

Синтез и характеристика активированного угля из биомассы для сорбции радиоактивного йода

М.С. Кунарбекова, Л.Н. Сеймуханова*, И.О. Сапаргали,
У.Е. Жантикеев, К.К. Кудайбергенов, С. Азат

Лаборатория инженерного профиля, Satbayev University, ул. Сатпаева, 22а, Алматы, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Ввиду растущей потребности в электроэнергии строительство атомной электростанции в Казахстане является эффективным решением данной проблемы. Это, в свою очередь, повлияет на генерацию дополнительных источников радиоактивных отходов в стране. В этой связи, управление ядерными отходами и синтез эффективных сорбентов являются актуальной задачей. Углеродные сорбенты широко применяются в системах очистки воды благодаря их способности адаптироваться к различным видам загрязнителей. Удаление радионуклидов, в том числе радиоактивного йода, является сложной задачей из-за наличия в воде и воздухе анионов и молекулярного йода. В данной работе исследуется способность углеродных сорбентов на основе биомассы поглощать йодид ионы из водной среды. Была получена серия активированных углей на основе скорлупы грецкого ореха (WN КОН), рисовой шелухи (RH КОН) и гречневой шелухи (BN КОН). Активация КОН значительно улучшила текстурные и адсорбционные характеристики сорбентов. Метод ВЕТ показал увеличение удельной поверхности и объема пор: для RH КОН до 1881,83 м²/г, для WN КОН до 2192,67 м²/г и для BN КОН до 1579,43 м²/г. ИК-спектроскопия выявила уменьшение интенсивности пиков -ОН групп и появление новых пиков, соответствующих О-Н и С-О связям. СЭМ-изображения показали развитую пористую структуру активированных образцов, а ЭДС-анализ подтвердил увеличение содержания кислорода после активации КОН. Сравнительный анализ сорбционной емкости показал, что образцы RH КОН (q_e 217 мг/г, t_{eq} 10 ч) и BN КОН (q_e 215 мг/г, t_{eq} 10 ч) были наиболее эффективными. А для образцов WN КОН понадобилось больше времени для достижения максимальной сорбционной емкости (q_e 190 мг/г, t_{eq} 30 ч). Таким образом, активация КОН углеродных сорбентов улучшает их адсорбционные характеристики, что делает их перспективными для применения в системах очистки воды от радиоактивных загрязнителей.

Ключевые слова: активированный уголь, химическая активация, адсорбция радионуклидов, йод, биомасса

1. Введение

Доступность чистой воды имеет решающее значение для благополучия как людей, так и других организмов. В результате доступ к источникам чистой воды считается основным правом человека и важным аспектом политики в области здравоохранения [1]. Повышенное содержание естественных и искусственных радионуклидов в питьевой воде представляет опасность для здоровья живых существ. Это привело к растущей обеспокоенности качеством питьевой воды и ее

воздействия на здоровье населения [2]. Загрязнение воды радионуклидами стало серьезной экологической проблемой с развитием ядерной энергетики. Присутствие этих радиоактивных элементов в воде может быть результатом природных источников или деятельности человека, таких как аварии на атомных электростанциях, утечки из резервуаров с отработанным топливом и объектов по переработке топлива или акты ядерного терроризма [3].

Во всем мире для удаления радионуклидов из воды применяются различные методы, включая адсорбцию [4], ионный обмен [5], мембранную фильтрацию [6], выпаривание [7], химическое осаждение [8] и электродиализ [9]. Учитывая та-

*Ответственный автор

E-mail: lauraseimuhanova@gmail.com

кие факторы, как простота, удобство эксплуатации, высокая эффективность, более широкий диапазон рН и эффективное удаление загрязняющих веществ, особенно из разбавленных растворов, адсорбция широко признана многообещающим методом во всем мире, превосходящим другие по потенциалу [10].

Метод адсорбции включает использование твердого материала, известного как адсорбент, для улавливания молекул растворенного вещества из жидкости или газа. Для удаления радионуклидов используются различные адсорбенты, включая активированный уголь [11], цеолит [12], графен [13], углеродные нанотрубки [14] и металлоорганические каркасы (MOF) [15]. Активированный уголь, считающийся наиболее жизнеспособным адсорбентом для очистки сточных вод, отличается экономичностью, доступностью, экологичностью, адаптивностью и производительностью [16]. Он может быть получен из природных источников [17] или синтезирован из коммерческих источников [18] углерода. Материалы, полученные из биомассы (рисовая шелуха [19], бамбук [20], жмых сахарного тростника [21], картофельная кожура [22], скорлупа кокосовых орехов [23], отходы пальмовых стволов [24] и мангровая древесина [25]), ценятся за изобилие, возобновляемость и низкую стоимость [26], что обеспечивает экономичное производство активированного угля с улучшенными адсорбционными свойствами [27]. Различные методы модификации поверхности еще больше улучшают адсорбционные характеристики активированного угля [28]. Технологии, основанные на адсорбции, особенно привлекательны благодаря их доступности, простоте использования и широкому спектру материалов, которые могут быть использованы в качестве адсорбентов [29, 30].

Целью настоящего исследования являются синтез и характеристика активированных углей

на основе биомассы, активированной КОН, а также оценка эффективности в сорбции радиоактивного йода из водных растворов.

Данное исследование направлено на разработку углеродных сорбентов с улучшенными характеристиками, которые могут быть применены для решения задач очистки воды в условиях загрязнения радионуклидами.

2. Экспериментальная часть

2.1 Материалы и реагенты

Исходное сырье (шелуха риса, гречихи и скорлупа грецкого ореха), полученное от местных фермеров, промывали дистиллированной водой и высушивали при 105 °С в течение 2-4 ч в зависимости от объема. Все химические вещества, использованные в работе, были аналитической степени чистоты и применялись без дополнительной очистки, в частности КОН (Sigma-Aldrich, США), KI (Ural Chemical Reagents, Казахстан). KI использовали для создания начальной концентрации йодида (50 мг/л). Также использовали азот технический, первый сорт (99,6%) – расход газа 300 мл/мин, углекислый газ (CO₂), высший сорт (99,8%) – расход газа 300 мл/мин.

