Статья поступила в редакцию: 04.10.2026
Статья принята к публикации: 20.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 633.18+664.7

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23586

Исследование эффективного использования вторичного сырья риса: термическое разложение и структурные превращения рисовых отрубей при пиролизе

Рахматов Фуркат Эшпулат угли
преподаватель
Янгиерский филиал Ташкентского химико-технологического института
Республика Узбекистан, г. Янгиер
E-mail: furqatraxmatov176@gmail.com
Махмудова Дилдора Хасановна
доц.
Ташкентского химико-технологического институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: dildoramahmudiva@gmail.com
Азаматов Умид Зокирович
преподаватель
Янгиерский филиал Ташкентского химико-технологического института
Республика Узбекистан, г. Янгиер
E-mail: umidazamatov03@gmail.com
Шохрух Бекмирзаев Икром угли
преподаватель
Янгиерский филиал Ташкентского химико-технологического института
Республика Узбекистан, г. Янгиер
E-mail: shohruxbekmirzayev16@gmail.com
Рустамову Ферузу Мирзаахмедовну
студент
Янгиерский филиал Ташкентского химико-технологического института
Республика Узбекистан, г. Янгиер
E-mail: feruzarustamova@gmail.com
Тошпулатова Дилором Фуркат кизи
студент
Янгиерский филиал Ташкентского химико-технологического института
Республика Узбекистан, г. Янгиер
E-mail: latovadilorom1912@gmaol.com
Ёрматова Саодат Нарзулло кизи
студент
Янгиерский филиал Ташкентского химико-технологического института
Республика Узбекистан, г. Янгиер
E-mail: yormatovasaodat53@gmail.com

Библиографическое описание: Исследование эффективного использования вторичного сырья риса: термическое разложение и структурные превращения рисовых отрубей при пиролизе // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Рахматов Ф.Э.У. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23586

Research on the effective use of secondary rice raw materials: thermal decomposition and structural transformations of rice bran during pyrolysis

Raxmatov Furkat Eshpulat ugli
teacher
Yangiyer Branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Yangiyer
Maxmudova Dildora Xasanovna
docent, Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Azamatov Umid Zokirovich
teacher
Yangiyer Branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Yangiyer
Bekmirzayev Shokhrux Ikrom ugli
teacher
Yangiyer Branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Yangiyer
Rustamova Feruza Mirzaakhmadovna
student, Yangiyer Branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Yangiyer
Toshpulatova Dilorom Furkat kizi
student, Yangiyer Branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Yangiyer
Yormatova Saodat Narzullo kizi
student, Yangiyer Branch of the Tashkent Institute of Chemical Technology
Republic of Uzbekistan, Yangiyer

Аннотация

Цель работы — изучение закономерностей термического разложения рисовых отрубей и структурно-химических превращений, происходящих при их пиролизе, для оценки пригодности этого вида вторичного сырья в качестве предшественника углеродных материалов. В качестве объекта исследования использовали рисовые отруби, полученные на рисоперерабатывающем предприятии Сырдарьинской области. Температурный режим пиролиза выбирали на основании результатов термогравиметрического анализа, выполненного в интервале 45–1000 °C. Пиролиз проводили в трубчатой печи в токе азота при 950 °C; для сравнения в тех же условиях получен образец при 650 °C. Полученные образцы биоугля обозначены как RB-650 и RB-950. Исходное сырьё и биоуголь охарактеризованы методом ИК-Фурье-спектроскопии. Установлено, что термическое разложение рисовых отрубей протекает в четыре стадии с суммарной потерей массы 86,09 %; нелетучий остаток при 1000 °C составляет 13,91 %. Основная потеря массы (58,75 %) приходится на интервал 230–600 °C и связана с разложением гемицеллюлозы и целлюлозы; максимум скорости потери массы наблюдается при 285 °C. Выше 600 °C масса образца изменяется незначительно (6,39 % в интервале 600–1000 °C), что и определило выбор температуры пиролиза. ИК-Фурье-спектры подтверждают дегидратацию и глубокую карбонизацию сырья: полосы групп O–H, $–CH_2–$, C=O и C–O исчезают либо их интенсивность резко снижается, а спектр биоугля становится практически бесструктурным. Сделан вывод, что рисовые отруби

являются доступным возобновляемым сырьём для получения высококарбонизированного биоугля. Химическая активация биоугля гидроксидом калия, определение удельной поверхности и оценка водородной ёмкости составляют предмет дальнейших исследований.

