

PRODUCTION OF HYDROCHAR BY HYDROTHERMAL CARBONIZATION OF RICE HUSK

N.O.Appazov^{1,2}, A.G.Ibragim¹, D.Zh.Niyazova¹, I.D.Yespanova¹, A.B.Toybazarova¹, S.Lyubchyk³, R.A.Turmanov^{1,4}, M.I.Syzdykbayev¹, R.A.Narmanova^{1,4} G.Sh., Askarova¹

¹Non-profit joint-stock company «Korkyt Ata Kyzylorda University», Kyzylorda, Kazakhstan

²“CNEC” LLP, Kyzylorda, Kazakhstan

³Lusófona University, Lisbon, Portugal

⁴“DPS Kyzylorda” LLP, Kyzylorda, Kazakhstan

*E-mail: nurasar.82@korkyt.kz

Abstract. This paper presents the results of a study on the production of hydrochar through hydrothermal carbonization of rice husk. Hydrothermal carbonization is an innovative and promising biomass processing method that yields a carbon-rich product with high calorific value and a wide range of applications. Rice husk, a byproduct of the rice industry, is often considered waste but holds significant potential as a feedstock for bioenergy materials. Experiments on hydrothermal carbonization of rice husk were conducted under various temperature conditions. The optimal process parameters were determined based on the yield and physicochemical properties of the final product. The formation of pores on the hydrochar surface depends on the duration and temperature of the process. Biomass undergoes significant decomposition at high temperatures, exposing its underlying layers and enhancing hydrochar porosity. The optimal hydrothermal carbonization temperature for rice husk was found to be 800°C with a duration of 60 minutes. The iodine adsorption capacity at 800°C reached 63.37%. Scanning electron microscopy revealed that the obtained hydrochar possesses a well-developed porous structure.

Keywords: hydrothermal carbonization, rice husk, waste processing, adsorbent, hydrochar.

Appazov Nurbol Orynbasaruly	Candidate of chemical sciences, professor, e-mail: nurasar.82@korkyt.kz
Ibragim Aizhan Ganikyzy	Master's student, e-mail: aizhan.ibragim@icloud.com
Niyazova Dinara Zhumabekovna	Doctoral student, e-mail: din_bota.87@mail.ru
Yespanova Indira Daurenovna	Doctoral student, e-mail: indirka.25@mail.ru
Toybazarova Altynkul Bakytkyzy	Doctoral student, e-mail: toibazarova2002@mail.ru
Lyubchyk Sergiy	PhD, e-mail: sergiy.lyubchyk@yahoo.com
Turmanov Rakhymzhan Akhmetkhanovich	PhD, e-mail: t.rahimjan.91@mail.ru
Syzdykbayev Marat Izimkhanovich	Candidate of chemical sciences, e-mail: syzdykbayev_m@korkyt.kz
Narmanova Roza Abdibekovna	Candidate of technical sciences, Associate Professor, e-mail: roza_an@mail.ru
Askarova Gulzat Shakirbekovna	Candidate of technical sciences, e-mail: gulzat70@mail.ru

Citation: Appazov N.O., Ibragim A.G., Niyazova D.Zh., Yespanova I.D., Toybazarova A.B., Lyubchyk S., Turmanov R.A., Syzdykbayev M.I., Narmanova R.A., Askarova G.Sh. Production of hydrochar by hydrothermal carbonization of rice husk. *Chem. J. Kaz.*, **2025**, 2(90), 81-91. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2025-2.2710-1185.24>

ПОЛУЧЕНИЕ ГИДРОЧАРА ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ КАРБОНИЗАЦИЕЙ
РИСОВОЙ ШЕЛУХИ

*Н.О.Аппазов^{1,2}, А.Ф.Ибрагим¹, Д.Ж.Ниязова¹, И.Д.Еспанова¹, А.Б.Тойбазарова¹,
С.Любчик³, Р.А.Турманов^{1,4}, М.И.Сыздыкбаев¹, Р.А.Нарманова^{1,4}, Г.Ш.Аскарова¹*