2.2 Получение активированных углей

Были синтезированы два вида активированных углей (АУ). Первый АУ получен методом физической активации в печи CVD (BS-HTF-1200C, Kazakhstan, 2023) из рисовой шелухи (RH), скорлупы грецкого ореха (WN) и гречневой шелухи (BH) путем карбонизации в среде CO₂ (расход газа – 300 мл/мин) и при температуре 500 °С в течение 1 ч, затем поднимали температуру до 900 °С со скоростью нагрева 10 °С/мин и выдерживали 2 ч (RH-900, WN-900, BH-900). Второй АУ



Рис. 1. Схема получения активированного угля путем физической и химической активации.

получен методом химической активации также на основе RH, WN и WN путем карбонизации исходной биомассы в печи CVD (BS-HTF-1200C, Kazakhstan, 2023) в инертной среде N_2 (расход газа – 300 мл/мин) и при температуре 500 °C в течение 1 ч, затем карбонизированную массу смешивали с порошком KOH в соотношении 1:2 и подвергали дальнейшему пиролизу при 800 °C в течение 2 ч со скоростью нагрева 10 °C/мин (RH-KOH, WN-KOH, BH-KOH).

2.3 Метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ)

Морфологию и характеристики поверхности АУ RH 900, RH KOH, WN 900, WN KOH, BH 900 и BH KOH исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Для полуколичественного определения элементного состава на поверхности АУ использовали метод электронной микроскопии (QUANTA 3D 200i) с энергодисперсионным рентгеновским микроанализом (ЭДС).

2.4 Метод низкотемпературной адсорбции азота

Структуру полученных АУ на наличие микро- и мезопористой поверхности (от 1,7 до 300 нм) исследовали методом низкотемпературной адсорбции азота при температуре 77 K (BSD-66OS A3) после предварительной пробоподготовки, проведенной при 200 °C и остаточном давлении не менее 0,001 бар. Стандартный анализ результатов проводили методом Barret-Joyner-Halenda (BJH) с использованием условной модели цилиндрических пор и расчетом таких параметров, как общая удельная поверхность S_{Σ} , площадь поверхности микропор S_{μ} с помощью метода Брунауэра-Эмметта-Теллера (БЭТ), общий объем пор V_{Σ} , объем микропор V_{μ} , средний диаметр пор D_{cp} с учетом как микро-, так и мезо пор, применяя подход теории функционала плотности.

2.5 Метод инфракрасной спектроскопии (ИК)

Химический состав АУ исследовали с помощью инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (JSM-6490LA, Japan). Для подготовки образцов к анализу смесь АУ и KBr в соотношении 0,5% к 99,5% по массе прессовали в диск давлением 10 т/см. Анализ включал 32 скана с разрешением 1 cm^{-1} .

2.6 Метод ультрафиолетового облучения (УФ)

Оптические спектры поглощения получали с помощью спектрофотометра (PI-C-7000UV, Китай). Для построения калибровочного графика использовали раствор KI с концентрациями от 5 до 20 мг/л. Для исследования сорбционной способности АУ были подготовлены водные растворы йодида калия с начальной концентрацией 50 мг/л. Все эксперименты проводили в условиях постоянного перемешивания (300 об/мин). Температуру экспериментов поддерживали на уровне 25 ± 1 °C для имитации стандартных лабораторных условий.

Для оценки сорбционной способности (q_e , мг/г) образцы АУ помещали в конические колбы объемом 250 мл с растворами йодида калия концентрацией 50 мг/л, после чего колбы герметично закрывали для предотвращения испарения и выдерживали в условиях постоянного перемешивания в течение 60 часов. Соотношение твердой фазы (сорбент) к жидкой фазе (раствор) поддерживали в пропорции 30 мг сорбента на 150 мл раствора. Периодически проводили отбор проб субстрата с интервалом времени (1, 5, 10, 20 и 30 часов), которые пропускали через мембранные фильтры (0,45 мкм), затем анализировали на остаточное содержание йодид-ионов методом УФ-спектроскопии при длине волны 254 нм.

Сорбционную емкость рассчитывали по следующей формуле:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)v}{m}$$

где: C_0 и C_t – начальная и конечная концентрации ионов йода (г/л); v – объем; m – масса образца сорбента.

Для каждого эксперимента проводили три параллельных опыта. Средние значения сорбционной емкости (q_e , мг/г) рассчитывали с учетом стандартного отклонения (SD).