Abstract

The aim of this work is to study the thermal decomposition of rice bran and the structural and chemical transformations occurring during its pyrolysis, in order to assess the suitability of this secondary raw material as a precursor for carbon materials. Rice bran from a rice-processing plant in the Syrdarya region was used as the object of study. The pyrolysis temperature was selected on the basis of thermogravimetric analysis carried out over the range 45–1000 °C. Pyrolysis was performed in a tube furnace under a nitrogen flow at 950 °C; a reference sample was also prepared at 650 °C under the same conditions. The resulting biochars are designated RB-650 and RB-950. The raw material and the biochar were characterised by Fourier-transform infrared spectroscopy. The thermal decomposition of rice bran proceeds in four stages with a total mass loss of 86.09 %, the non-volatile residue at 1000 °C being 13.91 %. The main mass loss (58.75 %) occurs in the range 230–600 °C and is associated with the decomposition of hemicellulose and cellulose, the maximum rate of mass loss being observed at 285 °C. Above 600 °C the sample mass changes only slightly (6.39 % over 600–1000 °C), which determined the choice of the pyrolysis temperature. The FTIR spectra confirm dehydration and deep carbonisation: the bands of O–H, $–CH_2–$, C=O and C–O groups disappear or decrease sharply and the biochar spectrum becomes virtually featureless. Rice bran is therefore an accessible renewable feedstock for highly carbonised biochar. Chemical activation with potassium hydroxide, specific surface area determination and the assessment of hydrogen capacity are the subject of further research.

Ключевые слова: рисовые отруби, вторичное сырьё, пиролиз, биоуголь, термогравиметрический анализ, ИК-Фурье-спектроскопия, карбонизация.

Keywords: rice bran, secondary raw material, pyrolysis, biochar, thermogravimetric analysis, FTIR spectroscopy, carbonisation.

Введение

В настоящее время снижение зависимости от ископаемых видов топлива и сокращение вредных выбросов в окружающую среду являются одними из наиболее актуальных задач. В этой связи большой интерес вызывает водород — экологически чистый энергоноситель, обладающий высокой гравиметрической плотностью энергии и образующий при сгорании только воду. Однако безопасное, эффективное и компактное хранение водорода остаётся основной проблемой, сдерживающей его широкое применение [14].

Среди способов хранения водорода особое значение имеет физическая адсорбция на пористых материалах как быстрый, обратимый и безопасный процесс [14]. Активированные углеродные материалы благодаря высокой удельной поверхности, развитой микропористой структуре, химической стабильности и низкой стоимости рассматриваются как перспективные адсорбенты водорода [2, 7]. В последние годы значительное внимание уделяется получению таких материалов из отходов растительного происхождения. Так, активированный углерод, полученный из ветвей зизифуса и дополнительно легированный

кислородом и азотом, обеспечивает поглощение водорода 2,62 мас. % при –196 °C и 0,1 МПа [1]; нанопористые углеродные материалы из кофейных отходов также проявляют заметную водородную ёмкость при 77 K [12]; для активированного углерода, полученного из биомассы папоротника Polypodium vulgare, достигнуто 2,73 мас. % при 25 °C и 4,5 МПа [11]. Углеродные материалы из стеблей кенафа, в свою очередь, демонстрируют высокие электрохимические характеристики в составе суперконденсаторов [13]. Приведённые данные свидетельствуют о широких возможностях использования растительных отходов в качестве предшественников функциональных углеродных материалов.

