

УДК 544.723

## УДАЛЕНИЕ ПОЛЛЮТАНТОВ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ СКОРЛУПОЙ КОСТОЧЕК АБРИКОСОВ

© И.Г. Шайхиев<sup>1</sup>, К.И. Шайхиева<sup>1</sup>, С.В. Свергузова<sup>2\*</sup>, Ю.А. Винограденко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, 68, Казань, 420015 (Россия)

<sup>2</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ул. Костюкова, 46, Белгород, 308012 (Россия), e-mail: pe@intbel.ru

Проведен обзор литературных данных по использованию компонентов биомассы деревьев абрикоса (*Prunus armeniaca*) в качестве сорбционного материала для извлечения различных поллютантов из сточных и природных вод. Выявлено, что в мировой литературе отсутствуют сведения об использовании биомассы абрикосового дерева (листья, кора, опилки) в качестве сорбционных материалов для извлечения различных поллютантов из водных сред. Описаны результаты исследований по использованию косточек абрикосов. Приведены параметры сорбционного взаимодействия, при котором достигается наибольшая степень удаления поллютантов. Показано, что возможно увеличить сорбционную емкость компонентов биомассы абрикоса путем модификации различными химическими реагентами. Установлено, что наиболее исследуемым сорбционным материалом является скорлупа косточек абрикоса. Определено, что наибольшее количество публикаций посвящено использованию последних в качестве сырья для получения активированных углей. Выявлено, что удельная поверхность и суммарный объем пор активированных углей из косточек плодов абрикоса зависят от режимов карбонизации и активации сырья. В зависимости от параметров карбонизации и активации активированные угли из скорлупы косточек абрикосов имеют значения удельной поверхности от 25 м<sup>2</sup>/г до 1200 м<sup>2</sup>/г и более. Показано, что активированные угли из косточек абрикосов являются эффективными сорбентами для удаления различных поллютантов (ионы металлов, красители, нефть и нефтепродукты) из водных сред. Выявлено, что изотермы адсорбции поллютантов наиболее адекватно в большинстве случаев описываются моделями Ленгмюра и Фрейндлиха, а кинетика процесса наиболее часто описывается моделью псевдо-второго порядка.

*Ключевые слова:* скорлупа косточек абрикоса, ионы металлов, красители, адсорбция, модификация.

В настоящее время в мировом сообществе интенсивно развивается инновационное направление в области охраны окружающей природной среды – использование отходов промышленного и сельскохозяйственного производства в качестве реагентов для удаления загрязняющих веществ из газовых и водных сред.

Особый интерес представляют компоненты древесной биомассы – листья [1–3], хвоя [4–6], шишки [7–9], кожура плодов [10–12] и др., а также отходы от переработки древесины, такие как опилки [13–15], косточки после переработки плодов [16–18], скорлупа орехов и др. [19–21], которые образуются ежегодно в больших количествах, дешевы и имеют восполнимую сырьевую базу.

Типовым листовым деревом, широко распространенным в южных регионах Российской Федерации, а также в странах Средней Азии и Кавказа является абрикос обыкновенный (*Prunus armeniaca*) – плодовое дерево, вид из секции Абрикос (*Armeniaca*) рода Слива (*Prunus*) семейства Розовые (*Rosaceae*).

---

Шайхиев Ильдар Гильманович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной экологии, e-mail: ildars@inbox.ru

Шайхиева Карина Ильдаровна – аспирант, e-mail: shaikhievak@gmail.ru

Свергузова Светлана Васильевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой промышленной экологии, e-mail: pe@intbel.ru

Винограденко Юрий Алексеевич – аспирант, e-mail: yurets.grad@mail.ru

стопадное дерево средней высоты (5–8 м) и окружности кроны. Кора на старых стволах серо-бурая продольно растрескивающаяся. Листья очередные, черешковые, округлые, яйцевидные, на верхушке оттянутые, мелкозубчатые или удвоенно-зубчатые длиной 6–9 см. Черешки тонкие, желобчатые с железками при основании пластинки.

\* Автор, с которым следует вести переписку.

Цветки одиночные сидячие или на очень коротких цветоножках, 25–30 мм в диаметре, пятимерные. Гипантий цилиндрический, зеленовато-красный с пятью овальными, темно-красными, при цветении отгибающимися вниз чашелистиками. Лепестки белые с розовыми жилками или розовые, округлые, эллиптические или обратнояйцевидные. Тычинок 25–45. Гинецей один, сидящий на дне гипантия. Цветки распускаются до появления листьев. Цветет в марте – апреле.

Плоды – сочные однокостянки желтовато-красного («абрикосового») цвета, в очертании округлые, эллиптические или обратнояйцевидные, с продольной бороздкой. Косточка толстостенная, гладкая или шероховатая. Кожица бархатисто-опушенная, от желтого до оранжевого цвета, обычно с красноватым односторонним «загаром»; мякоть плода у культивируемых сортов сладкая, сочная или суховатая, у дикорастущих – грубоволокнистая с горьковатым привкусом. Семена плоские, обратнояйцевидные, с плотной светло-коричневой кожурой, горькие или сладкие. Вес плода у дикорастущих форм – 3–18 г, у культурных – 5–80 г. Плодоносит в июне – августе.

Дерево абрикоса растет долго, в теплом климате до 100 лет; обильное плодоношение начинается с трех-пяти лет и продолжается до 30–40 лет. Деревья устойчивы к засухе (за счет глубокого проникновения корней), их можно выращивать в жарких регионах с минимальным количеством осадков [22].

В мировой литературе практически отсутствуют сведения об использовании биомассы абрикосового дерева (листья, кора, опилки) в качестве сорбционных материалов поллютантов из водных сред. Сообщается об исследовании адсорбции ионов железа листьями деревьев листовых пород, в том числе и абрикоса. Определено, что при начальной концентрации ионов  $Fe^{3+}$  100 мг/дм<sup>3</sup> максимальная адсорбционная емкость листьев *Prunus armeniaca* по названным ионам составила 39.8 мг/г [23].

Также исследована адсорбция ионов  $Cu^{2+}$  опилками абрикоса. Найдено, что максимальная адсорбционная емкость опилок *Prunus armeniaca* по ионам меди относительно невысока (~4.5 мг/г), а изотерма адсорбции наиболее точно описывается моделью Ленгмюра [24].

Несколько больше публикаций посвящено использованию в качестве сорбционного материала косточек плодов абрикоса. Указывается, что мировое производство абрикосов в 2013 году составило более 2 млн т [25], из них более 676 тыс. т – в Турции, более 453 тыс. т – в Иране, более 356 тыс. т – в Узбекистане. В России производство плодов абрикоса составляет несколько более 60 тыс. т [25].

Естественно, при переработке сотен тысяч тонн плодов абрикоса в качестве отходов производства образуются сотни тысяч тонн косточек. Последние в нативном измельченном виде исследовались для извлечения ионов тяжелых металлов и красителей из водных сред.

Исследована адсорбция ионов  $Cr(VI)$  нативной измельченной скорлупой косточек *Prunus armeniaca*. Определено, что при начальной концентрации 5 мг/дм<sup>3</sup>, pH = 2, 30 мин контактирования и дозировке адсорбента 20 г/дм<sup>3</sup> максимальная сорбционная емкость составила 0.037 мг/г. Изотермы адсорбции наиболее адекватно описываются моделью Фрейндлиха ( $R^2 = 0.990$ ), а кинетика процесса подчиняется модели псевдо-второго порядка [26].

Повысить сорбционные характеристики измельченной скорлупы косточек абрикоса возможно путем воздействия на них ультразвуковой обработкой. Так, воздействие последней мощностью 200 Вт в течение 15 мин с частотой 22 кГц способствует увеличению максимальной сорбционной емкости с 6.6 мг/г до 9.9 мг/г по ионам  $Cr(VI)$ . Как и в предыдущей статье, найдено, что максимальная сорбционная емкость наблюдается при pH = 2 при начальной концентрации ионов  $Cr(VI)$  75 мг/дм<sup>3</sup>. Определено, что при начальной концентрации названных ионов 25, 50 и 75 мг/дм<sup>3</sup> степень их удаления нативным сорбционным материалом составляет 45.6%, 32.4% и 25.8%, после обработки ультразвуком – 62.4%, 47.2% и 38.4% соответственно [27].

Также нативная скорлупа косточек абрикоса исследовалась в качестве сорбционного материала для удаления ионов  $Cu^{2+}$  в статических условиях. Найдено, что максимальная сорбционная емкость, равная 4.5 мг/г, достигается при pH = 5, начальной концентрации ионов  $Cu^{2+}$  60 мг/дм<sup>3</sup> и дозировке сорбционного материала 6 г/дм<sup>3</sup>. Определено, что основным механизмом процесса является ионный обмен. Изотерма адсорбции хорошо описывается моделью Ленгмюра, а кинетика сорбции подчиняется модели псевдо-второго порядка [28]. При начальной концентрации ионов меди 120 мг/дм<sup>3</sup> и дозировке биомассы оболочек косточек абрикоса 0.5 г/дм<sup>3</sup> степень удаления иона металла составила более 42% [29]. Обсчетом экспериментальных данных с использованием метода искусственной нейронной сети (ANN) определено, что максимальная сорбционная емкость измельченной скорлупы косточек абрикоса по ионам  $Cu^{2+}$  составляет 5.9 мг/г, а эффективность удаления последних составляет 26.9% при дозировке адсорбента 0.3 г/дм<sup>3</sup> [30].

Повысить сорбционную емкость по ионам  $\text{Cu}^{2+}$  возможно химической модификацией биомассы скорлупы косточек абрикоса. Так, указывается, что обработка последних  $\text{NaOH}$  способствует увеличению максимальной сорбционной емкости более чем в 4 раза – с 2.5 мг/г до 10.8 мг/г [31].

Исследовано удаление ионов  $\text{Pb}^{2+}$  скорлупой косточек абрикоса и другими сорбционными материалами из отходов от переработки сельскохозяйственного сырья. Определено, что максимальная адсорбционная емкость скорлупой косточек абрикоса по ионам свинца составляет 22.78 мг/г [32].

Определена эффективность удаления ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Pb}^{2+}$  скорлупой косточек абрикоса в одинаковых условиях (начальная концентрация иона металла – от 50 до 250 мг/дм<sup>3</sup>, дозировка адсорбента – 20 г/дм<sup>3</sup>, pH – 2–6). Во всех случаях извлечения ионов металлов наблюдается зависимость  $\text{Pb}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$  [33].

Определено влияние щелочной обработки раствором  $\text{NaOH}$  на сорбционную емкость скорлупы косточек абрикоса по отношению к ионам  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$ . Выявлено, что щелочная обработка способствует увеличению максимальной сорбционной емкости с 4.83, 24.53 и 5.42 мг/г до 12.25, 46.45 и 8.73 мг/г соответственно. Химический анализ показал, что щелочная обработка вызывает распад гемицеллюлозы (ее содержание снизилось с 19.2 до 3.5%), а также способствует увеличению площади поверхности и пористости сорбционного материала. Высказано предположение, что основным механизмом очистки является ионный обмен и комплексообразование [34].