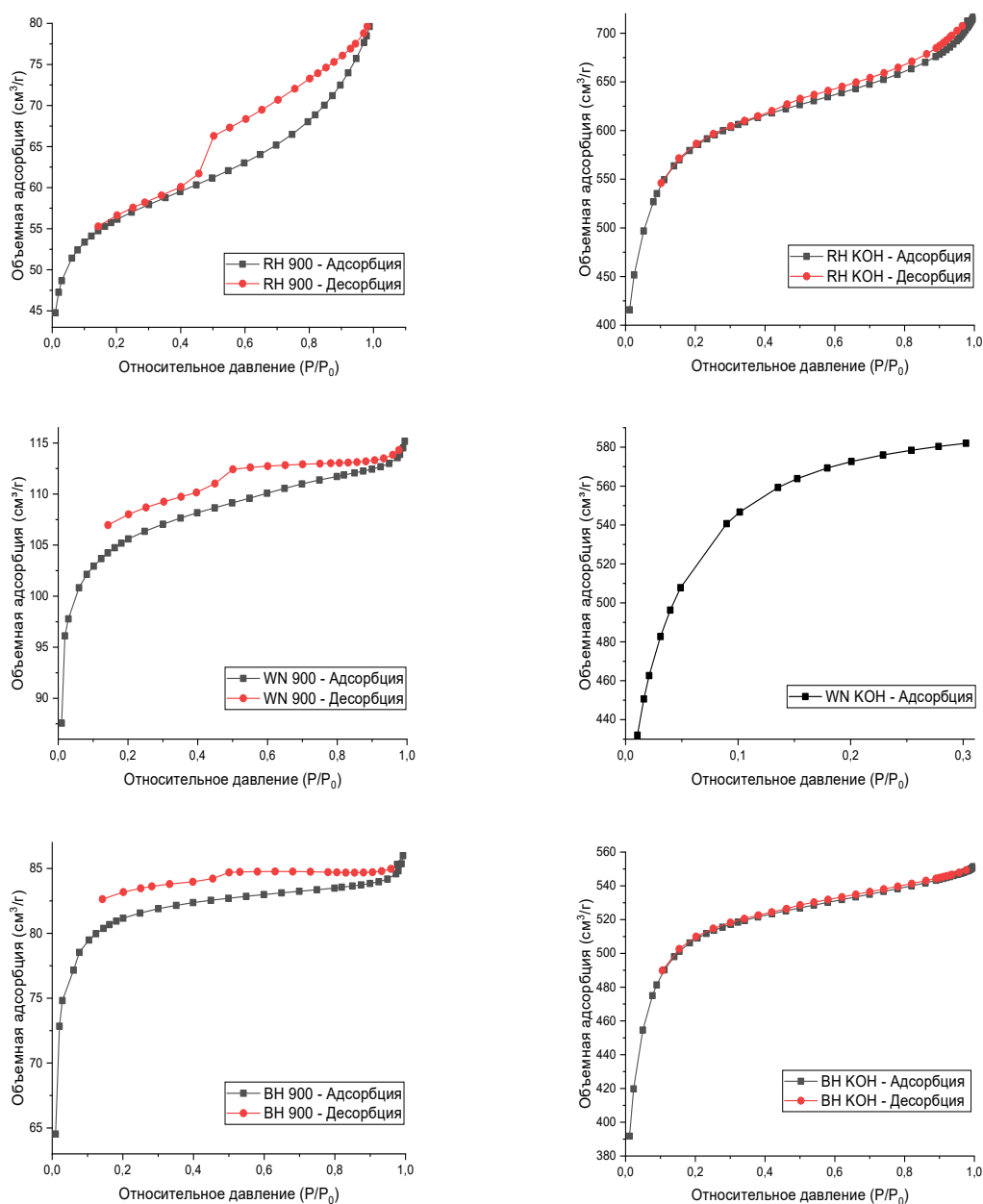
3. Результаты и обсуждение

3.1 Характеристика образцов

Определены общая удельная поверхность и объем пор для всех типов АУ с использованием низкотемпературной адсорбции азота. В таблице 1 представлены данные удельной поверхности, объема и размера пор с учетом микропор.

Таблица 1. Характеристики активированных углей

Наименование образца	БЭТ, удельная поверхность, м ² /г	Объем пор, см ³ /г	Размер пор		
			микро, Å	мезо, Å	макро, Å
RH 900	209,19 общая 148,38 микропор	0,13 общий 0,06 микропор		23,84	
RH KOH	1881,83 общая 1064,98 микропор	1,11 общий 0,54 микропор		23,57	
WN 900	405,49 общая 347,84 микропор	0,18 общий 0,14 микропор	17,57		
WN KOH	2192,67 общая 1947,84 микропор	0,85 общий 0,78 микропор	10,32		
BH 900	313,61 общая 280,51 микропор	0,13 общий 0,11 микропор	16,96		
BH KOH	1579,43 общая 1181,14 микропор	0,85 общий 0,61 микропор		21,62	

**Рис. 2.** Изотермы адсорбции-десорбции для АУ, полученных методом физической и химической активации KOH.

Из таблицы 1 видно значительное увеличение удельной поверхности и общего объема пор после активации КОН для всех типов АУ. В частности, для образцов RH КОН наблюдается увеличение удельной поверхности до 1881,83 м²/г по сравнению с 209,19 м²/г для RH 900. Для WN КОН – до 2192,67 м²/г по сравнению с 405,49 м²/г для WN 900, а для BH КОН – до 1579,43 м²/г по сравнению с 313,61 м²/г для BH 900. Это объясняется эффективностью КОН в создании микро- и мезопор в структуре углерода. Для образца RH КОН объем пор увеличивается до 1,11 см³/г, что значительно превышает объем пор для образца RH 900. Таким образом, активация углеродных материалов гидроксидом калия приводит к значительному улучшению их текстурных характеристик, что подтверждается увеличением удельной поверхности и объема пор.

Изотермы адсорбции-десорбции (рис. 2) для образцов RH 900, WN 900, BH 900 показывают низкую адсорбционную способность из-за незначительного количества пор. После активации КОН у всех АУ наблюдается значительное увеличение объема адсорбции, что свидетельствует о более развитой пористой структуре с увеличением количества мезопор и макропор.

Результаты ВЕТ анализа подтверждают, что активация АУ КОН значительно улучшает текстурные характеристики углеродных материалов. Изотермы адсорбции-десорбции демонстрируют увеличение удельной поверхности и объема пор после химической активации.

3.2 Результаты СЭМ и ЭДС анализа

Текстурные особенности АУ, а также элементный состав поверхности приведены на рис. 3.

На рисунке 3 наблюдаются значительные раз-

личия в морфологии поверхности между образцами АУ, полученными методами физической и химической активации. Образцы, активированные в среде CO₂ (RH 900, WN 900, BH 900) имеют более плотную и менее пористую структуру, гладкую поверхность с ограниченным количеством пор. Все образцы АУ, активированные КОН, показали значительно увеличенное количество пор и развитую пористую структуру. В случае образцов RH КОН и WN КОН наблюдалось увеличение микро- и мезопор, а BH КОН показал наиболее развитую пористую структуру.

На основе данных, приведенных в таблице 2, можно сказать, что химическая активация приводит к снижению концентрации углерода и увеличению содержания кислорода и других элементов в материале. В процессе активации КОН взаимодействует с углеродным материалом, что приводит к формированию пор и увеличению удельной поверхности. Это взаимодействие часто сопровождается частичным удалением углерода из структуры материала. В результате активации КОН происходит внедрение кислорода в углеродную матрицу, что видно из увеличения содержания кислорода в образцах после активации КОН. Кислород связывается с углеродом, образуя поверхностные оксиды, что также снижает общий процент углерода. Полученные АУ содержат различные примеси (K, Ca, Si, Zn и Al) в общей сложности менее 1% от общей массы.

3.3 Результаты ИК-спектроскопии

Изучение функциональных групп и химических связей на поверхности полученных АУ проводилось методом инфракрасной спектроскопии. На рис. 4 приведены спектры АУ, полученных методами физической и химической активации.