¹ НАО «Кызылординский университет имени Коркыт Ата», Кызылорда, Казахстан

² ТОО «СНЕС», Кызылорда, Казахстан

³ Университет Лузофона, Лиссабон, Португалия

⁴ ТОО «DPS Кызылорда», Кызылорда, Казахстан

*E-mail: nurasar.82@korkyt.kz

Резюме. В данной работе приводятся результаты исследований процесса получения гидрочара методом гидротермальной карбонизации из рисовой шелухи. Гидротермальная карбонизация является инновационным и перспективным методом переработки биомассы, который позволяет получить углеродсодержащий продукт с высокой теплотворной способностью и широким спектром применения. Рисовая шелуха, являясь побочным продуктом рисовой промышленности, часто рассматривается как отход, однако она обладает значительным потенциалом в качестве сырья для получения биоэнергетических материалов. В ходе исследования были проведены эксперименты по гидротермальной карбонизации рисовой шелухи при различных температурных режимах. Оптимальные условия процесса были определены на основе анализа выхода конечного продукта и его физико-химических свойств. Появление пор на поверхности гидрочара зависит от продолжительности и температуры процесса. Биомасса значительно разлагается при высоких температурах, что приводит к экспозиции основных слоев биомассы, в результате чего улучшается пористость гидрочара. Оптимальная температура гидротермальной карбонизации рисовой шелухи составляет 800°C при продолжительности 60 мин. Адсорбционная активность по йоду при 800°C составила 63.37%. По результатам исследований на растровом электронном микроскопе можно увидеть, что полученный гидрочар имеет развитую пористую структуру.

Ключевые слова: гидротермальная карбонизация, рисовая шелуха, переработка отходов, адсорбент, гидрочар.

<i>Аппазов Нурбол Орынбасарұлы</i>	<i>кандидат химических наук, профессор</i>
<i>Ибрагим Айжан Ганикызы</i>	<i>магистрант</i>
<i>Ниязова Динара Жумабековна</i>	<i>докторант</i>
<i>Еспанова Индира Дауреновна</i>	<i>докторант</i>
<i>Тойбазарова Алтынкул Бакыткызы</i>	<i>докторант</i>
<i>Любчик Сергей</i>	<i>PhD</i>
<i>Турманов Рахымжан Ахметханович</i>	<i>PhD</i>
<i>Сыздыкбаев Марат Изимханович</i>	<i>кандидат химических наук</i>
<i>Нарманова Роза Абдибековна</i>	<i>кандидат технических наук, доцент</i>
<i>Аскарова Гульзат Шакирбековна</i>	<i>кандидат технических наук</i>

1. Введение

С ростом населения и промышленности увеличивается интерес к устойчивому сельскому производству и охране окружающей среды. Углеродные материалы, такие как активированный уголь, биочар и гидрочар, рекомендуются как адсорбент для очистки воды, улучшения характеристики почв и экологической санации из-за своей экономической

эффективности. Гидрочары, созданные методом гидротермальной карбонизации биомассы, широко применяются как улучшители почвы, удобрения, адсорбенты и источники энергии [1].

Чрезмерное образование отходов привело к концепции циркулярной биоэкономики, направленной на создание ценных побочных продуктов и улучшение экологической устойчивости. Ежегодное мировое производство риса составляет более 750 миллионов тонн соломы и 150 миллионов тонн шелухи. Термохимические и гидротермальные процессы используются для производства биочара и гидрочара из биомассы [2]. Рисовая шелуха (РШ) содержит ценные биоматериалы, которые широко применяются в различных областях. РШ и ее производные могут найти применение в качестве топлива и других источников энергии, строительных материалов, в фармацевтике, медицине и нанобиотехнологии [3].

В работе [4] детально проанализированы физические, химические и металлургические свойства гидрочара. Результаты показали, что благодаря гидротермальной карбонизации значительно улучшились общая теплотворная способность, измельчаемость, температура воспламенения, взрывоопасность, сгораемость и газификация по сравнению с исходными отходами.

Гидрочар может повысить продуктивность агролесоводческих систем, улучшая рост растений и качество почвы, а также помогать в смягчении изменений климата, фиксируя углерод в почве и потенциально увеличивая поглощение углерода деревьями [5].