Проведена адсорбция красителя «Метиленовый голубой» измельченными косточками абрикоса, обработанных раствором щелочи или микроволновым излучением. Определено, что наибольшая степень удаления названного красителя наблюдается для образца сорбционного материала, обработанного раствором  $\text{NaOH}$  в соотношении 3 : 1. При начальной концентрации красителя 150 мг/дм<sup>3</sup> сорбционная емкость составила ~70 мг/г, степень удаления ~48%. Увеличить сорбционные характеристики удалось обработкой образца сорбционного материала микроволновым излучением мощностью 300 Вт в течение 10 мин. Адсорбционная емкость после названной обработки составила 95 мг/г, а степень извлечения красителя – более 65%. Выявлено, что при температурах адсорбции 25–55 °C изотермы адсорбции наиболее точно описываются моделью Ленгмюра, а при начальных концентрациях 100–250 мг/дм<sup>3</sup> кинетика процесса описывается моделью псевдо-второго порядка [35].

Одним из путей использования отходов от переработки сельскохозяйственных отходов является получение из последних активированных углей (АУ) [36–42]. Скорлупа косточек *Prunus armeniaca* также использовалась для получения активированных углей или термообработанных сорбционных материалов для извлечения поллютантов из модельных и сточных вод. Выбор последнего обусловлен тем, что скорлупа абрикоса является низкодольной, а ее высокая истинная плотность определяет возможность получения на ее основе прочных адсорбентов. Также этот вид сырья характеризуется тем, что уже имеет в своей структуре естественную систему пор и каналов, которая может быть развита с помощью различных методов карбонизации и последующей активации.

При производстве АУ, как правило, используют одностадийный процесс карбонизации углеводородного сырья и двухстадийный, с последующей активацией карбонизата. Два образца АУ готовились из абрикосовых косточек с использованием карбонизации с последующей активацией паром и одностадийным пиролизом/активацией в паре. Выявлено, что двухстадийный метод позволяет получать АУ с большим количеством мезо- и макропор и большей площадью поверхности [43, 44].

АУ получен в процессе карбонизации скорлупы косточек абрикоса при 700 °C в течение 2 ч и термической активации в атмосфере  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  (85 : 15) при температуре 800 °C в течение 1 ч. Выход АУ составил 35%. Определено, что объем пор полученного АУ составил 1 см<sup>3</sup>/г [45].

Проведена карбонизация косточек абрикоса при температуре 550 °C в вакууме и последующей активации водяным паром при 850 °C в течение 1 ч. Определено, что площадь поверхности полученного АУ составила 506 м<sup>2</sup>/г, общий объем пор – 0.305 см<sup>3</sup>/г, объем микропор – 0.226 см<sup>3</sup>/г, а средний размер микропор составил 1.321 нм [46].

Измельченные абрикосовые и персиковые косточки фракциями 0.3–3.0 мм использовались для получения АУ. Карбонизация проводилась при температуре 500–950 °C в течение 1–3 ч; активация осуществлялась при 800–850 °C в течение 1.0–5.0 ч с использованием водяного пара и парогазовой смеси. Экспериментально определено, что оптимальными условиями активации карбонизата из абрикосовых косточек является температура 850 °C в течение 3 ч. Найдено, что полученные АУ имеют адсорбционную активность по красителю «Метиленовый голубой» 6.39 м<sup>2</sup>/г, по йоду – 25.34% [47].

Для получения АУ измельченную скорлупу косточек, в том числе *Prunus armeniaca*, влажностью 15–20% размерами 1.0–1.5 мм обрабатывали в реакторе при температуре 350–400 °С и давлении 15–22 МПа, затем пиролизную массу подвергали обработке парогазовой смесью. Указывается, что полученные АУ обладают повышенной химической устойчивостью, позволяющей многократно их регенерировать, и повышенной на 15–20% механической прочностью при высокой пористости – 0.6–1.0 см<sup>3</sup>/г [48].

В противоположность предыдущей работе исследовались процессы карбонизации в вакууме и парогазовой активации скорлупы абрикосовых косточек. Исследование линейных изотерм адсорбции/десорбции в образцах, полученных парогазовой активацией карбонизатов из косточек абрикоса, показало, что общая удельная поверхность по методу БЭТ составила 560 м<sup>2</sup>/г, общий объем пор – 0.3 см<sup>3</sup>/г, объем микропор, рассчитанный по методу Дубинина-Радушкевича, – 0.266 см<sup>3</sup>/г [49].

Проведена карбонизация абрикосовых косточек при температуре 500 °С в течение 1 ч и активация полученного карбонизата с использованием водяного пара и парогазовой смеси при 950 °С в течение 1.5 ч. Определено, что удельная поверхность АУ составила 1390 м<sup>2</sup>/г, активность по красителю «Метиленовый голубой» – 356 мг/г, по йоду – 1083 мг/г, что выше таковых характеристик для промышленных АУ марок ОУ-А, БАУ-А и Карболен [50].

Кроме двухстадийного способа получения АУ из лигноцеллюлозного сырья предлагается трехстадийный способ получения последнего из косточек абрикоса для медицинских целей. Показана необходимость проведения процесса карбонизации в два этапа: низкотемпературная стадия осуществляется при 350–400 °С и высокотемпературная стадия – при 800–850 °С с последующей парогазовой активацией карбонизованного продукта водяным паром. На первой стадии процесса карбонизации происходит удаление основной массы летучих веществ, а формирование первичной пористой структуры углеродного материала проходит на высокотемпературной стадии. Результаты исследования синтезируемых углеродных материалов подтвердили формирование однородной микропористой структуры углеродных материалов, полученных из фруктовой косточки [51].

Для увеличения поверхности АУ предлагается активация карбонизата, полученного из отходов переработки сельскохозяйственного сырья, в том числе косточек абрикоса, микроволновым излучением. Найдено, что АУ из косточек абрикоса имеет общую площадь, определенную по методу БЭТ (529 м<sup>2</sup>/г), общий объем пор и микропор – 0.26 и 0.19 см<sup>3</sup>/г соответственно [52]. Использование микроволновой печи в качестве метода активации значительно уменьшает потребляемую энергию и время активации по сравнению с обычными методами. Фактически оптимальные мощности СВЧ излучения варьируются от 400 до 650 Вт, а время излучения – от 3 до 6 мин.

Тем не менее указывается, что двух- и трехстадийные методы получения АУ из твердого сырья экономически затратны. В этой связи проводились исследования по получению АУ из оболочек косточек *Prunus armeniaca* одностадийным методом.

Осуществлялась карбонизация сельскохозяйственных отходов, в том числе и оболочек абрикосовых косточек в атмосфере азота при 550 °С. Определено, что выход карбонизата составил 35.5%, площадь, определенная по низкотемпературной адсорбции азота методом БЭТ, – 17.1 м<sup>2</sup>/г, а средний размер микропор – 1.12 нм. Определено, что максимальная адсорбционная емкость по красителю «Метиленовый синий» составляет 10.8 мг/г, по йоду – 48.0 мг/г [53]. Карбонизация абрикосовых косточек при 850 °С в течение 1 ч в атмосфере азота позволила получить АУ с площадью поверхности 328.6 м<sup>2</sup>/г, объемом и размером микропор 0.15 см<sup>3</sup>/г и 1.62 нм соответственно [54]. Выявлено, что при увеличении температуры обработки косточек абрикоса выход конечного продукта снижается, процентное содержание углерода и плотность карбонизата увеличивается [55].

Исследовалось влияние содержания серы (0.024–0.04%) в различных образцах косточек абрикоса, подвергнутых одностадийному процессу парового пиролиза и активации при температурах 650–850 °С в течение 1–4 ч. Определено, что АУ с наибольшей площадью поверхности (1092 м<sup>2</sup>/г) получен из образца косточек абрикоса с размером частиц 1–3.35 мм и с содержанием серы 0.04% в условиях активации при 800 °С в течение 4 ч [56].

Проведены исследования по разработке метода получения гранулированных АУ сферической формы на основе отходов растительного сырья, в том числе и из косточек абрикоса. Процесс гранулирования сорбентов осуществлялся методом жидкостного диспергирования композиции, содержащей отходы растительного происхождения и связующее, в качестве которого применяли новолачную фенолформальдегидную смолу, в массовом

соотношении 1 : 5 и полученную композицию распыляли в раствор серной кислоты с концентрацией 30–35% для отверждения гранул. Последние выдерживались в растворе кислоты в течение 24–30 ч, сферические гранулы отделялись от жидкости, промывались дистиллированной водой до  $\text{pH} = 5\text{--}6$  и сушились сначала на воздухе, затем подвергались термообработке при высоких температурах. Определено, что суммарный объем пор составил  $1.5 \text{ см}^3/\text{г}$ , объем микро- мезо- и макропор  $0.430$ ,  $0.265$  и  $0.824 \text{ см}^3/\text{г}$  [57].

#### **Извлечение ионов металлов активированным углем из косточек абрикоса**

АУ, полученные в результате обжига косточек абрикоса, исследовались для удаления ионов металлов из модельных и сточных вод.

АУ, полученный из косточек *Prunus armeniaca* и имеющий площадь поверхности от 900 до  $1387 \text{ м}^2/\text{г}$ , использовался для удаления ионов  $\text{Au}^+$ . Построенные изотермы адсорбции с начальной концентрацией ионов  $\text{Au}(\text{I})$  от 20 до  $150 \text{ мг}/\text{дм}^3$  наиболее точно описываются моделью Фрейндлиха. Определенные по уравнению Ленгмюра значения максимальной сорбционной емкости АУ по ионам  $\text{Au}(\text{I})$  при температурах  $25\text{--}60 \text{ }^\circ\text{C}$  составили от 6.0 до  $30.2 \text{ мг}/\text{г}$  соответственно. Определены термодинамические параметры процесса:  $\Delta G^0 = 0.048\text{--}0.134 \text{ кДж}/\text{моль}$ ,  $\Delta H^0 = -85.71 \text{ кДж}/\text{моль}$ ,  $\Delta S^0 = -0.288\text{--}0.257 \text{ Дж}/\text{моль} \cdot \text{К}$ . Методом планирования эксперимента определены условия процесса, при котором достигается максимальная степень извлечения ионов золота:  $\text{pH} = 10.5$ , дозировка АУ –  $20 \text{ г}/\text{дм}^3$ , время адсорбции – 3 ч [58, 59].

Исследован процесс адсорбции ионов  $\text{Co}^{2+}$  АУ, полученным из косточек абрикоса, в статических условиях при начальной концентрации названных ионов  $10\text{--}80 \text{ мг}/\text{дм}^3$ ,  $\text{pH} = 2\text{--}13.5$ , дозировке адсорбента  $5\text{--}50 \text{ г}/\text{дм}^3$  и температуре  $298\text{--}323 \text{ К}$ . Максимальная адсорбционная емкость по ионам  $\text{Co}^{2+}$ , вычисленная по уравнению Ленгмюра, составила  $111.11 \text{ мг}/\text{г}$  при  $\text{pH}=9$ . Определено, что изотермы адсорбции более точно описываются моделью Ленгмюра ( $R^2=0.9993$ ), а кинетика процесса подчиняется модели псевдо-второго порядка [60].

Изучено извлечение из модельных растворов ионов  $\text{Cr}(\text{VI})$  с начальной концентрацией  $10\text{--}40 \text{ мг}/\text{дм}^3$  АУ из косточек плодов деревьев в динамических условиях. В зависимости от скорости протекания раствора через слой сорбента, высоты последнего, начальной концентрации ионов хрома, максимальная сорбционная емкость колебалась от  $3.15$  до  $10.64 \text{ мг}/\text{г}$ . Определено, что наиболее адекватно процесс адсорбции описывается моделью Томаса [61].