Таблица 2. Результаты элементного анализа образцов активированного угля

Элементы	RH 900	RH КОН	WN 900	WN КОН	BH 900	BH КОН
C	99	92,63	96,24	87,79	93,82	91,61
O	1	7,08	3,76	11,26	6,18	7,53
Mg	-	0,05	-	-	-	0,32
Si	-	0,08	-	0,23	-	0,14
S	-	0,05	-	-	-	-
Ca	-	0,11	-	0,17	-	0,15
Zn	-	-	-	-	-	0,08
P	-	-	-	-	-	0,03
K	-	-	-	0,15	-	0,13
Al	-	-	-	0,40	-	-

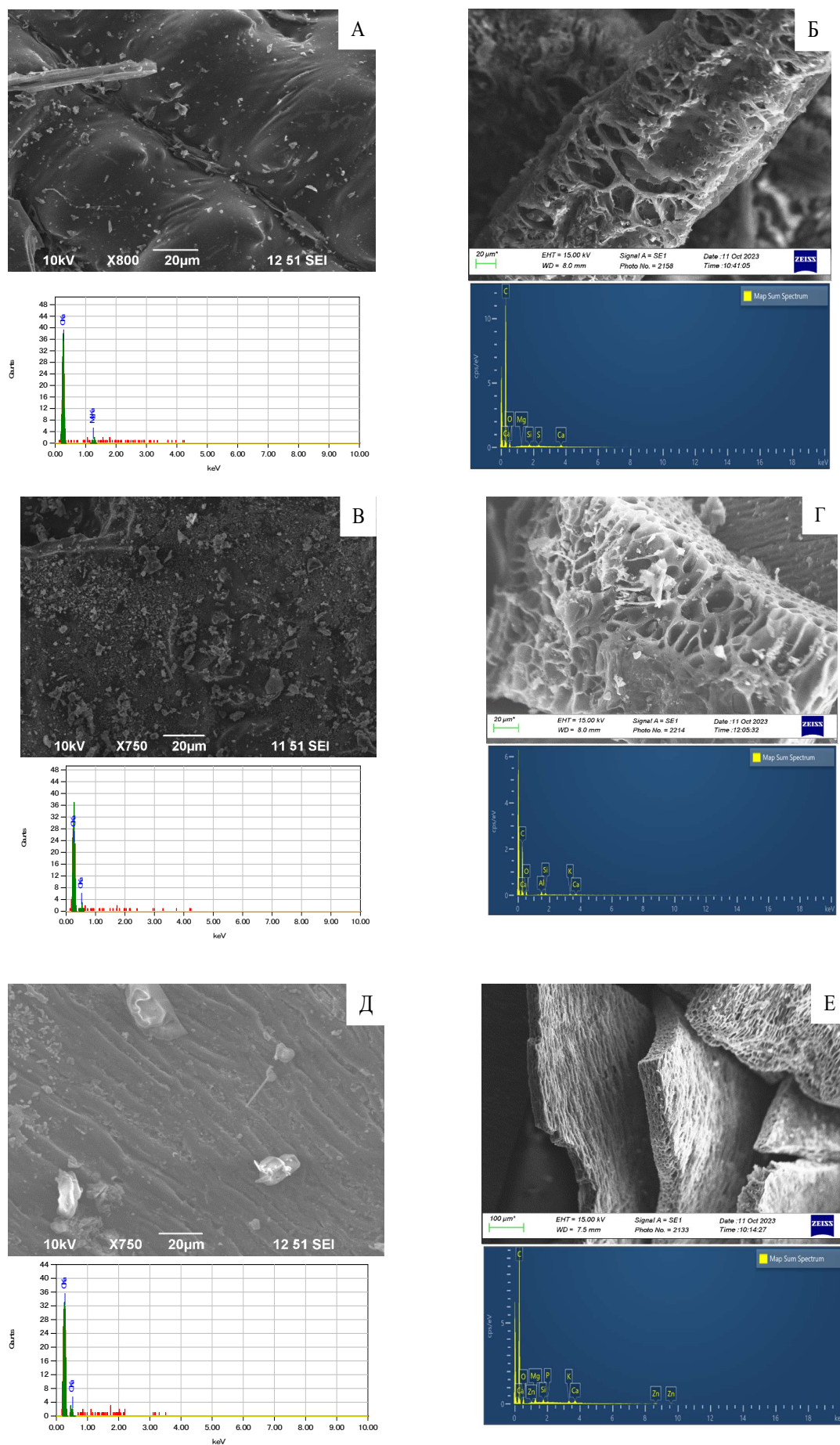


Рис. 3. Снимки СЭМ и спектрограммы ЭДС-анализа АУ: А – RH 900; Б – RH KOH; В – WN 900; Г – WN KOH; Д – BH 900; Е – BH KOH.

