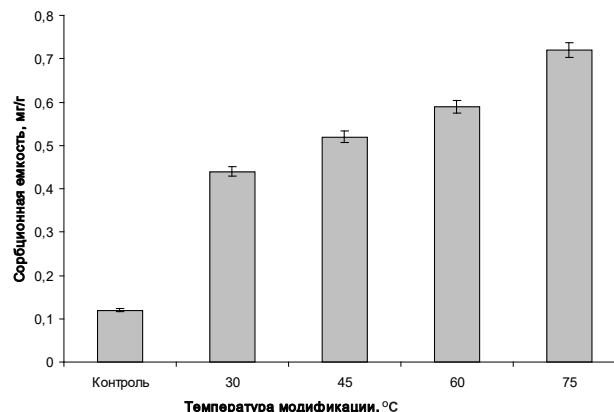


Рис. 3. Зависимость сорбционной емкости подсолнечной лузги от температуры, применяемой для ее модификации

Fig. 3. Relationship between sorption capacity of sunflower seed husk and modifying temperature

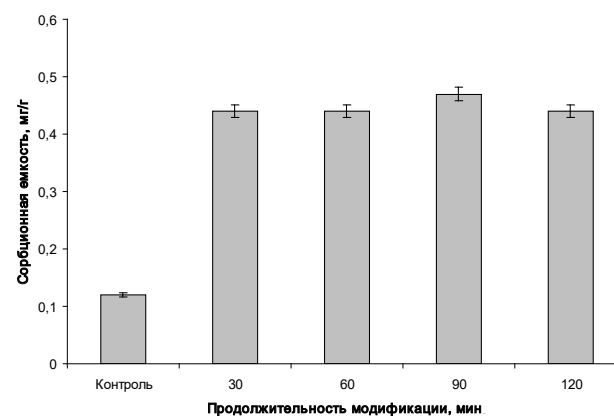


Рис. 4. Зависимость сорбционной емкости подсолнечной лузги от продолжительности ее модификации

Fig. 4. Relationship between sorption capacity of sunflower seed husk and duration of its modification

Трехуровневый полный факторный план эксперимента по модификации подсолнечной лузги

Three-level full factorial plan of experiment on sunflower seed husk modifying

№ опыта	Факторы		Отклик
	Температура воздействия реагента (Т), °C	Концентрация реагента (С), М	Сорбционная емкость (Х), мг/г
1	30	1	0,44
2	30	2	0,57
3	30	3	0,80
4	45	1	0,52
5	45	2	0,49
6	45	3	0,57
7	60	1	0,59
8	60	2	0,85
9	60	3	0,44

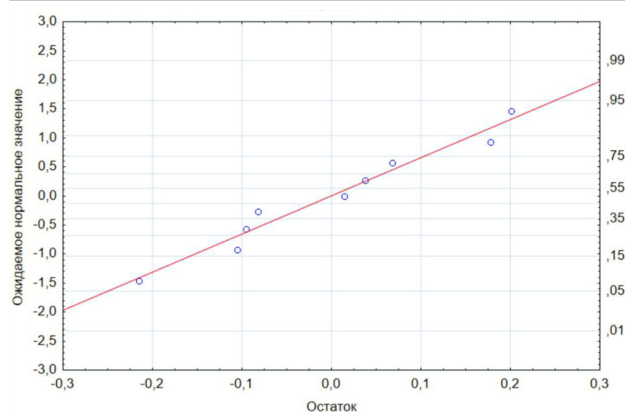


Рис. 5. Нормальный вероятностный график остатков для сорбционной емкости подсолнечной лузги

Fig. 5. Normal probability plot of the rests for sorption capacity of sunflower seed husk