Также определены параметры, при которых достигаются лучшие сорбционные характеристики при удалении ионов  $\text{Cr}(\text{VI})$  в статических условиях АУ, изготовленным из косточек абрикоса. Найдено, что при начальной концентрации ионов  $\text{Cr}(\text{VI})$   $5 \text{ мг}/\text{дм}^3$ , наименьшее конечное значение  $\sim 2.75 \text{ мг}/\text{дм}^3$  достигается при  $\text{pH} = 7$ , времени контактирования 30 мин, дозировке сорбционного материала  $0.25 \text{ г}/\text{дм}^3$  и температуре  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  [62].

АУ из скорлупы косточек абрикоса исследовались для удаления ионов  $\text{Cu}^{2+}$  из модельных растворов с концентрацией последних  $25\text{--}1000 \text{ ppm}$ . Определено, что при значениях  $\text{pH} = 2\text{--}5$  и температурах  $290$  и  $308 \text{ К}$  значения максимальной сорбционной емкости, вычисленные из уравнения Ленгмюра, составили  $23.64\text{--}48.01 \text{ мг}/\text{г}$  [63].

Образцы АУ, полученные из скорлупы косточек абрикоса, исследовались для адсорбции ионов  $\text{Mn}^{2+}$ . Определено, что при дозировке АУ  $2.5 \text{ г}/\text{дм}^3$  максимальное значение сорбционной емкости, вычисленное из уравнения Ленгмюра, составило  $10.2 \text{ мг}/\text{г}$  при  $\text{pH} = 5\text{--}6$  [64].

Также АУ, полученные из скорлупы косточек абрикоса, использовались для извлечения ионов  $\text{Pb}^{2+}$  [65–67]. Определено, что АУ, активированный обработкой серной кислотой, имеет площадь  $393.2 \text{ м}^2/\text{г}$ , объем пор –  $0.192 \text{ м}^3/\text{г}$ , сорбционную емкость по йоду и красителю «Метиленовый синий»  $134$  и  $91 \text{ мг}/\text{г}$  соответственно [65]. Максимальная сорбционная емкость составила  $21$ ,  $38$  ионов  $\text{Pb}^{2+}/\text{г}$  АУ при  $\text{pH} = 6$  [66]. Выявлено, что изотерма адсорбции наиболее точно описывается моделью Ленгмюра, а кинетика процесса подчиняется модели псевдо-второго порядка [67]. Установлено по термодинамическим параметрам, что процесс адсорбции является эндотермическим и спонтанным.

Имеется также информация по изучению удаления ионов таллия из модельных растворов АУ, модифицированным красителем марки «Родамин В». Найдено, что процесс протекает быстро и равновесие устанавливается в течение 30 мин. Выявлено, что кинетика процесса соответствует модели псевдо-второго порядка [68].

Как следует из приведенных выше сведений, адсорбционные характеристики по ионам металлов АУ сильно отличаются. Данное обстоятельство объясняется тем, что АУ получались различными способами, имеют отличные друг от друга сорбционные характеристики и эксперименты проводились в различных

условиях. Гораздо информативнее сравнивать адсорбционные характеристики в том случае, когда эксперименты проводились в сравнимых условиях. В этой связи ниже приводятся данные по сорбционной емкости 2 и более ионов металлов, полученные с использованием АУ из скорлупы косточек абрикоса в одинаковых условиях экспериментов.

Проведены исследования по получению и применению АУ из косточкового сырья, в том числе и из скорлупы косточек абрикоса, для извлечения ионов  $\text{Ag}^+$  и  $\text{Au}^+$  из цианидсодержащих растворов. Экспериментами установлено, что оптимальными условиями для карбонизации косточкового сырья является  $T=750\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ , активации –  $T=850\text{--}860\text{ }^\circ\text{C}$ . АУ обладают однородной микропористой структурой, высокими значениями характеристической энергии  $E^0=26\text{ кДж/моль}$  при объеме микропор  $W^0=0.32\text{ см}^3/\text{г}$ . Определено, что максимальная сорбционная емкость по ионам  $\text{Ag}^+$  составляет  $4.6\text{ мг/г}$ , по ионам  $\text{Au}^+$  –  $11.9\text{ мг/г}$ . Установлено, что по селективности к ионам золота и серебра АУ не уступает аниониту марки АМ-2Б. Кроме того, выявлено, что количество поглощенного АУ ионов  $\text{Ag}$  и  $\text{Au}$  намного превышает адсорбцию примесных ионов металлов ( $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$ ). Коэффициент селективности составил  $K_{\text{сеп}}=90.16\%$  [69]. Результаты комплексной обработки экспериментальных данных методом равновесно-кинетического анализа свидетельствуют о внутридиффузионном характере адсорбции ионов золота и серебра из растворов АУ [70].

АУ из скорлупы косточек абрикоса исследовалась для извлечения ионов  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  из модельных растворов. Найдено, что максимальная адсорбционная емкость достигается при  $\text{pH} = 6\text{--}6.5$ . При начальных концентрациях ионов  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$   $200$  и  $300\text{ мг/дм}^3$  максимальные сорбционные емкости составили  $\sim 85$  и  $125\text{ мг/г}$  соответственно, а степень извлечения названных ионов при дозировке АУ  $2\text{ г/дм}^3$  – более  $95\%$  в обоих случаях. Выявлено, что изотермы адсорбции наиболее точно описываются моделью Ленгмюра, кинетика процесса – моделью псевдо-второго порядка. Вычисленные термодинамические характеристики свидетельствуют о протекании спонтанного и эндотермического процесса [71].

Исследована адсорбция ионов  $\text{Cr}^{3+}$  и  $\text{Pb}^{2+}$  с варьированием параметров процесса АУ из скорлупы косточек *Prunus armeniana*. Определено, что максимальная сорбционная емкость, вычисленная из уравнения Ленгмюра, составила по ионам  $\text{Cr}^{3+}$   $12.69\text{ мг/г}$ , по ионам  $\text{Pb}^{2+}$  –  $23\text{--}89\text{ мг/г}$  (начальная концентрация ИТМ –  $50\text{ мг/дм}^3$ ,  $\text{pH} = 6$ , время контактирования –  $30\text{ мин}$ ,  $140\text{ об./мин.}$ , дозировка АУ –  $4\text{ г/дм}^3$  и  $T=22\text{ }^\circ\text{C}$ ). Изотермы адсорбции более точно описываются моделью Фрейндлиха, кинетика процесса соответствует модели псевдо-второго порядка [72].

Активированные фосфорной кислотой АУ использовались для извлечения ионов  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  и  $\text{Pb}^{2+}$  из модельных растворов. Определено, что полученный АУ имеет удельную поверхность  $1098\text{ м}^2/\text{г}$ , а суммарный объем пор составляет  $0.505\text{ см}^3/\text{г}$ . При начальной концентрации ионов  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  и  $\text{Pb}^{2+}$   $100\text{ мг/дм}^3$  эффективность удаления первых двух ионов составила более  $95\%$ , ионов никеля –  $50\%$  при  $\text{pH} = 6$ , время адсорбции –  $30\text{ мин}$ ,  $140\text{ об./мин.}$ , дозировке АУ –  $2\text{ г/дм}^3$ . Определено, что максимальная сорбционная емкость, полученная в ходе проведения экспериментов, составила  $45.83$ ,  $24.28$  и  $48.44\text{ мг/г}$ . Как и в предыдущем случае, изотермы адсорбции хорошо описываются моделью Фрейндлиха, а кинетика процесса – моделью псевдо-второго порядка [73].

Исследована адсорбция ионов  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  из модельных растворов с начальной концентрацией последних  $0.4\text{ ммоль/дм}^3$  индивидуально и в смеси. Проведенными экспериментами определено, что при протекании адсорбции ионов металлов индивидуально значения сорбционной емкости названных ионов металлов расположились в ряд:  $\text{Cd}^{2+}$  ( $0.042\text{ ммоль/г}$ ) >  $\text{Cu}^{2+}$  ( $0.041\text{ ммоль/г}$ ) >  $\text{Pb}^{2+}$  ( $0.039\text{ ммоль/г}$ ) >  $\text{Zn}^{2+}$  ( $0.038\text{ ммоль/г}$ ). В том случае, когда проводилась адсорбция ИТМ из смеси с начальной концентрации каждого иона  $0.4\text{ ммоль/дм}^3$ , ряд значений сорбционной емкости расположился в несколько иной последовательности:  $\text{Cu}^{2+}$  ( $0.033$ ) >  $\text{Pb}^{2+}$  ( $0.029$ ) >  $\text{Zn}^{2+}$  ( $0.0061$ ) >  $\text{Cd}^{2+}$  ( $0.0049$ ) ммоль/г. В зависимости от природы ИТМ, изотермы адсорбции названных ионов описываются моделями Ленгмюра и Фрейндлиха [74]. Также изучалась кинетика процесса адсорбции вышеназванных ионов из одно- и четырехкомпонентных растворов с использованием моделей Вебера-Морриса, Бойда и метода моментов. Установлено, что модель Вебера-Морриса лучше всего коррелирует с экспериментальными данными [75].

В том случае, когда проводилась адсорбция вышеназванных ИТМ с начальной концентрацией  $100\text{ мг/дм}^3$  в динамических условиях, степень извлечения ионов расположилась в следующий ряд:  $\text{Cu}^{2+}$  ( $95.5\%$ ) >  $\text{Pb}^{2+}$  ( $89.6\%$ ) >  $\text{Cd}^{2+}$  ( $86.0\%$ ) >  $\text{Zn}^{2+}$  ( $60.0\%$ ) [76]. Проведенные эксперименты в аппарате с псевдооживленным слоем подтвердили, что процесс массопереноса ионов  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  удовлетворительно описывается моделью гомогенной диффузии в твердой фазе [77].

Исследовалась удаление ионов  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  и  $\text{Cr(VI)}$  из водных растворов путем адсорбции на АУ, полученным карбонизацией и активацией после обработки серной кислотой (1 : 1) при 200 °С в течение 24 ч. Определено, что сорбционная емкость по ИТМ зависит от pH раствора и наблюдалась при pH = 1 для ионов  $\text{Cr(VI)}$  (34.7 мг/г) и pH = 6 для остальных ионов металлов: 33.57 мг/г по ионам  $\text{Cd}^{2+}$ , 30.07 мг/г – по ионам  $\text{Co}^{2+}$ , 29.47 мг/г – по ионам  $\text{Cr}^{3+}$ , 27.21 мг/г – по ионам  $\text{Ni}^{2+}$ , 24.21 мг/г – по ионам  $\text{Cu}^{2+}$  и 22.85 мг/г – по ионам  $\text{Pb}^{2+}$  [78].

### *Красители*

АУ, полученные из отходов от переработки сельскохозяйственного сырья, широко исследовались в качестве адсорбентов для удаления различных красителей из модельных и сточных вод [79]. Обнаружено, что адсорбционные характеристики АУ, полученных из различных сельскохозяйственных отходов, различны и сильно зависят от состава и структуры сырья [80].

Исследован процесс адсорбции красителя марки «Метиленовый голубой» АУ, полученным из скорлупы косточек абрикоса. Определено, что при начальной концентрации красителя  $1.5 \cdot 10^{-5}$  моль/дм<sup>3</sup> и дозировке сорбента 33.3 г/дм<sup>3</sup>, степень извлечения составляет более 99.25% [81]. Выявлено, что максимальная сорбционная емкость, определенная из уравнения Ленгмюра, составляет 4.11 мг/г и зависит от времени активации. Изотерма адсорбции более адекватно ( $R^2=0.989$ ) описывается моделью Фрейндлиха [82].