Основные отличия гидрочара заключаются в высоком содержании кислородсодержащих функциональных групп и высокой теплотворной способности. Эти свойства зависят от типа исходного материала, температуры и времени гидротермальной карбонизации (ГТК). Гидрочар проявляет перспективы в качестве адсорбента, пористого углерода, носителя катализаторов и в сфере чистой энергии [6].

ГТК привлекло значительное внимание за последние несколько лет как процесс производства гидрочара из различных видов биологических материалов, таких как сельскохозяйственные отходы. Рассматриваются процессы масштабирования и применения гидрочара в различных отраслях промышленности [7]. Гидрочар обладает гидрофобными свойствами, высокой плотностью энергии и теплотворной способностью, сравнимыми с бурым углем. Основное различие между методами заключается в использовании большого количества воды при ГТК, что влияет на механизмы образования гидрочара. В работе [8] рассматриваются особенности низкотемпературной термообработки и изменения структурных компонентов биомассы (целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин) при этих процессах.

Получен гидрочар из отходов арбузной кожуры, который гидротермически обугливаются при 190°C и 260°C в течение 1 ч, 6 ч и 12 ч соответственно. Гидрочар и отработанный щелок собираются и

анализируются на предмет их свойств. Результаты показывают, что выход гидроcharа составляет 2–5% и 46–95% на свежем и сухом веществе соответственно [9].

С высоким содержанием углерода был получен гидроchar путем ГТК опавших листьев при различных температурах обработки 200–250°C и обрабатывалась горячей деионизированной водой в течение 30 минут. Таким образом, гидроchar с высоким содержанием энергии (91.67 %) был извлечен при карбонизации при 240°C [10].

Были синтезированы сорбционные углеродные материалы методом ГТК отходов растительного сырья агропромышленного комплекса – шрота подсолнечника. С помощью ИК-спектроскопии определен фазовый состав полученных образцов гидротермального углерода. Морфологические характеристики получены с помощью метода СЭМ. Установлено, что карбонизация образцов ГТК способствует развитию пористой структуры материалов-сорбентов [11].

Был получен гидроchar и пироchar, которые были изготовлены из травы Напье методом ГТК (200 и 240°C) и пиролиза (300 и 500°C) соответственно, и были систематически определены физико-химические свойства и характеристики сорбции Cd^{2+} [12].

Обогащенный фосфором гидроchar был получен путем совместной гидротермальной обработки биомассы (бамбук или гикори) с концентрированной H_3PO_4 (биомасса: $\text{H}_3\text{PO}_4 = 1:4$) при 200°C в течение 7 часов. Были определены характеристики гидроугля, обогащенного фосфором, и исследовано его влияние на стабилизацию Pb в почвах [13].

Был получен гидроchar путем каталитической ГТК рисовой соломы при 200°C с и без FeCl_3 (1.2 %) в качестве железного катализатора, который, как сообщается, обладает способностью улучшать поверхностные свойства. Были проведены эксперименты с партиями для изучения влияния дозировки сорбента, pH и начальной концентрации ионов металла на адсорбционные характеристики [14].

Углеродный гидроchar, который был получен путем гидротермальной карбонизации листьев финиковой пальмы. Данная биомасса была химически модифицирована с использованием H_2O_2 , что привело к образованию гидроcharа из листьев финиковой пальмы. Высококачественное просвечивающее электронное микроскопическое изображение гидроcharа из листьев финиковой пальмы показало структуру в виде губчатых кубических мезопорозных наноструктур и термальный анализ показал два этапа разложения при температурах около 330 и 400°C. Были оценены физико-химические свойства и способность к энергетическому производству гидроcharа. Гидроchar имеет более высокую теплотворную способность – 20.95 МДж/кг [15].

Исследован гидроchar из РШ в качестве альтернативного адсорбента для удаления атразина. Гидроchar был получен с помощью ГТК под воздействием микроволн при различных условиях: температура (150–200°C),

время пребывания (20-60 мин) и соотношение жидкости и твердого вещества (5:1–15:1 мл/г). Поверхностная активация гидроугля проводилась с использованием различных концентраций KOH и H₂O₂ [16].