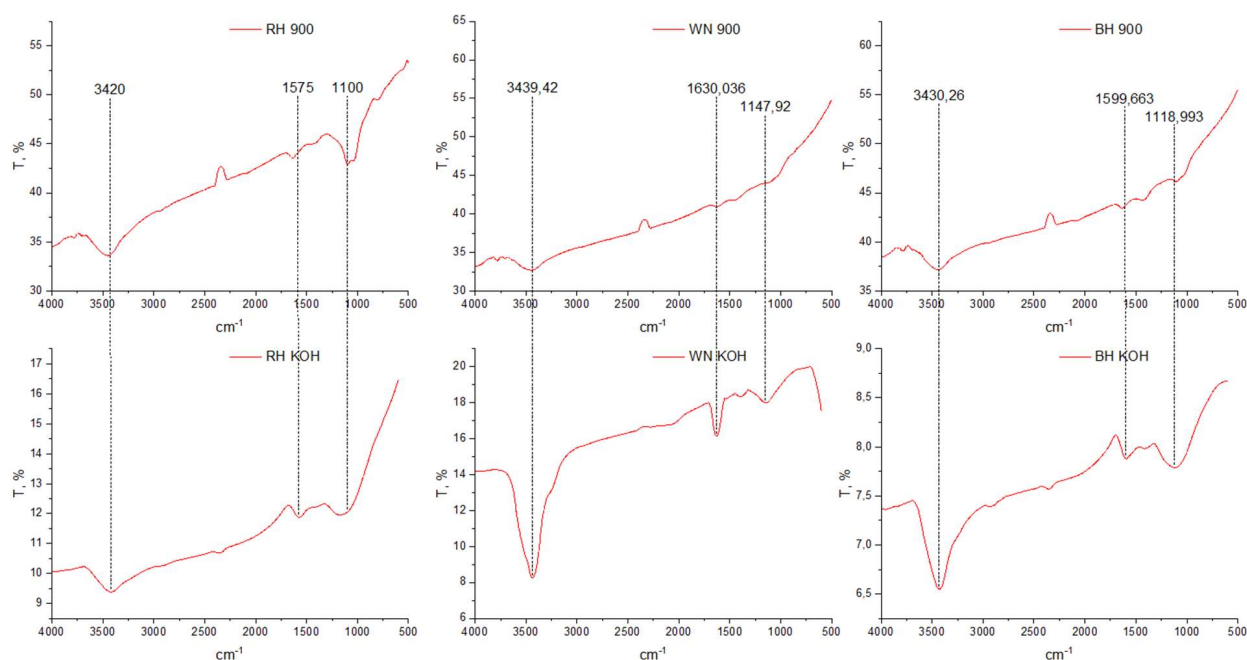


Рис. 4. Спектры ИК Фурье для АУ, активированных при 900 °С без КОН и активированных КОН при 900 °С.

На всех спектрах наблюдаются пики в районе 3420–3439 cm^{-1} , соответствующие колебаниям -ОН групп. Интенсивность этих пиков увеличивается после активации КОН, что свидетельствует о возрастании количества гидроксильных групп. Пик в районе 1575–1630 cm^{-1} , характерный для всех образцов, указывает на колебания С=С групп. В спектрах АУ, активированных КОН, наблюдаются изменения в области 1100–1147 cm^{-1} , что подтверждает присутствие С-О связей, увеличивающихся после активации КОН и является характерным для всех АУ, полученных методом химической активации. Увеличение интенсивности пиков -ОН и С-О групп свидетельствует о прохождении химических реакций между КОН и углеродной матрицей АУ, приводящих к образованию новых функциональных групп.

3.4 Сорбция йода

Сорбция радиоактивного йода является важным процессом для предотвращения или минимизации воздействия радиоактивного загрязнения, особенно в случае аварий на атомных электростанциях. Проведены исследования по определению сорбционной емкости АУ, полученных методом химической активации, для нерадиоактивного изотопа йода ^{127}I (KI) в водной среде. На рис. 5 приведены изотермы сорбции образцов ВН КОН, RH КОН и WN КОН. Все измерения выполняли трижды для вычисления статистического отклонения.

Образец RH КОН достигает сорбционного равновесия за 10 ч, демонстрируя максимальную сорбционную емкость 217 ± 5 мг/г. Образец WN КОН достигает сорбционного равновесия за 30 ч с максимальной сорбционной емкостью 190 ± 10 мг/г. Образец ВН КОН достигает равновесия сорбции также примерно за 10 ч, демонстрируя максимальную сорбционную емкость около 215 ± 5 мг/г. Его высокая сорбционная емкость аналогична результатам для образца RH КОН за счет схожих текстурных характеристик. Образцы RH КОН и ВН КОН показали наиболее высокие значения сорб-

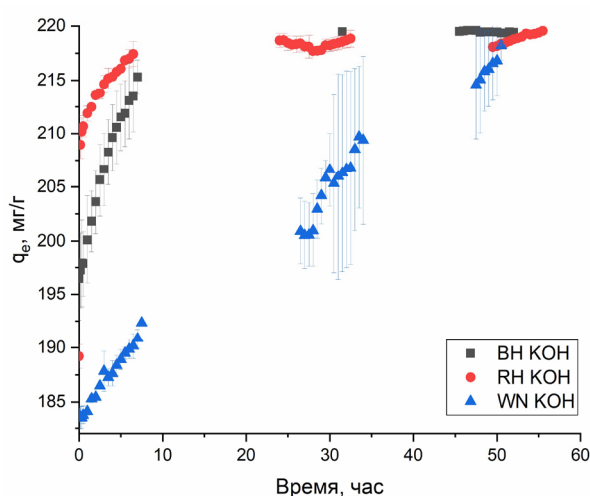


Рис. 5. Кинетика сорбции йодид ионов из водного раствора KI концентрацией 50 мг/л (RH КОН, WN КОН, ВН КОН).

ционной емкости и быстрое достижение равновесия. Образец WN КОН, хотя и демонстрирует более медленное достижение равновесия, также обладает значительной сорбционной емкостью. Эти результаты подтверждают применимость АУ, полученных методом химической активации, для сорбции йодид ионов из водной среды.

4. Заключение

В данной статье проведено комплексное исследование сорбционных свойств активированных углей, полученных из биомассы растительного происхождения методом химической активации КОН. Результаты ВЕТ анализа показали, что активация КОН значительно увеличивает удельную поверхность и объем пор в сравнении с физически активированными образцами АУ. Наиболее выраженные изменения наблюдаются для образцов ВН КОН, удельная поверхность которых достигает 1579,43 м²/г по сравнению с 313,61 м²/г для ВН 900. Эти изменения обусловлены эффективностью КОН в создании микро- и мезопор в структуре углерода, что подтверждается и результатами ИК-спектроскопии. Спектры FTIR продемонстрировали уменьшение интенсивности пиков -ОН групп и появление новых пиков, соответствующих деформации О-Н и образованию С-О связей, что указывает на химическое взаимодействие КОН с углеродной матрицей. Анализ СЭМ-изображений показал значительные различия в морфологии поверхности между АУ, полученными методом физической активации при 900 °С в атмосфере СО₂, и АУ, полученными методом химической активации КОН при 900 °С в атмосфере N₂. Образцы, активированные КОН, характеризуются развитой пористой структурой с густой сетью микро- и мезопор, что улучшает их адсорбционные свойства. ЭДС-анализ показал снижение концентрации углерода и увеличение содержания кислорода после активации КОН, что также подтверждает эффективность химической активации. Сравнительный анализ сорбционной емкости активированных углей показал, что образцы RH КОН и ВН КОН обладают наибольшими значениями сорбционной емкости и быстротой достижения сорбционного равновесия.