АУ, полученный из скорлупы косточек абрикоса, исследовался в процессе адсорбции красителя марки «Астразон синий FGRL» из модельных растворов с варьированием параметров процесса – начальной концентрации красителя (100–300 мг/дм<sup>3</sup>), дозы адсорбента (3–12 г/дм<sup>3</sup>) и температуры (303–323 К). Результаты исследований показали, что адсорбционная способность АУ по красителю увеличивалась с повышением начальной концентрации красителя, дозы сорбента и температуры раствора. Изотермы адсорбции более точно описываются моделью Ленгмюра, а максимальная сорбционная емкость, вычисленная из уравнения Ленгмюра, составила 181.5 мг/г. Вычисленные термодинамические характеристики показали, что процесс является эндотермическим, носит спонтанный характер [83].

Также АУ из скорлупы косточек абрикоса исследовался для адсорбции красителя марки «Кумасси синий G-250» из модельных растворов. Установлено, что адсорбционная емкость по красителю составляет 10.09 мг/г при температуре 22.5 °С и 98.022 мг/г, при температуре 50 °С и pH ~ 2. Выявлено, что изотермы более адекватно описываются моделью Фрейндлиха, а кинетика процесса описывается моделью псевд второго порядка. Термодинамические параметры ( $\Delta G^0=-19.27$  и  $-15.21$  кДж/моль при температурах 295.5 и 329 °С соответственно,  $\Delta H^0=-55.088$  кДж/моль) свидетельствуют о протекании хемосорбции [84].

Процесс адсорбции красителя марки «Конго красный» полученным из скорлупы косточек абрикоса АУ показал, что максимальная сорбционная емкость последнего составляет 32.85 мг/г при 25 °С и pH = 13 и начальной концентрации красителя 100 мг/дм<sup>3</sup>. Рассчитанные термодинамические параметры процесса указывают на спонтанный и эндотермический характер процесса адсорбции. Выявлено, что изотерма адсорбции более точно описывается моделью Дубинина-Радущкевича, а кинетика процесса – моделью псевд второго порядка [85, 86].

Три образца АУ получены из скорлупы косточек абрикоса различными методами активации и исследовались для удаления красителя марки «Сафранин» из модельных растворов. В качестве методов активации использовались обработка паром и в атмосфере азота, с использованием концентрированной серной кислоты и смешанная активация. Найдено, что полученные АУ обладают высокой сорбционной емкостью по названному красителю – 243.9–294.1 мг/г [87].

АУ, полученный активацией серной кислотой карбонизата из скорлупы косточек абрикоса, исследовался для удаления основного красителя марки «Астразон желтый 7G» с варьированием параметров процесса (концентрация красителя – 50–300 мг/дм<sup>3</sup>, pH – 4–10, дозировка сорбента – 2–8 г/дм<sup>3</sup>, температура – 25–50 °С и времени контактирования 35 мин). Определено, что наибольшее значение сорбционной емкости 221.23 мг/г, вычисленное из уравнения Ленгмюра, наблюдалось при 50 °С и pH=6. Изотермы адсорбции адекватно описывались моделями Ленгмюра и Фрейндлиха в зависимости от температуры раствора, а кинетика процесса – моделью Вебера-Морриса. Термодинамические параметры указывают на то, процесс является спонтанным и эндотермическим [88].

АУ, полученный карбонизацией скорлупы косточек абрикоса при 700 °С в течение 1 ч и активированный смесью фосфорной и азотной кислот, исследовался для адсорбции красителей марок «Метиленовый голубой» и «Метиловый оранжевый» с варьированием параметров процесса. Найдено, что максимальная сорбционная емкость для названных красителей составила 36.7 и 32.25 мг/г соответственно. Изотермы адсорбции более точно описываются моделью Ленгмюра, а кинетика процесса – моделью псевдо-второго порядка [89].

### **Лекарственные препараты и пестициды**

Имеется несколько публикаций по использованию АУ, полученных из скорлупы косточек абрикоса, для извлечения пестицидов и лекарственных препаратов из водных сред.

Три вида АУ, полученных из древесины, скорлупы грецких орехов и косточек абрикоса, исследовались для извлечения пестицида Атразин и ионов  $\text{Cr}^{3+}$  из модельных растворов индивидуально или в смеси с варьированием параметров процесса. Найдено, что АУ из скорлупы косточек абрикоса имеет наименьшую удельную поверхность из использованных сорбентов (276.15 м<sup>2</sup>/г). Определены значения максимальной сорбционной емкости АУ по Атразину и ионам хрома. Для АУ из косточек абрикоса данные показатели составили 46.3 и 181.81 мг/г для адсорбции из индивидуальных растворов поллютантов и 105.26 и 175.44 мг/г соответственно. Кинетика адсорбции Атразина и ионов  $\text{Cr}^{3+}$  описываются моделью псевдо-второго порядка. Определено, что изотермы адсорбции Атразина более точно описываются моделью Фрейндлиха, ионов  $\text{Cr}^{3+}$  – модели Ленгмюра [90].

Карбонизат, полученный из скорлупы косточек абрикоса и активированный раствором  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , использовался для удаления тетрациклина с варьированием параметров процесса. Найдено, что удельная площадь поверхности, общий объем пор и средний диаметр пор АУ составили 307.6 м<sup>2</sup>/г, 0.191 см<sup>3</sup>/г и 1.957 нм соответственно. Максимальная сорбционная емкость полученного АУ по тетрациклину составила 308.33 мг/г. Выявлено, что изотерма адсорбции более точно описывается моделью Фрейндлиха, а кинетика процесса – модель псевдо-второго порядка [91].

### **Нефть и нефтепродукты**

Несколько больше публикаций в мировой литературе по исследованию извлечения нефти и продуктов от ее переработки, а также химикатов, полученных в результате органического синтеза с использованием АУ из скорлупы косточек абрикоса [92].

Исследовано извлечение нефти и нефтепродуктов АУ, полученным при карбонизации измельченной скорлупы косточек абрикоса при 350 и 600 °С. Выявлено, что более высокая температура карбонизации способствует образованию более высокой удельной поверхности. Также определено, что с уменьшением диаметра частиц АУ сорбционная емкость по нефтепродуктам увеличивается. Определены максимальные значения сорбционной емкости для АУ с размерами частиц 0.5 мм, которые составили для нефти 2.0 г/г, для масла И-20А – 4.0 г/г, для керосина – 1.5 г/г и для бензина – 0.7 г/г [92].

АУ, полученный карбонизацией при 600 °С скорлупы фруктовых косточек абрикоса и дальнейшей механической активацией в присутствии ПАВ с последующей дополнительной активацией в потоке  $\text{CO}_2$ , имеет значение сорбционной емкости по дизельному топливу 40 мг/г при концентрации нефтепродукта в воде 200 мг/м<sup>3</sup> [93].

Исследована адсорбция фенола и нитрофенола АУ, полученным из скорлупы абрикосовых косточек с варьированием параметров процесса. АУ получался активированием карбонизата паром при 700 °С. Найдено, что удельная поверхность АУ составляет 1175 м<sup>2</sup>/г, суммарный объем пор – 0.93 см<sup>3</sup>/г. Определено, что максимальная адсорбционная емкость по фенолу, вычисленная из уравнения Ленгмюра, составляет 152 мг/г, по нитрофенолу – 179 мг/г [95].

АУ, полученный активированием карбонизата из скорлупы косточек абрикоса фосфорной кислотой, использовался для извлечения фенола, *мета*- и *пара*-крезола, 2-хлорфенола, 4-нитрофенола, 2,4-дихлорфенола и 2,4-динитрофенола. Определено, что дизамещенные производные фенола адсорбируются в больших количествах, чем монозамещенные производные. Определено, что максимальные сорбционные емкости составляют от 101.7 до 533.25 мг/г [96].

Пять видов АУ, изготовленные из различных отходов сельскохозяйственного производства, в том числе и из скорлупы косточек абрикоса, исследованы для извлечения нафталина из модельных растворов.

Выявлено, что АУ, полученный из отходов переработки абрикоса, имеет малую удельную поверхность и, соответственно, самое низкое значение максимальной сорбционной емкости (175.44 мг/г) из исследованных образцов углей [97]. Определено, что все изотермы адсорбции более точно описываются моделью Фрейндлиха, а кинетика процесса – моделью псевдо-второго порядка.

Таким образом, обобщены сведения по использованию компонентов биомассы абрикоса (*Prunus armeniaca*) в качестве сорбционных материалов для удаления различных поллютантов из водных сред. Выявлено, что наиболее исследованными являются скорлупа косточек абрикоса, основным путем утилизации которого является получение АУ. В зависимости от параметров карбонизации и активации, АУ имеют различные значения удельной поверхности – от 25 м<sup>2</sup>/г до 1200 м<sup>2</sup>/г и более. Необходимо исследовать остальные компоненты и отходы от переработки биомассы абрикосовых деревьев в качестве сорбционных материалов. Показана возможность увеличения сорбционных характеристик компонентов биомассы абрикоса химической или физико-химической обработкой.

*Работа выполнена в рамках реализации Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова с использованием оборудования Центра Высочайших Технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.*