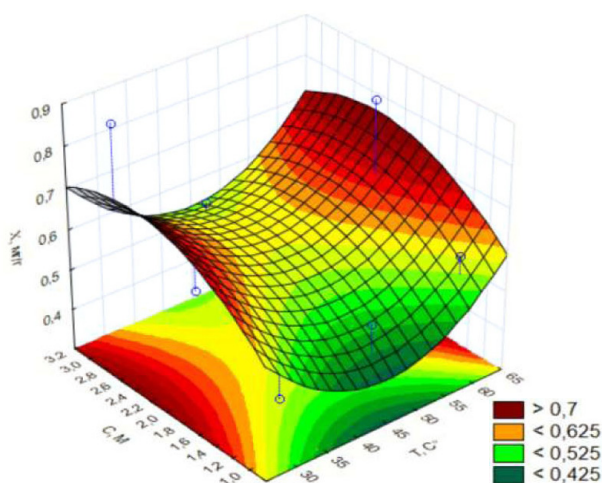


Рис. 6. Поверхность отклика для сорбционной емкости подсолнечной лузги

Fig. 6. Response surface for sorption capacity of sunflower seed husk

На основании предварительных экспериментов было установлено, что факторами, оказывающими наибольшее влияние на сорбционную емкость, являются концентрация реагента и температура, при которой он воздействует на лузгу. На основании этого был построен 3-уровневый полный факторный план эксперимента, представленный в таблице.

Поверхность отклика полученной математиче-

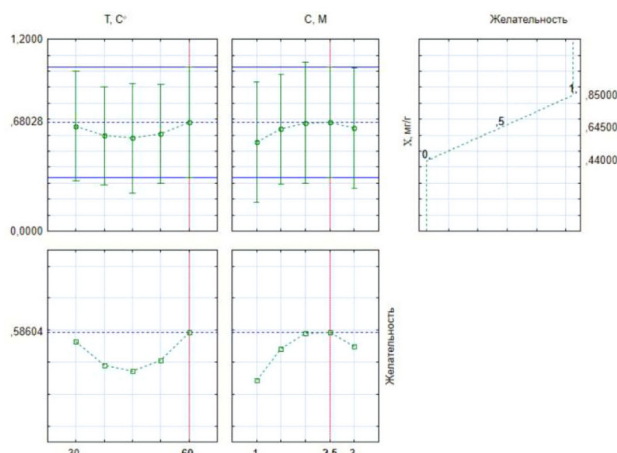


Рис. 7. Профили предсказанных значений и функций желательности

Fig. 7. Profiles of the predicted values and desirability functions

ской модели описывается следующим уравнением:

$$X = 0,586 + 0,012T + 0,043C - 0,044T^2 + 0,038C^2$$

Адекватность уравнения подтверждается нормальным вероятностным графиком распределения остатков (рис. 5).

Нормальное распределение остатков на графике также подтверждает адекватность полученной модели. Графическая интерпретация полученной модели представлена на рис. 6 и 7.

Из диаграммы поверхности отклика, а также из профилей предсказанных значений и функций желательности видно, что максимальная сорбционная емкость лузги достигается при концентрации реагента (H_2SO_4), равной 2,5 М, и температуре 60 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Адсорбенты, полученные из немодифицированной и модифицированной лузги подсолнечника, являются эффективными для удаления ионов хрома (VI) из сточных вод. Для очистки воды от хрома (VI) наиболее оптимальной и эффективной является методика модификации, при которой подсолнечную лузгу обрабатывают 2,5 М раствором серной кислоты при температуре 60 °С в течение 30 мин, промывают дистиллированной водой и высушивают при температуре 105 °С до постоянной массы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yang X., Wan Y., Zheng Y., He F., Yu Z., Huang J., et al. Surface functional groups of carbon-based adsorbents and their roles in the removal of heavy metals from aqueous solutions: a critical review // Chemical Engineering Journal. 2019. Vol. 366. P. 608–621. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.119>.
2. Agarwal A., Upadhyay U., Sreedhar I., Singh S. A., Patel C. M. A review on valorization of biomass in heavy metal removal from wastewater // Journal of Water Process Engineering. 2020. Vol. 38. P. 101602. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101602>.
3. Joseph L., Jun B.-M., Flora J. R. V., 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. P. 142–159. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.198>.
4. Zou Z., Tang Y., Jiang C., Zhang J. Efficient adsorption of Cr (VI) on sunflower seed hull derived porous carbon // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2015. Vol. 3, no. 2. P. 898–905. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.02.025>.
5. Beni A. A., Esmaeili A. Biosorption, an efficient

method for removing heavy metals from industrial effluents: a review // *Environmental Technology and Innovation*. 2020. Vol. 17. P. 100503. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100503>.