Таким образом, исследование в области термической переработки, особенно ГТК сельскохозяйственных отходов является актуальной и позволяет получить практически полезный материал. В данной работе нами предложен способ переработки многотоннажного отхода – РШ в практически полезный материал – гидрочар, который может найти применение в очистке различных стоков и в сельском хозяйстве для улучшения характеристик деградированных почв.

2. Экспериментальная часть

Процедура подготовки рисовой шелухи включала двукратное промывание под проточной водой, затем один раз дистиллированной водой. После промывки шелуха была высушена в сушильном шкафу XD-80 при температуре 105°C в течение 24 ч. Для экспериментов использовалась высушенная и промытая РШ. 40 г измельченной РШ смешивались с 40 мл воды, после полного впитывания воды проводили эксперименты по получению гидрочара в вакуумной муфельной печи 17АМ при температурах 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 600°C, 700°C и 800°C. Полученный гидрочар измельчали с помощью планетарной шаровой мельницы ВКВМ-V2 BioBase.

Формирование пористой структуры гидрочара зависит от температуры карбонизации. При высоких температурах биомасса значительно разлагается, что приводит к увеличению пористости. Микрофотографии гидрочара сняты на низковакуумном растровом электронном микроскопе JSM-6510LV, что позволил изучить пористую структуру полученных образцов.

Определение элементного состава гидрочара проводили рентгено-флуоресцентным спектрометром NEX CG Rigaku.

Изучены следующие параметры гидрочара по общеизвестным методикам: влажность, насыпная плотность, адсорбционная активность по йоду и зольность.

3. Результаты и обсуждение.

Задача данной работы состоит в разработке синтеза гидрочара гидротермальной карбонизацией рисовой шелухи. Перед карбонизацией РШ последовательно промывали проточной и дистиллированной водой и сушили в сушильном шкафу при температуре 105°C в течение 24 ч.

В 40 г рисовой шелухи перемешивая добавили 40 мл дистиллированной воды, после полного впитывания воды полученную смесь карбонизировали в вакуумной муфельной печи при различных температурах и в течение 1 ч. Изучены влияние температуры карбонизации на выход гидрочара и на его

физико-химические характеристики, такие как влажность, насыпная плотность и адсорбционная активность по йоду (Таблица 1).

Таблица 1 – Результаты исследований по гидротермальной карбонизации рисовой шелухи

Температура карбонизации, °C	Продолжительность, ч	Выход гидроcharа, %	Влажность, %	Насыпная плотность, г/л	Адсорбционная активность по йоду, %
250	1	8.88	2.25	682.1	8.88
300	1	10.13	2.42	422.0	10.13
350	1	13.90	2.74	408.0	13.90
400	1	20.32	2.75	418.4	20.32
450	1	21.50	1.85	475.7	21.50
500	1	22.83	1.71	467.7	22.83
600	1	35.52	3.44	617.6	35.52
700	1	38.10	2.29	695.5	38.10
800	1	63.37	2.09	746.2	63.37

Для определения элементного состава полученных гидроcharов применяли энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный спектрометр NEX CG Rigaku. Элементный состав гидроcharа, полученного из рисовой шелухи приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Элементный состав гидроcharов, полученных из рисовой шелухи

Гидроchar, полученный при температуре, °C	SiO ₂ , %	K ₂ O, %	CaO, %	Fe ₂ O ₃ , %
250	11.59	0.22	0.20	0.02
300	17.56	1.62	0.34	0.03
350	19.18	1.38	0.38	0.30
400	20.29	1.07	0.43	0.30
450	22.61	0.94	0.50	0.04
500	22.99	1.99	0.53	0.35
600	23.75	2.38	0.56	0.35
700	24.12	2.84	0.73	0.21
800	25.81	3.08	0.73	0.25

Содержание угля изучали косвенным способом определяя содержания золы, потеря массы при прокаливании взяли как масса углерода.

Для определения содержания углерода и золы взяли навеску 1 г гидроcharа в тигле и помещали в муфельную печь, разогретую до 1000°C и выдерживали при этой температуре 1 ч. После высушивания массу образца взвешивали в аналитических весах, результаты показаны в таблице 3.