### Список литературы

1. Bulgariu L., Escudero L.B., Bello O.S., Iqbal M., Nisar J., Adegoke K.A., Alakhras F., Kornaros M., Anastopoulos I. The utilization of leaf-based adsorbents for dyes removal // *Journal of Molecular Liquids*. 2019. Vol. 276. Pp. 728–747. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.12.001.
2. Anastopoulos I., Robalds A., Tran H.N., Mitrogiannis D., Giannakoudakis D.A., Hosseini-Bandegharaei A., Dotto G.L. Removal of heavy metals by leaves-derived biosorbents // *Environmental Chemistry Letters*. 2019. Vol. 17. Pp. 755–766. DOI: 10.1007/s10311-018-00829-x.
3. Alekseeva A.A., Shaikhiev I.G., Fazullin D.D., Kharlyamov D.A., Mavrin G.V., Stepanova S.V., Shaimardanova A.S. The use of leaves of different tree species as a sorption material for extraction of heavy metal ions from aqueous media // *International Journal of Pharmacy & Technology*. 2016. Vol. 8. Pp. 14375–14391.
4. Dahri M.K., Kooh M.R.R., Lim L.B.L. Application of *Casuarina equisetifolia* needle for the removal of methylene blue and malachite green dyes from aqueous solution // *Alexandria Engineering Journal*. 2015. Vol. 54. Pp. 1253–1263. DOI: 10.1016/j.aej.2015.07.005.
5. Hadjmohammadi M.R., Salary M., Biparva P. Removal of Cr (VI) from aqueous solution using pine needles powder as a biosorbent // *Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation*. 2011. Vol. 6. Pp. 1–13.
6. Denisova T.R., Kharlyamov D.A., Shaikhiev I.G., Galimova R.Z., Sadykova S.V. Material performance of nickel ions adsorption by *Larix sibirica* needles // *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7. Pp. 219–222. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.7.20551.
7. Sen T.K., Afroze S., Ang H.M. Equilibrium, kinetics and mechanism of removal of methylene blue from aqueous solution by adsorption onto pine cone biomass of *Pinus radiata* // *Water Air Soil Pollution*. 2011. Vol. 218. Pp. 499–515. DOI: 10.1007/s11270-010-0663-y.
8. Değirmen G., Kılıç M., Çepeliogullar Ö., Pütün A.E. Removal of copper(II) and cadmium(II) ions from aqueous solutions by biosorption onto pine cone // *Water Science and Technology*. 2012. Vol. 66. Pp. 564–572. DOI: 10.2166/wst.2012.210.
9. Deniz F. Color removal from aqueous solutions of metal-containing dye using pine cone // *Desalination and Water Treatment*. 2013. Vol. 51. Pp. 4573–4581. DOI: 10.1080/19443994.2012.751882.
10. Pathak P.D., Mandavgane S.A., Kulkarni B.D. Fruit peel waste as a novel low-cost bio adsorbent // *Reviews in Chemical Engineering*. 2015. Vol. 31. Pp. 361–381. DOI: 10.1515/revce-2014-0041.
11. Ay Ç.Ö., Özcan A.S., Erdoğan Y., Özcan A. Characterization of *Punica granatum* L. peels and quantitatively determination of its biosorption behavior towards lead(II) ions and Acid Blue 40 // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2012. Vol. 100. Pp. 197–204. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2012.05.013.
12. Mallampati R., Xuanjun Li, Adin A., Valiyaveetil S. Fruit peels as efficient renewable adsorbents for removal of dissolved heavy metals and dyes from water // *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2015. Vol. 3. Pp. 1117–1124. DOI: 10.1021/acssuschemeng.5b00207.
13. Sahnoune M.N., Yeddou A.R. Potential of sawdust materials for the removal of dyes and heavy metals: examination of isotherms and kinetics // *Desalination and Water Treatment*. 2016. Vol. 57. Pp. 24019–24034. DOI: 10.1080/19443994.2015.1135824.
14. Davoudi M., Alidadi H., Mehrabpour M., Dolatabadi M. Competitive removal of cationic dye (BR 46) and heavy metal (copper II) from synthetic textile effluent using adsorbent of *Melia azedarach* sawdust // *Desalination and Water Treatment*. 2018. Vol. 118. Pp. 326–335. DOI: 10.5004/dwt.2018.22645.
15. Denisova T.R., Mavrin G.V., Sippel I.Y. and ets. The influence of ash tree sawdust acid treatment on the removal of crude oil from water surfaces // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016. Vol. 7. Pp. 1742–1750.

16. Al-Najar B., Bououdina M., Vijaya J.J., Nair R.R., Tatarchuk T. Removal of toxins from the environment using date palm seeds // *Sustainable Agriculture Reviews*. 2019. Vol. 34. Pp. 207–245. DOI: 10.1007/978-3-030-11345-2\_11.
17. Silva A.C.P., Jorgetto A.O., Wondracek M.H.P., Galera R.M., Schneider J.F., Saeki M.J., Pedrosa V.A., Zara L.F., Castro G.R. Properties, characteristics and application of grinded *Malpighia emarginata* seeds in the removal of toxic metals from water // *Groundwater for Sustainable Development*. 2018. Vol. 6. Pp. 50–56. DOI: 10.1016/j.gsd.2017.10.006.
18. Nacke H., Gonçalves Jr. A.C., Coelho G.F., Schwantes D., Campagnolo M.A., Leismann E.A.V., Junior É.C., Miola A.J. Removal of Cd (II) from water using the waste of jatropha fruit (*Jatropha curcas* L.) // *Applied Water Science*. 2017. Vol. 7. Pp. 3207–3222. DOI: 10.1007/s13201-016-0468-2.
19. Souza I.P.A.F., Cazetta A.L., Pezoti O., Almeida V.C. Preparation of biosorbents from the Jatoba (*Hymenaea courbaril*) fruit shell for removal of Pb(II) and Cd(II) from aqueous solution // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2017. Vol. 189. Pp. 632–644. DOI: 10.1007/s10661-017-6330-7.
20. Halysh V., Sevastyanova O., Riazanova A.V., Pasalskiy B., Budnyak T., Lindström M.E., Kartel M. Walnut shells as a potential low-cost lignocellulosic sorbent for dyes and metal ions // *Cellulose*. 2018. Vol. 25. Pp. 4729–4742. DOI: 10.1007/s10570-018-1896-y.
21. Степанова С.В., Шайхиев И.Г., Свергузова С.В. Очистка модельных стоков, содержащих ионы тяжелых металлов, шелухой пшеницы // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2014. №6. С. 183–186.
22. Абрикос обыкновенный [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Абрикос\\_обыкновенный](https://ru.wikipedia.org/wiki/Абрикос_обыкновенный).
23. Латыпова Л.А., Шайхиев И.Г., Фазуллин Д.Д., Свергузова С.В. Оценка сорбционных показателей листы деревьев по ионам Fe(III) // *Сборник докладов Международной научно-технической конференции «Инновационные подходы в решении современных проблем рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды»*. Алушта, 2019. Ч. 1. С. 213–216.
24. Гафиуллина А.И., Шайхиев И.Г., Свергузова С.В. Адсорбция ионов Cu(II) на опилках абрикоса // *Сборник докладов Международной научно-технической конференции «Инновационные подходы в решении современных проблем рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды»*. Алушта, 2019. Ч. 1. С. 170–175.
25. Zurov D.E., Molnar T.J., Eisenman S.W., Ford M.T. and ets. Genetic Resources of Apricots (*Prunus armeniaca* L.) in Central Asia // *Hortscience*. 2013. Vol. 48. Pp. 681–691. DOI: 10.21273/HORTSCI.48.6.681.
26. Khazaei I., Aliabad M., Mosavian H.T.H. Use of agricultural waste for removal of Cr(VI) from aqueous solution // *Iranian Journal of Chemical Engineering*. 2011. Vol. 8. Pp. 11–23.
27. Kalipci E., Namal O.O. Removal of Cr(VI) using a novel adsorbent modification. Ultrasonic method with apricot kernel shells // *Environment Protection Engineering*. 2018. Vol. 44. Pp. 79–93. DOI: 10.5277/epe180306.
28. Šoštaric T., Petrovic M., Milojkovic J., Lacnjevac C., Cosovic A., Stanojevic M., Stojanovic M. Application of apricot stone waste from fruit processing industry in environmental cleanup: copper biosorption study // *Fruits*. 2015. Vol. 70. Pp. 271–280. DOI: 10.1051/fruits/2015028.
29. Milojković J., Mihajlović M., Šoštaric T., Lopičić Z., Petrović M., Lačnjevac Č., Stojanović M. Ispitivanje efikasnosti različitih sorpcionih materijala za uklanjanje Cu(II) jona iz vodenog rastvora // *Zaštita materijala*. 2014. Vol. 55. Pp. 25–31.
30. Petrovic M.S., Šoštaric T.D., Pezo L.L., Stankovic S.M., Lačnjevac Č.M., Milojković J.T., Stojanović M.D. Usefulness of ANN-based model for copper removal from aqueous solutions using agro industrial waste materials // *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*. 2015. Vol. 21. Pp. 249–259. DOI: 10.2298/CICEQ140510023P.
31. Šoštaric T.D., Petrovic M.S., Petrovic E.T., Milojković J.T., Kragovic M.M., Lačnjevac Č.M., Stojanović M.D. Uticaj hemijske modifikacije na adsorpcione karakteristike biosorbenta na bazi koštica kajsija // *Zastita Materijala*. 2015. Vol. 56. Pp. 321–328. DOI: 10.5937/ZasMat1503321S.
32. Milojković J., Stojanović M., Mihajlović M., Lopičić Z., Šoštaric T., Petrović M., Petrovic E. Pb (II) biosorption by selected waste biomass // *Zaštita materijala*. 2016. Vol. 57. Pp. 418–423. DOI: 10.5937/ZasMat1603418M.
33. Kahraman S., Dogan N., Erdemoglu S. Use of various agricultural wastes for the removal of heavy metal ions // *International Journal of Environment and Pollution*. 2008. Vol. 34. Pp. 275–284.
34. Šoštaric T.D., Petrović M.S., Pasto F.T., Lončarević D.R., Petrović J.T., Milojković J.V., Stojanović M.D. Study of heavy metals biosorption on native and alkali-treated apricot shells and its application in wastewater treatment // *Journal of Molecular Liquids*. 2018. Vol. 259. Pp. 340–349. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.03.055.
35. Namal O.O., Kalipci E. Adsorption kinetics of methylene blue using alkali and microwave-modified apricot stones // *Separation Science and Technology*. 2019. Vol. 54. Pp. 1722–1738. DOI: 10.1080/01496395.2018.1541469.
36. Yahya M.A., Al-Qodah Z., Ngah C.W.Z. Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 46. Pp. 218–235. DOI: 10.1016/j.rser.2015.02.051.
37. Ioannidou O., Zabaniotou A. Agricultural residues as precursors for activated carbon production - A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2007. Vol. 11. Pp. 1966–2005. DOI: 10.1016/j.rser.2006.03.013.
38. Paraskveva P., Kalderis D., Diamadopoulos E. Production of activated carbon from agricultural by-products // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2008. Vol. 83. Pp. 581–592. DOI: 10.1002/jctb.1847.
39. Kosheleva R., Mitropoulos A.C., Kyzas G.Z. Activated carbon from food waste // *Green adsorbents for Pollutant removal*. Springer Nature Switzerland AG, 2018. Pp. 159–182. DOI: 10.1007/978-3-319-92162-4\_5.