6. Uddin M. K. A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade // *Chemical Engineering Journal*. 2017. Vol. 308. P. 438–462. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.029>.

7. Srisorrachatr S. Modified sunflower seed husks for metal ions removal from wastewater // *Chemical Engineering Transactions*. 2017. Vol. 57. P. 247–252. <https://doi.org/10.3303/CET1757042>.

8. Wan S., Wu J., Zhou S., Wang R., Gao B., He F. Enhanced lead and cadmium removal using biochar-supported hydrated manganese oxide (HMO) nanoparticles: behavior and mechanism // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 616–617. P. 1298–1306. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.188>.

9. Anastopoulos I., Ighalo J. O., Igwegbe C. A., Giannakoudakis D. A., Triantafyllidis K. S., Pashalidis I., et al. Sunflower-biomass derived adsorbents for toxic/heavy metals removal from (waste) water // *Journal of Molecular Liquids*. 2021. Vol. 342. P. 117540. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117540>.

10. Hubetska T. S., Kobylinska N. G., García J. R. Sunflower biomass power plant by-products: properties and its potential for water purification of organic pollutants // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2021. Vol. 157. P. 105237. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105237>.

11. Thinakaran N., Baskaralingam P., Pulikesi M., Panneerselvam P., Sivanesan S. Removal of acid violet 17 from aqueous solutions by adsorption onto activated carbon prepared from sunflower seed hull // *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 151. P. 316–322. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.076>.

12. Konyali S. Sunflower production, consumption, foreign trade and agricultural policies in Turkey // *Social Sciences Research Journal*. 2017. Vol. 6, no. 4. P. 11–19.

13. Liou T.-H. Development of mesoporous structure and high adsorption capacity of biomass-based activated carbon by phosphoric acid and zinc chloride activation // *Chemical Engineering Journal*. 2010. Vol. 158, no. 2. P. 129–142. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.12.016>.

14. Liu Y., Li X., Sun Y., Yang R., Lee Y., Ahn J.-H. Macro-microporous carbon with a three-dimensional channel skeleton derived from waste sunflower seed shells for sustainable room-temperature sodium sulfur batteries // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 853. P. 157316. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157316>.

15. Alvear-Daza J. J., Pasquale G. A., Rengifo-Herrera J. A., Romanelli G. P., Pizzio L. R.

Mesoporous activated carbon from sunflower shells modified with sulfonic acid groups as solid acid catalyst for itaconic acid esterification // *Catalysis Today*. 2021. Vol. 372. P. 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.12.011>.

16. Yuan J. H., Xu R. K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic ultisol // *Soil Use and Management*. 2011. Vol. 27, no. 1. P. 110–115. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00317.x>.

17. Жашуева К. А., Сиволобова Н. О., Грачева Н. В., Сикарская А. В. Очистка воды от ионов тяжелых металлов адсорбентами на основе растительных отходов // *Вестник технологического университета*. 2017. Т. 20. N 7. С. 142–143.

18. Abdulhussein S. A., Alwarded A. I. Single and binary adsorption of Cu(II) and Ni(II) Ions from aqueous solutions by sunflower seed husk // *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences*. 2019. Vol. 26, no. 1. P. 35–43. <https://doi.org/10.33261/jaaru.2019.26.1.005>.

19. Saleh M. E., El-Refaey A. A., Mahmoud A. H. Effectiveness of sunflower seed husk biochar for removing copper ions from wastewater: a comparative study // *Soil and Water Research*. 2016. Vol. 11. P. 53–63. <https://doi.org/10.17221/274/2014-SWR>.