Таблица 3 – Определение содержания углерода в гидрочаре

Гидрочар полученный при разных температурах, °C	Масса гидрочара, г	Содержание золы, %	Содержание углерода, %
250	1	19.47	80.53
300	1	28.87	71.13
350	1	31.02	68.92
400	1	32.72	67.28
450	1	36.23	63.77
500	1	38.12	61.88
600	1	38.43	61.57
700	1	38.77	61.23
800	1	41.22	58.78

Определение пористости гидрочара осуществляли с помощью электронного растрового микроскопа. Образование пор на поверхности гидрочара зависит от температуры карбонизации. При высоких температурах биомасса значительно разлагается, что приводит к обнажению её основных слоев и увеличению пористости гидрочара. На микрофотографиях можно увидеть гидрочары, полученные из рисовой шелухи при температурах 600°C, 700°C и 800°C (обладающие наиболее высокими адсорбционными характеристиками), изображения демонстрируют развитую пористую структуру полученных сорбентов (рисунки 1, 2, 3).

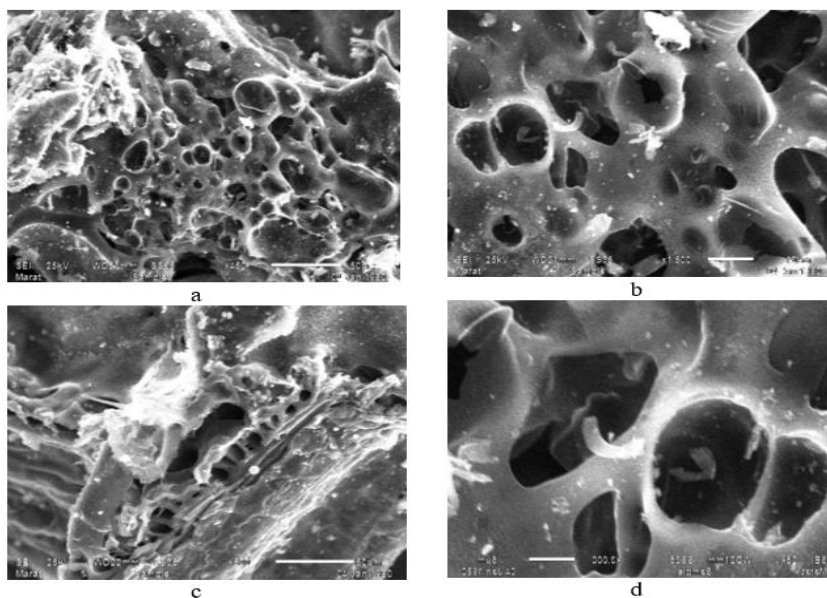


Рисунок 1 – Микрофотография гидрочара, полученного при 600°C, а – 450, б – 800, с – 1500, д – 3000 кратное увеличение