40. Matani A.G. Waste Management and Utilization Techniques. International Edition. Vol. 1. International Research Publication House, Delhi, 2017. 336 p.
41. Alslaihi T.M., Abustan I., Ahmad M.A., Foul A.A. A review: production of activated carbon from agricultural byproducts via conventional and microwave heating // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2013. Vol. 88. Pp. 1183–1190. DOI: 10.1002/jctb.4028.
42. Aygün A., Yenisoay-Karakaş S., Duman I. Production of granular activated carbon from fruit stones and nutshells and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2003. Vol. 66. Pp. 189–195. DOI: 10.1016/j.micromeso.2003.08.028.
43. Gergova K., Eser S. Effects of activation method on the pore structure of activated carbons from apricot stones // *Carbon*. 1996. Vol. 34. Pp. 879–888. DOI: 10.1016/0008-6223(96)00028-0.
44. Красильникова О.К., Артамонова С.Д., Волощук А.М., Евсюхин А.Е. Получение углеродных адсорбентов из абрикосовых косточек // *Химия твердого топлива*. 2005. №4. С. 65–71.
45. Usenkulova S.Z., Satayev M.I., Samonin V.V. Production of active carbons from apricot pit shells by thermal activation in the mixture of carbon dioxide and water vapors // *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 2016. Vol. 13. Pp. 1319–1325.
46. Павленко В.В., Ануров С.А., Мансуров З.А., Бийсенбаев Б.А. и др. Получение микропористых активных углей на основе карбонизированной скорлупы абрикоса // *Вестник КазНУ. Серия химическая*. 2014. №3(75). С. 103–113.
47. Текуева К.М., Клушин В.Н., Антипова О.В. Экспериментальная оценка рациональных условий получения активных углей из фрагментов косточек абрикосов и персиков – отходов пищевых предприятий Республики Кабардино-Балкария // *Успехи в химии и химической технологии*. 2013. Т. 27. №9. С. 31–34.
48. Касьянов Г.И., Нематуллаев И., Палагина И.А., Золотокопова С.В. Производство активного угля из скорлупы плодовых культур и его регенерация // *Известия ВУЗов. Пищевая технология*. 1996. №5-6. С. 87.
49. Павленко В.В., Смирнов Л.В., Конькова Т.В., Ануров С.А. Получение и исследование пористых углеродных материалов, полученных путем карбонизации и физической активации растительной клетчатки // *Успехи в химии и химической технологии*. 2014. Т. 28. №6. С. 34–35.
50. Мартиросян В.Г., Саркизова Ю.С., Казинян А.А. Очистка водно-спиртовых растворов косточковыми активными углями // *Вестник НПУА. Химические и природоохранные технологии*. 2017. №1. 5 с.
51. Фарберова Е.А., Олонцев В.Ф., Тиньгаева Е.А. Исследование условий получения активных углей медицинского назначения из косточек плодов // *Бутлеровские сообщения*. 2016. Т. 47. №8. С. 73–79.
52. Mechat F., Bouchelta C., Medjram M.S., Benrabaa R. and ets. Effect of hard and soft structure of different Journal of Environmental Chemical Engineering biomasses on the porosity development of activated carbon prepared under N<sub>2</sub>/microwave radiations // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2015. Vol. 3. Pp. 1928–1938. DOI: 10.1016/j.jece.2015.07.007.
53. Khalil L.B. Porosity characteristics of chars derived from different lignocellulosic materials // *Adsorption Science & Technology*. 1999. Vol. 17. Pp. 729–739.
54. Jankovic B., Manic N., Dodevski V., Radovic I. and ets. Physico-chemical characterization of carbonized apricot kernel shell as precursor for activated carbon preparation in clean technology utilization // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 236. 117614. 15 p. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117614.
55. Павленко В.В., Ануров С.А., Мансуров З.А., Бийсенбаев М.А. и др. Термоокислительная модификация растительной клетчатки // *Известия Национальной академии наук Республики Казахстан*. 2014. №5 (407). С. 47–53.
56. Sentorun-Shalaby C., Ucak-Astarlioglu M.G., Artok L., Sarici C. Preparation and characterization of activated carbons by one-step steam pyrolysis/activation from apricot stones // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2006. Vol. 88. Pp. 126–134. DOI: 10.1016/j.micromeso.2005.09.003.
57. Фарберова Е.А., Тиньгаева Е.А., Чучалина А.Д., Кобелева А.Р., Максимов А.С. Получение гранулированного активного угля из отходов растительного сырья // *Известия ВУЗов. Химия и химическая технология*. 2018. Т. 61. №3. С. 51–57. DOI: 10.6060/tcct.20186103.5612.
58. Soleimani M., Kaghazchi T. Adsorption of gold ions from industrial wastewater using activated carbon derived from hard shell of apricot stones – An agricultural waste // *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99. Pp. 5374–5383. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.11.021.
59. Soleimani M., Kaghazchi T. Activated hard shell of apricot stones: A promising adsorbent in gold recovery // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2008. Vol. 16. Pp. 112–118.
60. Abbas M., Kaddour S., Trari M. Kinetic and equilibrium studies of cobalt adsorption on apricot stone activated carbon // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2014. Vol. 20. Pp. 745–751. DOI: 10.1016/j.jiec.2013.06.030.
61. Yüksel S., Orhan R. The removal of Cr(VI) from aqueous solution by activated carbon prepared from apricot, peach stone and almond shell mixture in a fixed-bed column // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2019. Vol. 44. Pp. 5345–5357. DOI: 10.1007/s13369-018-3618-z.
62. Nikhil N. Removal of chromium using activated almond and apricot shells. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of technology. Delhi, 2017. 71 p.
63. Özçimen D., Ersoy-Meriçboyu A. Adsorption of Copper(II) Ions onto hazelnut shell and apricot stone activated carbons // *Adsorption Science & Technology*. 2010. Vol. 28. Pp. 327–340.
64. Savova D., Petrov N., Yardim M.F., Ekinci E., Budinova T., Razvigorova M., Minkova V. The influence of the texture and surface properties of carbon adsorbents obtained from biomass products on the adsorption of manganese ions from aqueous solution // *Carbon*. 2003. Vol. 41. Pp. 1897–1903. DOI: 10.1016/S0008-6223(03)00179-9.

65. Mouni L., Merabet D., Bouzaza A., Belkhir L. Adsorption of Pb(II) from aqueous solutions using activated carbon developed from Apricot stone // *Desalination*. 2011. Vol. 276. Pp. 148–153. DOI: 10.1016/j.desal.2011.03.038.
66. Mouni L., Belkhir L., Zouggaghe F., Tafer M. Removal of Pb (II) from aqueous solution by adsorption using activated carbon developed from Apricot stone: equilibrium and kinetic // *Desalination and Water Treatment*. 2013. 8 p. DOI: 10.1080/19443994.2013.812992.
67. Mouni L., Belkhir L., Tafer M., Zouggaghe F., Kadmi Y. Studies on the removal of Pb(II) from wastewater by activated carbon developed from Apricot stone activated with sulphuric acid // *Moroccan Journal of Chemistry*. 2014. Vol. 2. Pp. 452–456.
68. Sabermahani F., Mahani N.M., Noraldiny M. Removal of thallium (I) by activated carbon prepared from apricot nucleus shell and modified with rhodamine B // *Toxin Reviews*. 2017. Vol. 36. Pp. 154–160. DOI: 10.1080/15569543.2016.1256900.
69. Шарафутдинов У.З., Колпакова Н.А., Шашкин Б.Ф. Применение природных сорбентов для извлечения золота и серебра // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2002. №3. С. 118–125.
70. Беглов Б.М., Шарафутдинов У.З., Хушваков О.Б., Абдурахманов Э. Изучение механизма сорбции золота и серебра на активированных углях // *Горный вестник Узбекистана*. 2005. №4(23). С. 69–72.
71. El-Saharty A., Mahmoud S.N., Manjood A.H., Nassar A.A.H., Ahme A.M. Effect of apricot stone activated carbon adsorbent on the removal of toxic heavy metals ions from aqueous solutions // *International Journal of Ecotoxicology and Ecobiology*. 2018. Vol. 3. Pp. 51–62. DOI: 10.11648/j.ijee.20180302.13.
72. Pap S., Bezanovic V., Radonic J., Babic A., Saric S., Adamovic D., Sekulic M.T. Synthesis of highly-efficient functionalized biochars from fruit industry waste biomass for removal of chromium and lead // *Journal of Molecular Liquids*. 2018. Vol. 268. Pp. 315–325. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.07.072.
73. Sekulic M.T., Pap S., Stojanovic Z., Bošković N., Radonić J., Knudsen T.Š. Efficient removal of priority, hazardous priority and emerging pollutants with *Prunus armeniaca* functionalized biochar from aqueous wastes: Experimental optimization and modeling // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 613–614. Pp. 736–750. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.082.
74. Tsibranska I., Hristova E. Use of activated carbons from apricot stones for heavy metals removal // *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences*. 2011. Vol. 64. Pp. 831–838.
75. Tsibranska I., Hristova E. Comparison of different kinetic models for adsorption of heavy metals onto activated carbon from apricot stones // *Bulgarian Chemical Communications*. 2011. Vol. 43. Pp. 370–377.
76. Kazemipour M., Ansari M., Tajrobehkar S., Majdzadeh M., Kermani H.R. Removal of lead, cadmium, zinc, and copper from industrial wastewater by carbon developed from walnut, hazelnut, almond, pistachio shell, and apricot stone // *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 150. Pp. 322–327. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.04.118.
77. Tsibranska I., Hristova E. Modelling of heavy metal adsorption into activated carbon from apricot stones in fluidized bed // *Chemical Engineering and Processing*. 2010. Vol. 49. Pp. 1122–1127. DOI: 10.1016/j.cep.2010.08.003.
78. Kobya M., Demirbas E., Senturk E., Ince M. Adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions by activated carbon prepared from apricot stone // *Bioresource Technology*. 2005. Vol. 96. Pp. 1518–1521. DOI: 10.1016/j.biortech.2004.12.005.
79. Amirza M.A.R., Adib M.M.R., Hamdan R. Application of agricultural wastes activated carbon for dye removal – an overview // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 103. 06013. 12 p. DOI: 10.1051/mateconf/20171030.
80. Gergova K., Petrov N., Eser S. Adsorption properties and microstructure of activated carbons produced from agricultural by-products by steam pyrolysis // *Carbon*. 1994. Vol. 1994. Pp. 693–702. DOI: 10.1016/0008-6223(94)90091-4.
81. Adhami S., Ghorbanpoor H., Azak B., Kapucu S., Nurbas M., Avci H. A novel approach for water treatment by using activated carbon: apricot kernel shell // *The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi University*. 2018. Vol. 26. Pp. 1–7.
82. Aygun A., Yenisoy-Karakas S., Duman I. Production of granular activated carbon from fruit stones and nutshells and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2003. Vol. 66. Pp. 189–195. DOI: 10.1016/j.micromeso.2003.08.028.
83. Karagozoglou B., Tasdemir M., Demirbas E., Kobya M. The adsorption of basic dye (Astrazon Blue FGRL) from aqueous solutions onto sepiolite, fly ash and apricot shell activated carbon: Kinetic and equilibrium studies // *Journal of Hazardous Materials*. 2007. Vol. 147. Pp. 297–306. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.01.003.
84. Abbas M., Cherfi A., Kaddour S., Aksil T., Trari M. Kinetic and Equilibrium Studies of Coomassie Blue G-250 Adsorption on Apricot Stone Activated Carbon // *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*. 2015. Vol. 5. 8 p. DOI: 10.4172/2161-0525.1000264.
85. Abbas M., Trari M. Kinetic, equilibrium and thermodynamic study on the removal of Congo Red from aqueous solutions by adsorption on to apricot stone // *Process Safety and Environmental Protection*. 2015. Vol. 98. Pp. 424–436. DOI: 10.1016/j.psep.2015.09.015.
86. Abbas M., Trari M. Equilibrium and isotherm modeling of toxic dye adsorption onto modified apricot stone // *Algerian Journal of Research and Technology*. 2017. Vol. 2. Pp. 39–49.
87. Belaroui K., Seghier A., Hadjel M. Synthesis of activated carbon based on apricot stones for wastewater treatment // *Desalination and Water Treatment*. 2014. Vol. 52. Pp. 1422–1433. DOI: 10.1080/19443994.2013.789404.
88. Demirbas E., Kobya M., Sulak M.T. Adsorption kinetics of a basic dye from aqueous solutions onto apricot stone activated carbon // *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99. Pp. 5368–5373. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.11.019.