Одним из наиболее эффективных способов получения активированного углерода является химическая активация гидроксидом калия: KOH формирует в углеродном каркасе большое количество пор, что резко увеличивает удельную поверхность материала [6, 4]. При этом свойства получаемого материала во многом зависят от состава сырья и температуры предварительного пиролиза. Входящие в состав биомассы гемицеллюлоза, целлюлоза и лигнин разлагаются в разных температурных интервалах [3], поэтому режим пиролиза целесообразно выбирать на основании результатов термогравиметрического анализа [8, 10].

Рисовые отруби представляют собой мелкодисперсный побочный продукт рисоперерабатывающей промышленности, образующийся при шлифовании и полировании зерна после удаления наружной оболочки (рисовой шелухи). По химическому и минеральному составу отруби существенно отличаются от шелухи, которая отделяется на начальном этапе переработки зерна. Рисовые отруби образуются в значительных количествах, однако используются недостаточно полно, поэтому их превращение в углеродный материал с высокой добавленной стоимостью способствует решению как задачи утилизации отходов, так и задач энергетики.

Целью настоящей работы является изучение закономерностей термического разложения рисовых отрубей, обоснование температурного режима их пиролиза и исследование структурно-химических превращений сырья при пиролизе для оценки его пригодности в качестве предшественника углеродных материалов. Химическая активация полученного биоугля гидроксидом калия и оценка водородной ёмкости активированных образцов составляют содержание следующего этапа работы.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использовали рисовые отруби, полученные на рисоперерабатывающем предприятии Сырдарьинской области (Республика Узбекистан). Сырьё представляло собой мелкодисперсный побочный продукт шлифования и полирования зерна риса. Для удаления пыли рисовые отруби промывали дистиллированной водой и с целью удаления избыточной влаги сушили в сушильном шкафу при температуре 80 °C в течение 12 ч. Высушенное сырьё измельчали и просеивали через сито с размером ячеек 1000 мкм; в дальнейших экспериментах использовали фракцию с размером частиц менее 1000 мкм.

Пиролиз проводили в трубчатой печи в токе азота (50 мл/мин). Образец нагревали со скоростью 10 °C/мин до 950 °C, выдерживали при этой температуре в течение 12 ч и затем охлаждали до комнатной температуры со скоростью 10 °C/мин. В тех же условиях для сравнения был получен образец при 650 °C. Полученные образцы биоугля обозначены как

RB-650 и RB-950; основным объектом дальнейшего исследования служил образец RB-950. Температуру пиролиза выбирали на основании результатов термогравиметрического анализа исходного сырья [8, 10] по следующему критерию: конечная температура пиролиза должна превышать температуру завершения основных стадий потери массы, что обеспечивает полное удаление летучих компонентов и формирование углеродного каркаса.

Особенности термического разложения рисовых отрубей изучали методом термогравиметрического анализа на приборе TGA Q5000 (TA Instruments, США) в интервале температур 45–1000 °C при скорости нагрева 10 °C/мин в токе азота (10 мл/мин). Измерения выполняли в открытом платиновом тигле; масса навески составляла около 4,8 мг. По кривым ТГ и ДТГ определяли температурные интервалы стадий разложения, потерю массы на каждой стадии, температуры максимумов скорости потери массы и нелетучий остаток при 1000 °C.

Функциональные группы на поверхности исходного сырья и биоугля определяли методом ИК-Фурье-спектроскопии на спектрометре Nicolet iS10 (Thermo Fisher Scientific, США), оснащённом приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) Smart iTR с алмазным кристаллом. Спектры регистрировали в диапазоне 4000–600 $см^{-1}$ с разрешением 4 $см^{-1}$ при накоплении 32 сканов. Отнесение полос поглощения выполняли в соответствии с литературными данными для биоугля, полученного из рисовых отрубей [5].