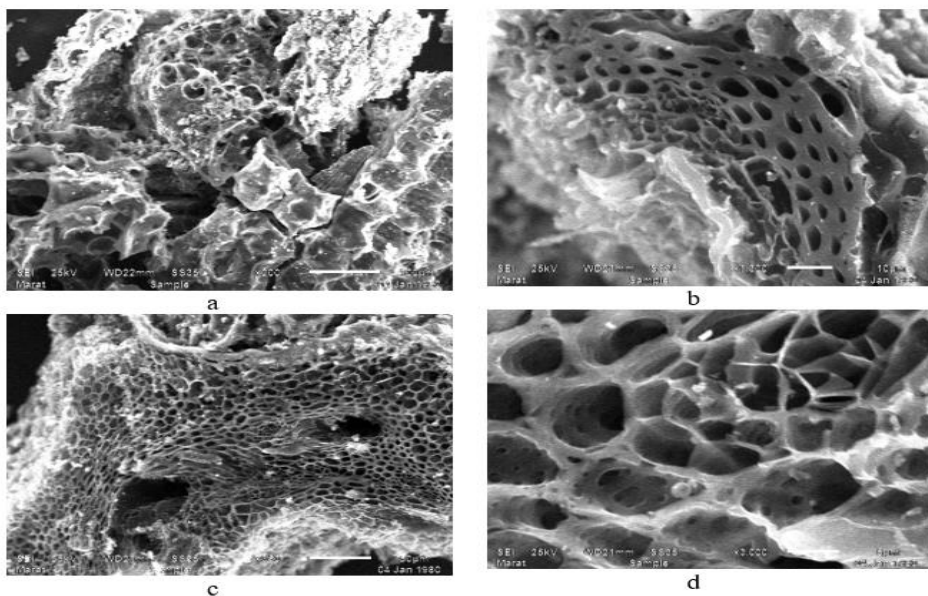


Рисунок 2 – Микрофотография гидроchara, полученного при 700°C, а – 200, б – 450, в – 1300, д – 3000 кратное увеличение

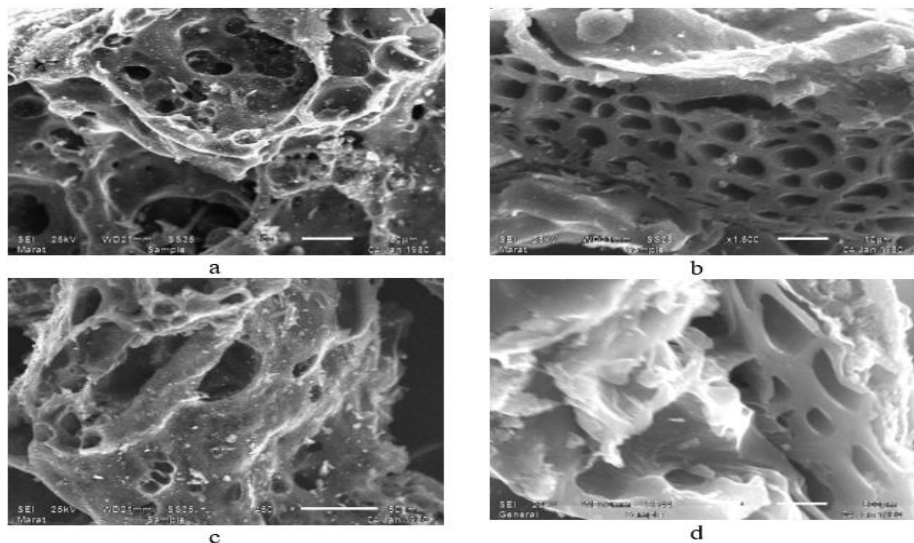


Рисунок 3 – Микрофотография гидрочара полученного при 800°C, а – 300, б – 450, в – 1500, д – 3000 кратное увеличение

Определение пористости гидрочара имеет ключевое значение для понимания его физических и химических свойств. Пористость влияет на адсорбционную способность гидрочара: чем выше пористость, тем большая

поверхность доступна для поглощения загрязняющих веществ или других химических соединений. Это делает его более эффективным в очистке воды, воздуха и в химической промышленности. Пористость также оказывает влияние на каталитические свойства гидрочара. В гидрочаре, применяемом в качестве катализатора, большая пористость увеличивает объем активной поверхности, что способствует более быстрой и эффективной химической реакции. Это имеет значение в промышленных процессах и энергетических приложениях.

Таким образом, гидротермальная карбонизация рисовой шелухи представляет собой эффективный и экологически чистый способ утилизации сельскохозяйственных отходов, обеспечивая получение ценного энергетического продукта. Дальнейшие исследования в данной области могут способствовать развитию устойчивых методов переработки биомассы и расширению областей применения полученных материалов.

4. Заключение

Гидротермальная карбонизация рисовой шелухи демонстрирует успешное превращение сельскохозяйственного отхода в ценный углеродный материал. Полученный гидрочар обладает высоким содержанием углерода и может найти применение в различных промышленных и экологически устойчивых приложениях. Исследование показало, что температура карбонизации, существенно влияет на характеристики гидрочара. Оптимизация этих параметров может значительно улучшить качество и экономическую эффективность продукта. В работе установлено, что оптимальная температура карбонизации РШ составляет 800°C при продолжительности 60 мин. Адсорбционная активность по йоду при 800°C составила 63.37%. По результатам исследований на растровом электронном микроскопе можно увидеть, что полученные гидрочары имеют развитую пористую структуру.