89. Djilani C., Zaghdoudi R., Djazi F., Bouchekima B., Lallam A., Modarressi A., Rogalski M. Adsorption of dyes on activated carbon prepared from apricot stones and commercial activated carbon // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2015. Vol. 53. Pp. 112–121. DOI: 10.1016/j.jtice.2015.02.025.
90. Wei X., Wua Z., Wu Z., Ye B. Adsorption behaviors of atrazine and Cr(III) onto different activated carbons in single and co-solute systems // *Powder Technology*. 2018. Vol. 329. Pp. 207–216. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.01.060.
91. Marzbali M.H., Esmaili M., Abolghasemi H., Marzbali M.H. Tetracycline adsorption by H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-activated carbon produced from apricot nutshells: A batch study // *Process Safety and Environmental Protection*. 2016. Vol. 102. Pp. 700–709. DOI: 10.1016/j.psep.2016.05.025.
92. Долбня И.В., Татаринцева Е.А., Ольшанская Л.Н. Модификация абрикосовой косточки с целью получения сорбционного материала для очистки водных сред от нефтепродуктов // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения». Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. С. 24–28.
93. Саипов А.А., Ивахнюк Г.К., Капитоненко З.В. Механическая активация и пористая структура углей из косточкового сырья // *Известия СПбГТИ(ТУ)*. 2015. №30. С. 63–65.
94. Rouissi C. Valorisation des coproduits d'abricot (*Prunus armeniaca L.*) de la wilaya de Batna. En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en Sciences biologiques, République Algérienne Démocratique et Populaire, El Oued, Université Echahid Hamma Lakhdar -El OUED, 2018. 118 p.
95. Petrova B., Budinova T., Tsyntsarski B., Kochkodan V., Shkavro Z., Petrov N. Removal of aromatic hydrocarbons from water by activated carbon from apricot stones // *Chemical Engineering Journal*. 2010. Vol. 165. Pp. 258–264. DOI: 10.1016/j.cej.2010.09.026.
96. Daifullah A.A.M., Girgis B.S. Removal of some substituted phenols by activated carbon obtained from agricultural waste // *Water Research*. 1998. Vol. 32. Pp. 1169–1177.
97. Liu P., Wu Z., Sun Z., Ye J. Comparison study of naphthalene adsorption on activated carbons prepared from different raws // *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2018. Vol. 35. Pp. 2086–2096. DOI: 10.1007/s11814-018-0124-7.

Поступила в редакцию 9 сентября 2020 г.

После переработки 1 декабря 2020 г.

Принята к публикации 4 февраля 2021 г.

**Для цитирования:** Шайхиев И.Г., Шайхиева К.И., Свергузова С.В., Винограденко Ю.А. Удаление поллютантов из сточных вод измельченной скорлупой косточек абрикосов // *Химия растительного сырья*. 2021. №3. С. 39–54. DOI: 10.14258/jcrpm.2021038405.

*Shaikhiev I.G.<sup>1</sup>, Shaikhieva K.I.<sup>1</sup>, Svergzova S.V.<sup>2\*</sup>, Vinogradenko Yu.A.<sup>2</sup>* REMOVAL OF POLLUTANTS FROM SEWAGE WITH GRINDED SHELLS OF APRICOT KERNELS

<sup>1</sup> *Kazan National Research Technological University, ul. K. Marxa, 68, Kazan, 420015 (Russia)*

<sup>2</sup> *Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, ul. Kostyukova, 46, Belgorod, 308012 (Russia), e-mail: pe@intbel.ru*

A review of the literature data on the use of biomass components of apricot trees (*Prunus armeniaca*) as a sorption material for the extraction of various pollutants from waste and natural waters is carried out. The parameters of the sorption interaction at which the highest degree of removal of pollutants is achieved are given. It has been shown that it is possible to increase the sorption capacity of apricot biomass components by modifying it with various chemical reagents. It has been determined that the most studied sorption material is the shell of apricot kernels. It is determined that the largest number of publications is devoted to the use of the latter as raw materials for the production of activated carbons. It was revealed that the surface area and the total pore volume of activated carbons from the kernels of apricot fruits depend on the modes of carbonization and activation of raw materials. It is shown that activated carbons are effective sorbents for removing various pollutants (metal ions, dyes, oil and oil products) from aqueous media. It was found that the adsorption isotherms of pollutants are most adequately described in most cases by the Langmuir and Freundlich models, and the kinetics of the process is most often described by the pseudo-second order model.

*Keywords:* apricot kernel shell, metal ions, dyes, adsorption, modification.

---

\* Corresponding author.

## References

- Bulgariu L., Escudero L.B., Bello O.S., Iqbal M., Nisar J., Adegoke K.A., Alakhras F., Kornaros M., Anastopoulos I. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, vol. 276, pp. 728–747. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.12.001.
- Anastopoulos I., Robalds A., Tran H.N., Mitrogiannis D., Giannakoudakis D.A., Hosseini-Bandegharaei A., Dotto G.L. *Environmental Chemistry Letters*, 2019, vol. 17, pp. 755–766. DOI: 10.1007/s10311-018-00829-x.
- Alekseeva A.A., Shaikhiev I.G., Fazullin D.D., Kharlyamov D.A., Mavrin G.V., Stepanova S.V., Shaimardanova A.S. *International Journal of Pharmacy & Technology*, 2016, vol. 8, pp. 14375–14391.
- Dahri M.K., Kooh M.R.R., Lim L.B.L. *Alexandria Engineering Journal*, 2015, vol. 54, pp. 1253–1263. DOI: 10.1016/j.aej.2015.07.005.
- Hadjmohammadi M.R., Salary M., Biparva P. *Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation*, 2011, vol. 6, pp. 1–13.
- Denisova T.R., Kharlyamov D.A., Shaikhiev I.G., Galimova R.Z., Sadykova S.V. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, vol. 7, pp. 219–222. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.7.20551.
- Sen T.K., Afroze S., Ang H.M. *Water Air Soil Pollution*, 2011, vol. 218, pp. 499–515. DOI: 10.1007/s11270-010-0663-y.
- Değirmen G., Kılıç M., Çepelioğullar Ö., Pütün A.E. *Water Science and Technology*, 2012, vol. 66, pp. 564–572. DOI: 10.2166/wst.2012.210.
- Deniz F. *Desalination and Water Treatment*, 2013, vol. 51, pp. 4573–4581. DOI: 10.1080/19443994.2012.751882.
- Pathak P.D., Mandavgane S.A., Kulkarni B.D. *Reviews in Chemical Engineering*, 2015, vol. 31, pp. 361–381. DOI: 10.1515/revce-2014-0041.
- Ay Ç.Ö., Özcan A.S., Erdoğan Y., Özcan A. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2012, vol. 100, pp. 197–204. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2012.05.013.
- Mallampati R., Xuanjun Li, Adin A., Valiyaveetil S. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2015, vol. 3, pp. 1117–1124. DOI: 10.1021/acssuschemeng.5b00207.
- Sahmoune M.N., Yeddou A.R. *Desalination and Water Treatment*, 2016, vol. 57, pp. 24019–24034. DOI: 10.1080/19443994.2015.1135824.
- Davoudi M., Alidadi H., Mehrabpour M., Dolatabadi M. *Desalination and Water Treatment*, 2018, vol. 118, pp. 326–335. DOI: 10.5004/dwt.2018.22645.
- Denisova T.R., Mavrin G.V., Sippel I.Y. and ets. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 2016, vol. 7, pp. 1742–1750.
- Al-Najar B., Bououdina M., Vijaya J.J., Nair R.R., Tatarchuk T. *Sustainable Agriculture Reviews*, 2019, vol. 34, pp. 207–245. DOI: 10.1007/978-3-030-11345-2\_11.
- Silva A.C.P., Jorgetto A.O., Wondracek M.H.P., Galera R.M., Schneider J.F., Saeki M.J., Pedrosa V.A., Zara L.F., Castro G.R. *Groundwater for Sustainable Development*, 2018, vol. 6, pp. 50–56. DOI: 10.1016/j.gsd.2017.10.006.
- Nacke H., Gonçalves Jr. A.C., Coelho G.F., Schwantes D., Campagnolo M.A., Leismann E.A.V., Junior É.C., Miola A.J. *Applied Water Science*, 2017, vol. 7, pp. 3207–3222. DOI: 10.1007/s13201-016-0468-2.
- Souza I.P.A.F., Cazetta A.L., Pezoti O., Almeida V.C. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, vol. 189, pp. 632–644. DOI: 10.1007/s10661-017-6330-7.
- Halysh V., Sevastyanova O., Riazanova A.V., Pasalskiy B., Budnyak T., Lindström M.E., Kartel M. *Cellulose*, 2018, vol. 25, pp. 4729–4742. DOI: 10.1007/s10570-018-1896-y.
- Stepanova S.V., Shaykhiyev I.G., Svergzova S.V. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*, 2014, no. 6, pp. 183–186. (in Russ.).
- Abrikos obyknovennyy* [Common apricot]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Абрикос\\_обыкновенный](https://ru.wikipedia.org/wiki/Абрикос_обыкновенный). (in Russ.).
- Latypova L.A., Shaykhiyev I.G., Fazullin D.D., Svergzova S.V. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Innovatsi-onnyye podkhody v reshenii sovremennykh problem ratsional'nogo ispol'zovaniya prirodnnykh resursov i okhra-ny okruzhayushchey sredy»*. [Collection of reports of the International Scientific and Technical Conference "Innovative approaches to solving modern problems of rational use of natural resources and environmental protection"]. Alushta, 2019, vol. 1, pp. 213–216. (in Russ.).
- Gafiullina A.I., Shaykhiyev I.G., Svergzova S.V. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Innovatsionnyye podkhody v reshenii sovremennykh problem ratsional'nogo ispol'zovaniya prirodnnykh resursov i okhrany okruzhayushchey sredy»*. [Collection of reports of the International Scientific and Technical Conference "Innovative approaches to solving modern problems of rational use of natural resources and environmental protection"]. Alushta, 2019, vol. 1, pp. 170–175. (in Russ.).
- Zaurov D.E., Molnar T.J., Eisenman S.W., Ford M.T. and ets. *Hortscience*, 2013, vol. 48, pp. 681–691. DOI: 10.21273/HORTSCI.48.6.681.
- Khazaei I., Aliabad M., Mosavian H.T.H. *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 2011, vol. 8, pp. 11–23.
- Kalipci E., Namal O.O. *Environment Protection Engineering*, 2018, vol. 44, pp. 79–93. DOI: 10.5277/epe180306.
- Šoštaric T., Petrovic M., Milojkovic J., Lačnjevac C., Cosovic A., Stanojevic M., Stojanovic M. *Fruits*, 2015, vol. 70, pp. 271–280. DOI: 10.1051/fruits/2015028.
- Milojković J., Mihajlović M., Šoštaric T., Lopičić Z., Petrović M., Lačnjevac Č., Stojanović M. *Zaštita materijala*, 2014, vol. 55, pp. 25–31.
- Petrovic M.S., Šoštaric T.D., Pezo L.L., Stankovic S.M., Lačnjevac Č.M., Milojković J.T., Stojanović M.D. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, 2015, vol. 21, pp. 249–259. DOI: 10.2298/CICEQ140510023P.
- Šoštaric T.D., Petrovic M.S., Petrovic E.T., Milojković J.T., Kragovic M.M., Lačnjevac Č.M., Stojanović M.D. *Zastita Materijala*, 2015, vol. 56, pp. 321–328. DOI: 10.5937/ZasMat1503321S.