Таким образом, исследование продемонстрировало, что активация углеродных материалов гидроксидом калия значительно улучшает их текстурные и адсорбционные характеристики, делая их эффективными для удаления растворенного йода из водных растворов.

Благодарность

Исследование проведено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR27199301).

Список литературы

- [1]. World Health Organization. Guidelines for Drinking-Water Quality. – Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2011.
- [2]. Dinh Chau N., Dulinski M., Jodlowski P., Nowak J., Rozanski K., Slezia M., Wachniew P. Natural Radioactivity in Groundwater—a Review // *Isot. Environ. Health Stud.* – 2011. – Vol. 47. – P. 415-437.
- [3]. Jaworowski Z. Environmental protection Natural and man-made radionuclides in the global atmosphere // *IAEA Bull.* – 1982. – Vol. 24. – P. 35-39.
- [4]. Artioli Y. Adsorption // *Encyclopedia of Ecology.* – 2008. – P. 60-65.
- [5]. Canner A.J., Pepper S.E., Hayer M., Ogden M.D. Removal of radionuclides from a HCl steel decontamination stream using chelating ion exchange resins—Initial studies // *Prog. Nucl. Energy.* – 2018. – Vol. 104. – P. 271-279.
- [6]. Clifford D., Vijeswarapu W., Subramonian S. Evaluating Various Adsorbents and Membranes for Removing Radium From Groundwater // *JAmWaterWorkAssoc.* – 1988. – Vol. 80. – P. 94-104.
- [7]. Kim K.J., Kang S., Shon J.S., Hong K.P. Treatment of Organic Radioactive Wastes by Evaporation Utilizing DU Oxidation Apparatus // *Proceedings of the Korean Nuclear Society Conference.* Busan, Korea, 2005.
- [8]. Osmanlioglu A.E. Decontamination of radioactive wastewater by two-staged chemical precipitation // *Nucl. Eng. Technol.* – 2018. – Vol. 50. – P. 886-889.
- [9]. Miśkiewicz A., Nowak A., Pałka J., Zakrzewska-Kołodziej G. Liquid Low-Level Radioactive Waste Treatment Using an Electrodialysis Process // *Membranes.* – 2021. – Vol. 11. – P. 324.
- [10]. Rajendran S., Shahbaz K., Walvekar R. A fundamental study on solubility of heavy metal oxides in ammonium and phosphonium based deep eutectic solvents // *J. Eng. Sci. Technol.* – 2016. – Vol. 11. – P. 82-96.
- [11]. Mansurov Z.A., Velasco L.F., Lodewyckx P. Modified Carbon Sorbents Based on Walnut Shell for Sorption of Toxic Gases // *J Eng Phys Thermophy.* – 2022. – Vol. 95. – P. 1383-1392.

- [12]. Kuldeyev E., Seitzhanova M., Tanirbergenova S., Tazhu K., Doszhanov E., Mansurov Z., Azat S., Nurlybaev R., Berndtsson R. Modifying Natural Zeolites to Improve Heavy Metal Adsorption // *Water*. – 2023. – Vol. 15. – P. 2215.
- [13]. Seitzhanova M., Azat S., Yeleuov M., Taurbekov A., Mansurov Z., Doszhanov E., Berndtsson R. Production of Graphene Membranes from Rice Husk Biomass Waste for Improved Desalination // *Nanomaterials*. – 2024. – Vol. 14. – P. 224.
- [14]. Ihsanullah Abbas A., Al-Amer A.M., Laoui T., Al-Marri M.J., Nasser M.S., Khraisheh M., Atieh M.A. Heavy metal removal from aqueous solution by advanced carbon nanotubes: Critical review of adsorption applications // *Sep. Purif. Technol.* – 2016. – Vol. 157. – P. 141-161.
- [15]. Petit C. Present and future of MOF research in the field of adsorption and molecular separation // *Curr. Opin. Chem. Eng.* – 2018. – Vol. 20. – P. 132-142.
- [16]. Zhang Z., Luo X., Liu Y., Zhou P., Ma G., Lei Z., Lei L. A low cost and highly efficient adsorbent (activated carbon) prepared from waste potato residue // *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* – 2015. – Vol. 49. – P. 206-211.
- [17]. Haso H.W., Dubale A.A., Chimdesa M.A., Atlabachew M. High Performance Copper Based Metal Organic Framework for Removal of Heavy Metals From Wastewater // *Front. Mater.* – 2022. – Vol. 9. – P. 60.
- [18]. Khalili N.R., Vyas J.D., Weangkaew W., Westfall S.J., Parulekar S.J., Sherwood R. Synthesis and characterization of activated carbon and bioactive adsorbent produced from paper mill sludge // *Sep. Purif. Technol.* – 2002. – Vol. 26. – P. 295-304.
- [19]. Yalçın N., Sevinç V. Studies of the surface area and porosity of activated carbons prepared from rice husks // *Carbon*. – 2000. – Vol. 38. – P. 1943-1945.
- [20]. Hayakawa S., Matsubara S., Sumi Y., Yamamoto S., Kawamura N., Nonami T. Caesium and strontium adsorption ability of activated bamboo charcoal // *Int. J. Nanotechnol.* – 2018. – Vol. 15. – P. 683-688.
- [21]. El-Din A.M.S., Monir T., Sayed M.A. Nano-sized Prussian blue immobilized costless agro-industrial waste for the removal of cesium-137 ions // *Environ. Sci. Pollut. Res.* – 2019. – Vol. 26. – P. 25550-25563.
- [22]. Njewa J.B., Vunain E., Biswick T. Synthesis and Characterization of Activated Carbons Prepared from Agro-Wastes by Chemical Activation // *J. Chem.* – 2022. – Vol. 2022. – P. 1-13.
- [23]. Caccin M., Giacobbo F., Da Ros M., Besozzi L., Mariani M. Adsorption of uranium, cesium and strontium onto coconut shell activated carbon // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* – 2012. – Vol. 297. – P. 9-18.
- [24]. Pal A., Thu K., Mitra S., El-Sharkawy I.I., Saha B.B., Kil H.-S., Yoon S.-H., Miyawaki J. Study on biomass derived activated carbons for adsorptive heat pump application // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2017. – Vol. 110. – P. 7-19.
- [25]. Hasan M.N., Shenashen M.A., Hasan M.M., Znad H., Awual M.R. Assessing of cesium removal from wastewater using functionalized wood cellulosic adsorbent // *Chemosphere*. – 2021. – Vol. 270. – P. 128668.
- [26]. Wei L., Deng W., Li S., Wu Z., Cai J., Luo J. Sandwich-like chitosan porous carbon Spheres/MXene composite with high specific capacitance and rate performance for supercapacitors // *J. Bioresour Bioprod.* – 2022. – Vol. 7. – P. 63-72.
- [27]. Rashidi N.A., Chai Y.H., Ismail I.S., Othman M.F.H., Yusup S. Biomass as activated carbon precursor and potential in supercapacitor applications. *Biomass Convers // Biorefinery*. – 2022. – Vol. 2022. – P. 1-15.
- [28]. Kunarbekova M., Busquets R., Sailaukhanuly Y., Mikhalevsky S.V., Toshtay K., Kudaibergenov K., Azat S. Carbon adsorbents for the uptake of radioactive iodine from contaminated water effluents: A systematic review // *Journal of Water Process Engineering*. – 2024. – Vol. 67. – P. 106174.
- [29]. Rashid R., Shafiq I., Akhter P., Iqbal M.J., Hussain M. A State-of-the-Art Review on Wastewater Treatment Techniques: The Effectiveness of Adsorption Method // *Environ. Sci. Pollut. Res.* – 2021. – Vol. 28. – P. 9050-9066.
- [30]. Taurbekov A., Abdissattar A., Atamanov M., Yeleuov M., Daulbayev C., Askaruly K., Kaidar B., Mansurov Z., Castro-Gutierrez J., Celzard A., Fierro V., Atamanova T. Biomass Derived High Porous Carbon via CO₂ Activation for Supercapacitor Electrodes // *Journal of Composites Science*. – 2023. – Vol. 7(10). – P. 444.