Гидрочар, полученный методом гидротермальной карбонизации рисовой шелухи может найти применение в качестве адсорбента для очистки воды. Его высокие сорбционные свойства позволяют эффективно удалять из сточных вод различные загрязнители, такие как тяжелые металлы и органические вещества. Это исследование способствует эффективному управлению сельскохозяйственными отходами и производству экологически чистых продуктов.

Благодарность. Авторы благодарят Лабораторию инженерного профиля НАО «Кызылординский университет им. Коркыт Ата» за техническую поддержку проведенных исследований.

Финансирование. Исследование профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ПЦФ No. BR21882415).

Конфликт интересов: Конфликт интересов между авторами отсутствует.

КҮРІШ ҚАУЫЗЫН ГИДРОТЕРМАЛДЫ КАРБОНИЗАЦИЯЛАУ АРҚЫЛЫ ГИДРОЧАР АЛУ

Н.О.Аппазов^{1,2}, Ә.Ф.Ибрагим¹, Д.Ж.Ниязова¹, И.Д.Еспанова¹, Ә.Б.Тойбазарова¹, С.Любчик³, Р.Ә.Тұрманов^{1,4}, М.И.Сыздықбаев¹, Р.Ә.Нарманова^{1,4}, Г.Ш.Асқарова¹

¹"Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті" КеАҚ, Қызылорда, Қазақстан

²"CNEC" ЖШС, Қызылорда, Қазақстан

³Лузофона университеті, Лиссабон, Португалия

⁴"DPS Қызылорда" ЖШС, Қызылорда, Қазақстан

*E-mail: nurasar.82@korkyt.kz

Түйіндемe. Бұл зерттеу жұмысында күріш қауызынан гидротермалды карбонизация әдісі арқылы гидрочар алу процесінің нәтижелері келтірілген. Гидротермалды карбонизация – биомассаны өңдеудің инновациялық және перспективалы әдісі болып табылады, ол жоғары калориялық қуаты және кең қолданыс аясы бар көміртегі бар өнім алуға мүмкіндік береді. Күріш қауызы күріш өнеркәсібінің қосымша өнімі ретінде жиі қалдық деп саналады, дегенмен ол биоэнергетикалық материалдар алу үшін шикізат ретінде айтарлықтай әлеуетке ие. Зерттеу барысында күріш қауызын әртүрлі температуралық режимдерде гидротермалды карбонданизация бойынша тәжірибелер жүргізілді. Процестің онтайлы жағдайлары соңғы өнімнің шығымы мен оның физика-химиялық қасиеттерін талдау негізінде анықталды. Гидрочар бетіндегі кеуектердің пайда болуы процестің ұзақтығына және температурасына байланысты. Биомасса жоғары температурада айтарлықтай ыдырайды, бұл биомассаның негізгі қабаттарының ашылуына әкеледі, нәтижесінде гидрочардың кеуектілігі жақсарады. Күріш қауызын гидротермалды карбонданизациялаудың онтайлы температурасы 800°C және 60 минут ұзақтығы болып табылады. Йод бойынша сіңіргіштік белсенділігі 800°C-та 63.37% құрады. Сканерлік электронды микроскоппен жүргізілген зерттеулер нәтижесінде алынған гидрочардың дамыған кеуекті құрылымға ие екендігі байқалды.

Түйін сөздер: гидротермалды карбонданизация, күріш қауызы, қалдықтарды өңдеу, сорбент, гидрочар.

Аппазов Нұрбол Орынбасарұлы	<i>Химия ғылымдарының кандидаты, профессор</i>
Ибрагим Айжан Ғаниқызы	<i>Магистрант</i>
Ниязова Динара Жұмабекқызы	<i>Докторант</i>
Еспанова Индира Дәуренқызы	<i>Докторант</i>
Тойбазарова Алтынкүл Бакытқызы	<i>Докторант</i>
Любчик Сергей	<i>PhD</i>
Тұрманов Рахымжан Ахметханұлы	<i>PhD</i>
Сыздықбаев Марат Ізімханұлы	<i>Химия ғылымдарының кандидаты</i>
Нарманова Роза Әбдібекқызы	<i>Техника ғылымдарының кандидаты, доцент</i>
Асқарова Гүлзат Шәкірбекқызы	<i>Техника ғылымдарының кандидаты</i>