32. Milojković J., Stojanović M., Mihajlović M., Lopičić Z., Šoštarić T., Petrović M., Petrović E. *Zaštita materijala*, 2016, vol. 57, pp. 418–423. DOI: 10.5937/ZasMat1603418M.
33. Kahraman S., Dogan N., Erdemoglu S. *International Journal of Environment and Pollution*, 2008, vol. 34, pp. 275–284.
34. Šoštarić T.D., Petrović M.S., Pasto F.T., Lončarević D.R., Petrović J.T., Milojković J.V., Stojanović M.D. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, vol. 259, pp. 340–349. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.03.055.
35. Namal O.O., Kalipci E. *Separation Science and Technology*, 2019, vol. 54, pp. 1722–1738. DOI: 10.1080/01496395.2018.1541469.
36. Yahya M.A., Al-Qodah Z., Ngah C.W.Z. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 46, pp. 218–235. DOI: 10.1016/j.rser.2015.02.051.
37. Ioannidou O., Zabanitou A. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, vol. 11, pp. 1966–2005. DOI: 10.1016/j.rser.2006.03.013.
38. Paraskeva P., Kalderis D., Diamadopoulos E. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2008, vol. 83, pp. 581–592. DOI: 10.1002/jctb.1847.
39. Kosheleva R., Mitropoulos A.C., Kyzas G.Z. *Green adsorbents for Pollutant removal*. Springer Nature Switzerland AG, 2018, pp. 159–182. DOI: 10.1007/978-3-319-92162-4\_5.
40. Matani A.G. *Waste Management and Utilization Techniques. International Edition, vol. 1*. International Research Publication House, Delhi, 2017, 336 p.
41. Alslaibi T.M., Abustan I., Ahmad M.A., Foul A.A. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2013, vol. 88, pp. 1183–1190. DOI: 10.1002/jctb.4028.
42. Aygün A., Yenisoy-Karakaş S., Duman I. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2003, vol. 66, pp. 189–195. DOI: 10.1016/j.micromeso.2003.08.028.
43. Gergova K., Eser S. *Carbon*, 1996, vol. 34, pp. 879–888. DOI: 10.1016/0008-6223(96)00028-0.
44. Krasil'nikova O.K., Artamonova S.D., Voloshchuk A.M., Yevsyukhin A.Ye. *Khimiya tverdogo topliva*, 2005, no. 4, pp. 65–71. (in Russ.).
45. Usenkulova S.Z., Satayev M.I., Samonin V.V. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 2016, vol. 13, pp. 1319–1325.
46. Pavlenko V.V., Anurov S.A., Mansurov Z.A., Biysen'ayev B.A. i dr. *Vestnik KazNU. Seriya khimicheskaya*, 2014, no. 3(75), pp. 103–113. (in Russ.).
47. Tekuyeva K.M., Klushin V.N., Antipova O.V. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2013, vol. 27, no. 9, pp. 31–34. (in Russ.).
48. Kas'yanov G.I., Nematullayev I., Palagina I.A., Zolotokopova S.V. *Izvestiya VUZov. Pishchevaya tekhnologiya*, 1996, no. 5-6, p. 87. (in Russ.).
49. Pavlenko V.V., Smirnov L.V., Kon'kova T.V., Anurov S.A. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2014, vol. 28, no. 6, pp. 34–35. (in Russ.).
50. Martirosyan B.G., Sarkizova Yu.S., Kazinyan A.A. *Vestnik NPUA. Khimicheskiye i prirodnookhrannyye tekhnologii*, 2017, no. 1, 5 p. (in Russ.).
51. Farberova Ye.A., Olontsev V.F., Tin'gayeva Ye.A. *Butlerovskiye soobshcheniya*, 2016, vol. 47, no. 8, pp. 73–79. (in Russ.).
52. Mechat F., Bouchelta C., Medjram M.S., Benrabaa R. and ets. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2015, vol. 3, pp. 1928–1938. DOI: 10.1016/j.jece.2015.07.007.
53. Khalil L.B. *Adsorption Science & Technology*, 1999, vol. 17, pp. 729–739.
54. Jankovic B., Manic N., Dodevski V., Radovic I. and ets. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 236. 117614. 15 p. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117614.
55. Pavlenko V.V., Anurov S.A., Mansurov Z.A., Biysenbayev M.A. i dr. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Respubliki Kazakhstan*, 2014, no. 5 (407), pp. 47–53. (in Russ.).
56. Sentorun-Shalaby C., Ucak-Astarlioglu M.G., Artok L., Sarici C. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2006, vol. 88, pp. 126–134. DOI: 10.1016/j.micromeso.2005.09.003.
57. Farberova Ye.A., Tin'gayeva Ye.A., Chuchalina A.D., Kobeleva A.R., Maksimov A.S. *Izvestiya VUZov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2018, vol. 61, no. 3, pp. 51–57. DOI: 10.6060/tcct.20186103.5612. (in Russ.).
58. Soleimani M., Kaghazchi T. *Bioresource Technology*, 2008, vol. 99, pp. 5374–5383. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.11.021.
59. Soleimani M., Kaghazchi T. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2008, vol. 16, pp. 112–118.
60. Abbas M., Kaddour S., Trari M. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014, vol. 20, pp. 745–751. DOI: 10.1016/j.jiec.2013.06.030.
61. Yüksel S., Orhan R. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, vol. 44, pp. 5345–5357. DOI: 10.1007/s13369-018-3618-z.
62. Nikhil N. *Removal of chromium using activated almond and apricot shells. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of technology*. Delhi, 2017. 71 p.
63. Özçimen D., Ersoy-Meriçboyu A. *Adsorption Science & Technology*, 2010, vol. 28, pp. 327–340.
64. Savova D., Petrov N., Yardim M.F., Ekinci E., Budinova T., Razvigorova M., Minkova V. *Carbon*, 2003, vol. 41, pp. 1897–1903. DOI: 10.1016/S0008-6223(03)00179-9.
65. Mouni L., Merabet D., Bouzaza A., Belkhiri L. *Desalination*, 2011, vol. 276, pp. 148–153. DOI: 10.1016/j.desal.2011.03.038.
66. Mouni L., Belkhiri L., Zougaghe F., Tafer M. *Desalination and Water Treatment*, 2013, 8 p. DOI: 10.1080/19443994.2013.812992.

67. Mouni L., Belkhir L., Tafer M., Zouggaghe F., Kadmi Y. *Moroccan Journal of Chemistry*, 2014, vol. 2, pp. 452–456.
68. Sabermahani F., Mahani N.M., Noraldiny M. *Toxin Reviews*, 2017, vol. 36, pp. 154–160. DOI: 10.1080/15569543.2016.1256900.
69. Sharafutdinov U.Z., Kolpakova N.A., Shashkin B.F. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2002, no. 3, pp. 118–125. (in Russ.).
70. Beglov B.M., Sharafutdinov U.Z., Khushvakov O.B., Abdurakhmanov E. *Gornyy vestnik Uzbekistana*, 2005, no. 4(23), pp. 69–72. (in Russ.).
71. El-Saharty A., Mahmoud S.N., Manjood A.H., Nassar A.A.H., Ahme A.M. *International Journal of Ecotoxicology and Ecobiology*, 2018, vol. 3, pp. 51–62. DOI: 10.11648/j.ijee.20180302.13.
72. Pap S., Bezanovic V., Radonic J., Babic A., Saric S., Adamovic D., Sekulic M.T. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, vol. 268, pp. 315–325. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.07.072.
73. Sekulic M.T., Pap S., Stojanovic Z., Bošković N., Radonić J., Knudsen T.Š. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 613–614, pp. 736–750. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.082.
74. Tsibranska I., Hristova E. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences*, 2011, vol. 64, pp. 831–838.
75. Tsibranska I., Hristova E. *Bulgarian Chemical Communications*, 2011, vol. 43, pp. 370–377.
76. Kazemipour M., Ansari M., Tajrobehkar S., Majdzadeh M., Kermani H.R. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, vol. 150, pp. 322–327. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.04.118.
77. Tsibranska I., Hristova E. *Chemical Engineering and Processing*, 2010, vol. 49, pp. 1122–1127. DOI: 10.1016/j.cep.2010.08.003.
78. Kobya M., Demirbas E., Senturk E., Ince M. *Bioresource Technology*, 2005, vol. 96, pp. 1518–1521. DOI: 10.1016/j.biortech.2004.12.005.
79. Amirza M.A.R., Adib M.M.R., Hamdan R. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 103. 06013. 12 p. DOI: 10.1051/mateconf/20171030.
80. Gergova K., Petrov N., Eser S. *Carbon*, 1994, vol. 1994, pp. 693–702. DOI: 10.1016/0008-6223(94)90091-4.
81. Adhami S., Ghorbanpoor H., Azak B., Kapucu S., Nurbas M., Avci H. *The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi University*, 2018, vol. 26, pp. 1–7.
82. Aygun A., Yenisooy-Karakas S., Duman I. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2003, vol. 66, pp. 189–195. DOI: 10.1016/j.micromeso.2003.08.028.
83. Karagozoglu B., Tasdemir M., Demirbas E., Kobya M. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, vol. 147, pp. 297–306. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.01.003.
84. Abbas M., Cherfi A., Kaddour S., Aksil T., Trari M. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 2015, vol. 5. 8 p. DOI: 10.4172/2161-0525.1000264.
85. Abbas M., Trari M. *Process Safety and Environmental Protection*, 2015, vol. 98, pp. 424–436. DOI: 10.1016/j.psep.2015.09.015.
86. Abbas M., Trari M. *Algerian Journal of Research and Technology*, 2017, vol. 2, pp. 39–49.
87. Belaroui K., Seghier A., Hadjel M. *Desalination and Water Treatment*, 2014, vol. 52, pp. 1422–1433. DOI: 10.1080/19443994.2013.789404.
88. Demirbas E., Kobya M., Sulak M.T. *Bioresource Technology*, 2008, vol. 99, pp. 5368–5373. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.11.019.
89. Djilani C., Zaghdoudi R., Djazi F., Boucekima B., Lallam A., Modarressi A., Rogalski M. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2015, vol. 53, pp. 112–121. DOI: 10.1016/j.jtice.2015.02.025.
90. Wei X., Wua Z., Wu Z., Ye B. *Powder Technology*, 2018, vol. 329, pp. 207–216. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.01.060.
91. Marzbali M.H., Esmaili M., Abolghasemi H., Marzbali M.H. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, vol. 102, pp. 700–709. DOI: 10.1016/j.psep.2016.05.025.
92. Dolbnya I.V., Tatarintseva Ye.A., Ol'shanskaya L.N. *Sbornik trudov Vserossiyskoy na-uchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov «Ekologiya i bezopasnost' v tekhnosfere: sovremennyye problemy i puti resheniya»*. [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students "Ecology and Safety in the Technosphere: Modern Problems and Solutions"]. Tomsk, 2014, pp. 24–28. (in Russ.).
93. Saipov A.A., Ivakhnyuk G.K., Kapitonenko Z.V. *Izvestiya SPbGTI(TU)*, 2015, no. 30, pp. 63–65. (in Russ.).
94. Rouissi C. *Valorisation des coproduits d'abricot (Prunus armeniaca L.) de la wilaya de Batna. En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en Sciences biologiques*, République Algérien Démocratique et Populaire, El Oued, Université Echahid Hamma Lakhdar -El OUED, 2018. 118 p.
95. Petrova B., Budinova T., Tsyntsarski B., Kochkodan V., Shkavro Z., Petrov N. *Chemical Engineering Journal*, 2010, vol. 165, pp. 258–264. DOI: 10.1016/j.cej.2010.09.026.
96. Daifullah A.A.M., Girgis B.S. *Water Research*, 1998, vol. 32, pp. 1169–1177.
97. Liu P., Wu Z., Sun Z., Ye J. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2018, vol. 35, pp. 2086–2096. DOI: 10.1007/s11814-018-0124-7.

Received September 9, 2020

Revised December 1, 2020

Accepted February 4, 2021