References

- [1]. World Health Organization (2011) Guidelines for Drinking-Water Quality. Geneva, Switzerland.
- [2]. Dinh Chau N, Dulinski M, Jodlowski P, Nowak J, Rozanski K, Sleziak M, Wachniew P (2011) *Isot Environ Health Stud* 47:415-437. <https://doi.org/10.1080/10256016.2011.628123>
- [3]. Jaworowski Z (1982) *IAEA Bull* 24: 35-39.
- [4]. Artioli Y (2008) *Encyclopedia of Ecology*: 60-65. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00252-4>
- [5]. Canner AJ, Pepper SE, Hayer M, Ogden MD

- (2018) Prog Nucl Energy 104:271-279. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.10.007>
- [6]. Clifford D, Vijeswarapu W, Subramonian S (1988) J Am Water Work Assoc 80:94-104. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1988.tb03073.x>
- [7]. Kim KJ, Kang S, Shon JS, Hong KP (2005) Treatment of Organic Radioactive Wastes by Evaporation Utilizing DU Oxidation Apparatus. Proceedings of the Korean Nuclear Society Conference Busan, Korea.
- [8]. Osmanlioglu AE (2018) Nucl Eng Technol 50:886-889. <https://doi.org/10.1016/j.net.2018.04.009>
- [9]. Miśkiewicz A, Nowak A, Pałka J, Zakrzewska-Kołodziej G (2021) Membranes 11:324. <https://doi.org/10.3390/membranes11050324>
- [10]. Rajendran S, Shahbaz K, Walvekar R (2016) J Eng Sci Technol 11:82-96.
- [11]. Mansurov ZA, Velasco LF, Lodewyckx P (2022) J Eng Phys Thermophy 95:1383-1392. <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02607-7>
- [12]. Kuldeyev E, Seitzhanova M, Tanirbergenova S, Tazhu K, Doszhanov E, Mansurov Z, Azat S, Nurlybaev R, Berndtsson R (2023) Water 15:2215. <https://doi.org/10.3390/w15122215>
- [13]. Seitzhanova M, Azat S, Yeleuov M, Taurbekov A, Mansurov Z, Doszhanov E, Berndtsson R (2024) Nanomaterials 14:224. <https://doi.org/10.3390/nano14020224>
- [14]. Ihsanullah Abbas A, Al-Amer AM, Laoui T, Al-Marri MJ, Nasser MS, Khraisheh M, Atieh MA (2016) Sep Purif Technol 157:141-161. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.11.039>
- [15]. Petit C (2018) Curr Opin Chem Eng 20:132-142. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2018.04.004>
- [16]. Zhang Z, Luo X, Liu Y, Zhou P, Ma G, Lei Z, Lei L (2015) J Taiwan Inst Chem Eng 49:206-211. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2014.11.024>
- [17]. Haso HW, Dubale AA, Chimdesa MA, Atlabachew M (2022) Front Mater 9: 60. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.840806>
- [18]. Khalili NR, Vyas JD, Weangkaew W, Westfall SJ, Parulekar SJ, Sherwood R (2002) Sep Purif Technol 26:295-304. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(01\)00184-8](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(01)00184-8)
- [19]. Yalçın N, Sevinç V (2000) Carbon 38:1943-1945. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00029-4](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00029-4)
- [20]. Hayakawa S, Matsubara S, Sumi Y, Yamamoto S, Kawamura N, Nonami T (2018) Int J Nanotechnol 15:683-688. <https://doi.org/10.1504/IJNT.2018.098434>
- [21]. El-Din AMS, Monir T, Sayed MA (2019) Environ. Sci Pollut Res 26:25550-25563. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05851-2>
- [22]. Njewa JB, Vunain E, Biswick T (2022) J Chem 2022:1-13. <https://doi.org/10.1155/2022/9975444>
- [23]. Caccin M, Giacobbo F, Da Ros M, Besozzi L, Mariani M (2012) J Radioanal Nucl Chem 297: 9-18. <https://doi.org/10.1007/s10967-012-2305-x>
- [24]. Pal A, Thu K, Mitra S, El-Sharkawy II, Saha BB, Kil H-S, Yoon S-H, Miyawaki J (2017) Int J Heat Mass Transf 110:7-19. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.081>
- [25]. Hasan MN, Shenashen MA, Hasan MM, Znad H, Awual MR (2021) Chemosphere 270:128668. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128668>
- [26]. Wei L, Deng W, Li S, Wu Z, Cai J, Luo (2022) J Bioresour Bioprod 7:63-72. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.10.001>
- [27]. Rashidi NA, Chai YH, Ismail IS, Othman MFH, Yusup S (2022) Biorefinery 2022:1-15. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02351-1>
- [28]. Kunarbekova M, Busquets R, Sailaukhanuly Y, Mikhlovsky SV, Toshtay K, Kudaibergenov K, Azat S (2024) J Water Process Eng 67:106174. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106174>
- [29]. Rashid R, Shafiq I, Akhter P, Iqbal MJ, Hussain M (2021) Environ Sci Pollut Res 28:9050-9066. <https://doi.org/10.3390/jcs7100444>
- [30]. Taurbekov A, Abdisattar A, Atamanov M, Yeleuov M, Daulbayev C, Askaruly K, Kaidar B, Mansurov Z, Castro-Gutierrez J, Celzard A, Fierro V, Atamanova T (2023) J Compos Sci 7(10): 444. <https://doi.org/10.3390/jcs7100444>