References

1. A. Khosravi, H. Zheng, Q. Liu, M. Hashemi, Y. Tang, B. Xing, *Chemical Engineering Journal*, 430 (4), 133142, **2022**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133142>.
2. S. Masoumi, V.B Borugadda, S. Nanda, A.K.Dalai, *Catalysts*, **11** (8), 939, **2021**.
3. M. Kordi, N. Farrokhi, M.I. Pech-Canul, A. Ahmadikhah, *Rice Science*, 31 (1), 14, **2024**. DOI: [10.1016/j.rsci.2023.08.005](https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.08.005).

4. L. Ye, J. Zhang, G. Wang, Ch. Wang, X. Mao, X. Ning, N. Zhang, H. Teng, J. Li, Chuan W., *Energy*, 263 (D), 125903, **2023**. DOI: 10.1016/j.energy.
5. G. Battipaglia, F. Niccoli, J.P. Kabala, R. Marzaioli, T. Di Santo, S. Strumia, S. Castaldi, M. Petriccione, L. Zaccariello, D. Battaglia, M.L. Mastellone, E. Coppola, F.A. Rutigliano, *Forests*, 14(4), 658, **2023**. DOI: [10.3390/f14040658](https://doi.org/10.3390/f14040658)
6. W. Yanjiao, L. Wei, W. Qiong, L. Shouxin, *Progress in Chemistry*, 28(1), 121, **2016**.
7. M. Sharma, J. Singh, Ch. Baskar, A. Kumar, *BioTechnology*, 100 (2), 179, **2019** DOI: 10.5114/bta.2019.85323
8. Xuejiao Chen, Qimei Lin, Ruidong He, Xiaorong Zhao, Guitong Li, *Bioresource Technology*, 241, 236, 0960-8524, **2017**, DOI: [10.1016/j.biortech.2017.04.012](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.012).
9. Najam Ul Saqib, Minah Oh, Woori Jo, Seong-Kyu Park, Jai-Young Lee, *J Mater Cycles Waste Manag*, 19, 111–117, **2017**. DOI: [10.1007/s10163-015-0371-1](https://doi.org/10.1007/s10163-015-0371-1)
10. А. Е. Бураков, Т. С. Кузнецова, И. В. Буракова, О. А. Ананьева, Э. С. Мкртчян, Т.П.Дьячкова, А. Г.Ткачев, *Жидкие кристаллы и их практическое использование*, 23(3), 54, **2023**. DOI:10.18083/LCAppl.2023.3.54
11. C. Espro, A. Satira, F. Mauriello, Z. Anajafi, K. Moulalee, D. Iannazzo, G. Neri, *Sensors and Actuators: B. Chemical* 341, **2021** DOI: [1016/j.snb.2021.130016](https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130016)
12. J.T. Wang, Y. T. Wang, J. X. Wang, Guiyue Du, K. Y Khan, Yanxing Song, Cui Xiaoqiang, Cheng Zhanjun, Yan Beibei, Chen Guanyi, *CHEMOSPHERE*, 308 (3), 136389, **2022**, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136389
13. Feiyue Li, Andrew R. Zimmerman, Y. Zheng, Y. Yang, J. Huang, Y. Zhang, X. Hu, Z. Yu, J. Huang, B. Gao, *Science of The Total Environment*, 783, 146983 (2021), DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146983
14. K. Nadarajah, Erick R. Bandala, Z. Zhang, S. Mundree, A. Goonetilleke, *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101929, **2021**, DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.101929
15. H. H. Hammud, R. K. Karnati, M. Al Shafee, Y. Fawaz, H. Holail, *Chemical Engineering Communications*, 208(2), 197, **2019**. DOI: [10.1080/00986445.2019.1702975](https://doi.org/10.1080/00986445.2019.1702975)
16. Kim Anh Phan, Doungkamon Phihusut, Nattapong Tuntiwiwattanapun, *J. Environ. Chem. Eng.*, 10(3), 107575, 2213-3437, **2022**. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107575.