20. Ларина О. Г., Овчаров С. Н., Калинин А. Ю. Физико-химический анализ формирования пористой структуры и эксплуатационных свойств термомодифицированных сорбентов для очистки сточных вод // *Наука. Инновации. Технологии*. 2018. N 3. С. 195–208. <https://doi.org/10.37495/23084758-2018-3-181-195-208>.

21. Molina-Sabio M., Rodriguez-Reinoso F. Role of chemical activation in the development of carbon porosity // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2004. Vol. 241, no. 1. P. 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.04.007>.

22. Xu G., Yang X., Spinosa L. Development of sludge-based adsorbents: preparation, characterization, utilization and its feasibility assessment // *Journal of Environmental Management*. 2015. Vol. 151. P. 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.001>.

23. Hwang H., Choi W., Kim T., Kim J., Oh K. The preparation of an adsorbent from mixtures of sewage sludge and coal-tar pitch using an alkaline hydroxide activation agent // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2008. Vol. 83. P. 220–226. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.09.011>.

24. Liu Q.-S., Zheng T., Wang P., Guo L. Preparation and characterization of activated carbon from bamboo by microwave-induced phosphoric acid activation // *Industrial Crops and Products*. 2010. Vol. 31. P. 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.10.011>.

REFERENCES

1. Yang X., Wan Y., Zheng Y., He F., Yu Z., Huang J., et al. Surface functional groups of carbon-based adsorbents and their roles in the removal of heavy met-

als from aqueous solutions: a critical review. *Chemical Engineering Journal*. 2019;366:608–621. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.119>.