Радиоактивті йодты сорбциялау үшін биомасадан белсендірілген көмірдің синтезі және сипаттамасы

М.С. Кунарбекова, Л.Н. Сеймуханова*,
И.О. Сапарғали, Ұ.Е. Жантیکеев, К.К. Қудайбергенов,
С. Азат

Инженерлік бейінді зертхана, Satbayev University, Сәтпаев к-сі, 22а, Алматы, Қазақстан

АНДАТПА

Электр энергиясына деген қажеттіліктің артуына байланысты Қазақстанда атом электр станциясының құрылысы осы мәселенің тиімді шешімі болып табылады. Бұл өз кезегінде елдегі радиоактивті қалдықтардың қосымша көздерінің пайда болуына әсер етеді. Осыған байланысты ядролық қалдықтарды басқару және тиімді сорбенттерді синтездеу өзекті міндет болып табылады. Көміртектегі сорбенттер әртүрлі ластаушы заттарға бейімделу қабілетіне байланысты суды тазарту жүйелерінде кеңінен қолданылады. Радионуклидтерді,

соның ішінде радиоактивті йодты алып тастау суда және ауада аниондар мен молекулалық йодтың болуына байланысты күрделі мәселе болып табылады. Бұл жұмыс биомасса негізіндегі көміртектегі сорбенттердің су ортасынан йодид иондарын сіңіру қабілетін зерттейді. Жаңғақ қабығы (WN KOH), күріш қабығы (RH KOH) және қарақұмық қабығы (BH KOH) негізінде белсендірілген көмірлер сериясы алынды. KOH активациясы сорбенттердің текстуралық және адсорбциялық өнімділігін айтарлықтай жақсартты. BET әдісі кеуектердің меншікті беті мен көлемінің ұлғаюын көрсетті: RH KOH үшін $1881,83 \text{ м}^2/\text{г}$ дейін, WN KOH үшін $2192,67 \text{ м}^2/\text{г}$ дейін және BH KOH үшін $1579,43 \text{ м}^2/\text{г}$ дейін. СЭМ суреттері белсендірілген үлгілердің дамыған кеуекті құрылымын көрсетті, ал ЭҚК талдауы KOH белсендірілгеннен кейін оттегінің жоғарылауын растады. Сорбциялық сыйымдылықты салыстырмалы талдау RH KOH (q_e 217 мг/г, t_{eq} 10 сағ) және BH KOH (q_e 215 мг/г, t_{eq} 10 сағ) үлгілері ең тиімді екенін көрсетті. Ал WN KOH үлгілері үшін максималды сорбциялық сыйымдылыққа жету үшін ұзағырақ уақыт қажет болды (q_e 190 мг/г, t_{eq} 30 сағ). Осылайша, көміртектегі сорбенттердің KOH активтенуі олардың адсорбциялық өнімділігін жақсартады, бұл оларды суды радиоактивті ластаушы заттардан тазарту жүйелерінде қолдануға перспективалы етеді.

Түйін сөздер: белсендірілген көмір, химиялық активация, радионуклидтердің адсорбциясы, йод, биомасса.

Synthesis and characterization of activated carbon from biomass for the sorption of radioactive iodine

M.S. Kunarbekova, L.N. Seimukhanova*, I.O. Sapargali, U.Ye. Zhantikeev, K.K. Kudaibergenov, S. Azat

Laboratory of Engineering profile, Satbayev University, 22a, Satpayev str., Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

Due to the increasing demand for electricity, building a nuclear power plant in Kazakhstan presents an effective solution. However, this development will lead to the generation of additional radioactive waste. Consequently, managing nuclear

waste and synthesizing efficient sorbents becomes crucial. Carbon sorbents are commonly used in water treatment systems because they can adapt to various pollutants. Removing radionuclides, including radioactive iodine, poses challenges due to the presence of anions and molecular iodine in water and air. This study investigates the ability of biomass-based carbon sorbents to absorb iodide ions from an aqueous medium. We produced a series of activated carbons using walnut shells (WN KOH), rice husks (RH KOH), and buckwheat husks (BH KOH). The activation with KOH significantly enhanced the textural and adsorption characteristics of the sorbents. The BET method showed an increase in both specific surface area and pore volume, with values reaching $1881.83 \text{ м}^2/\text{g}$ for RH KOH, $2192.67 \text{ м}^2/\text{g}$ for WN KOH, and $1579.43 \text{ м}^2/\text{g}$ for BH KOH. Infrared (IR) spectroscopy indicated a decrease in the intensity of the -OH group peaks and the emergence of new peaks corresponding to O-H and C-O bonds. Scanning electron microscopy (SEM) images displayed a well-developed porous structure in the activated samples, and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) analysis confirmed an increased oxygen content following KOH activation. A comparative analysis of sorption capacity revealed that RH KOH (q_e 217 mg/g, t_{eq} 10 h) and BH KOH (q_e 215 mg/g, t_{eq} 10 h) were the most effective sorbents. In contrast, the WN KOH samples required more time to reach their maximum sorption capacity (q_e 190 mg/g, t_{eq} 30 h). Therefore, the KOH activation of carbon sorbents enhances their adsorption characteristics, making them promising candidates for water purification systems targeting radioactive pollutants.

Keywords: activated carbon, chemical activation, adsorption of radionuclides, iodine, biomass