2. Agarwal A., Upadhyay U., Sreedhar I., Singh S. A., Patel C. M. A review on valorization of biomass in heavy metal removal from wastewater. *Journal of Water Process Engineering*. 2020;38:101602. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101602>.
3. Joseph L., Jun B.-M., Flora J. R. V., Park C. M., Yoon Y. Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: a review. *Chemosphere*. 2019;229:142-159. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.198>.
4. Zou Z., Tang Y., Jiang C., Zhang J. Efficient adsorption of Cr (VI) on sunflower seed hull derived porous carbon. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2015;3(2):898-905. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.02.025>.
5. Beni A. A., Esmaeili A. Biosorption, an efficient method for removing heavy metals from industrial effluents: a review. *Environmental Technology and Innovation*. 2020;17:100503. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100503>.
6. Uddin M. K. A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade. *Chemical Engineering Journal*. 2017;308:438-462. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.029>.
7. Srisorrachatr S. Modified sunflower seed husks for metal ions removal from wastewater. *Chemical Engineering Transactions*. 2017;57:247-252. <https://doi.org/10.3303/CET1757042>.
8. Wan S., Wu J., Zhou S., Wang R., Gao B., He F. Enhanced lead and cadmium removal using biochar-supported hydrated manganese oxide (HMO) nanoparticles: behavior and mechanism. *Science of the Total Environment*. 2018;616-617:1298-1306. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.188>.
9. Anastopoulos I., Ighalo J. O., Igwegbe C. A., Giannakoudakis D. A., Triantafyllidis K. S., Pashalidis I., et al. Sunflower-biomass derived adsorbents for toxic/heavy metals removal from (waste) water. *Journal of Molecular Liquids*. 2021;342:117540. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117540>.
10. Hubetska T. S., Kobylinska N. G., García J. R. Sunflower biomass power plant by-products: properties and its potential for water purification of organic pollutants. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2021;157:105237. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105237>.
11. Thinakaran N., Baskaralingam P., Pulikesi M., Panneerselvam P., Sivanesan S. Removal of acid violet 17 from aqueous solutions by adsorption onto activated carbon prepared from sunflower seed hull. *Journal of Hazardous Materials*. 2008;151:316-322. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.076>.
12. Konyali S. Sunflower production, consumption, foreign trade and agricultural policies in Turkey. *Social Sciences Research Journal*. 2017;6(4):11-19.
13. Liou T.-H. Development of mesoporous structure and high adsorption capacity of biomass-based activated carbon by phosphoric acid and zinc chloride activation. *Chemical Engineering Journal*. 2010;158(2):129-142. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.12.016>.
14. Liu Y., Li X., Sun Y., Yang R., Lee Y., Ahn J.-H. Macro-microporous carbon with a three-dimensional channel skeleton derived from waste sunflower seed shells for sustainable room-temperature sodium sulfur batteries. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;853:157316. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157316>.
15. Alvear-Daza J. J., Pasquale G. A., Rengifo-Herrera J. A., Romanelli G. P., Pizzio L. R. Mesoporous activated carbon from sunflower shells modified with sulfonic acid groups as solid acid catalyst for itaconic acid esterification. *Catalysis Today*. 2021;372:51-58. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.12.011>.
16. Yuan J. H., Xu R. K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic ultisol. *Soil Use and Management*. 2011;27(1):110-115. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00317.x>.
17. Zhashueva K. A., Sivolobova N. O., Gracheva N. V., Sikarskaya A. V. Purification of water from heavy metal ions by adsorbents based on plant waste. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2017;20(7):142-143. (In Russian).
18. Abdulhussein S. A., Alwared A. I. Single and binary adsorption of Cu(II) and Ni(II) Ions from aqueous solutions by sunflower seed husk. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences*. 2019;26(1):35-43. <https://doi.org/10.33261/jaa-ru.2019.26.1.005>.
19. Saleh M. E., El-Refaey A. A., Mahmoud A. H. Effectiveness of sunflower seed husk biochar for removing copper ions from wastewater: a comparative study. *Soil and Water Research*. 2016;11:53-63. <https://doi.org/10.17221/274/2014-SWR>.
20. Larina O. G., Ovcharov S. N., Kalinichenko A. Yu. Physico-chemical analysis of the formation of porous structure and performance properties of thermally modified sorbents for wastewater purification. *Nauka. Innovatsii. Tekhnologii = Science. Innovations. Technologies*. 2018;(3):195-208. <https://doi.org/10.37495/23084758-2018-3-181-195-208>. (In Russian).
21. Molina-Sabio M., Rodriguez-Reinoso F. Role of chemical activation in the development of carbon porosity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2004;241(1):15-25. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.04.007>.
22. Xu G., Yang X., Spinosa L. Development of sludge-based adsorbents: preparation, characterization, utilization and its feasibility assessment. *Journal of Environmental Management*. 2015;151:221-232. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.001>.
23. Hwang H., Choi W., Kim T., Kim J., Oh K. The preparation of an adsorbent from mixtures of sewage sludge and coal-tar pitch using an alkaline hydroxide activation agent. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2008;83:220-226. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.09.011>.
24. Liu Q.-S., Zheng T., Wang P., Guo L. Preparation and characterization of activated carbon from bamboo by microwave-induced phosphoric acid activation. *Industrial Crops and Products*. 2010;31:233-238. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.10.011>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

А. А. Федотов,
магистрант,
Самарский государственный технический
университет,
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244,
Российская Федерация,
fedotov23.f@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3570-0018>

Е. Ю. Руденко,
д.б.н., доцент,
профессор Высшей биотехнологической школы,
Самарский государственный технический
университет,
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244,
Российская Федерация,
e_rudenko@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2701-9225>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.*

Информация о статье

*Поступила в редакцию 19.09.2022.
Одобрена после рецензирования 25.10.2022.
Принята к публикации 30.11.2022.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksey A. Fedotov,
Master Student,
Samara State Technical University,
244, Molodogvardeiskaya St., Samara, 443100,
Russian Federation,
fedotov23.f@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3570-0018>

Elena Yu. Rudenko,
Dr. Sci. (Biology), Associate Professor,
Professor of the Higher Biotechnological School,
Samara State Technical University,
244, Molodogvardeiskaya St., Samara, 443100,
Russian Federation,
e_rudenko@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2701-9225>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding
the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved by
all the co-authors.*

Information about the article

*The article was submitted 19.09.2022.
Approved after reviewing 25.10.2022.
Accepted for publication 30.11.2022.*