Все измерения выполняли в трёхкратной повторности на представительных пробах усреднённых образцов; в работе приведены типичные кривые ТГ и ДТГ, а также типичные ИК-Фурье-спектры исходного сырья и полученного биоугля.

Результаты и обсуждение

Кривые ТГ и ДТГ исходных рисовых отрубей представлены на рис. 1, численные результаты термогравиметрического анализа приведены в табл. 1. Потеря массы протекает в четыре стадии. Первая стадия (45–130 °C) связана с удалением влаги и составляет 6,74 % от общей массы; максимум скорости потери массы наблюдается при 55 °C. На второй стадии (130–230 °C) теряется 14,21 % массы с максимумом скорости потери массы при 200 °C, что обусловлено удалением структурной воды и началом разложения наименее термостабильных компонентов биомассы — гемицеллюлозы и лигнина. Согласно литературным данным, лигнин представляет собой биополимер с развитой сеткой ароматических колец, связанных различными типами химических связей, вследствие чего его разложение начинается уже около 100 °C, протекает медленно и продолжается вплоть до 900 °C [3]. Третья стадия (230–600 °C) является основной: в результате разложения гемицеллюлозы и целлюлозы теряется 58,75 % массы, а максимум скорости потери массы наблюдается при 285 °C. Согласно литературным данным, гемицеллюлоза разлагается преимущественно в интервале 220–315 °C, а целлюлоза — в интервале 315–400 °C с образованием неконденсируемых газов и конденсируемых органических паров [3]. Четвёртая стадия (600–1000 °C) составляет 6,39 % и связана с продолжающимся удалением углеродсодержащих компонентов и дальнейшим разложением лигнина. Суммарная потеря массы достигает 86,09 %, а нелетучий остаток при 1000 °C составляет 13,91 %, что обусловлено образовавшимся углеродным каркасом и минеральной (зольной) составляющей сырья. Суммарная потеря

массы, определённая непосредственно по ТГ-кривой во всём интервале 45–1000 °C, составляет 85,89 % (4,129 мг); расхождение в 0,2 % связано с выбором границ отдельных стадий.

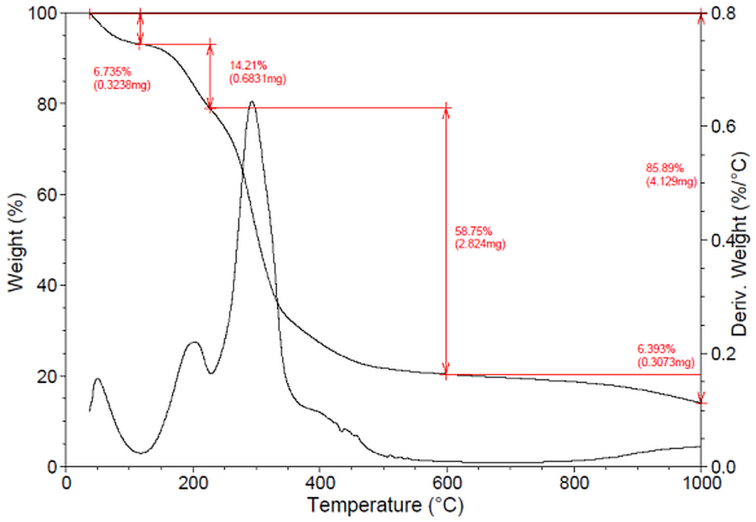

Рисунок 1. Кривые ТГ и ДТГ рисовых отрубей в интервале температур 45–1000 °C

Таблица 1. Результаты термогравиметрического анализа рисовых отрубей

№	Температурный интервал, °C	Потеря, %	Потеря, мг	Итого, %	Пик ДТГ, °C
1	45–130	6,74	0,324	6,74	55
2	130–230	14,21	0,683	20,95	200
3	230–600	58,75	2,824	79,70	285
4	600–1000	6,39	0,307	86,09	–
	Остаток при 1000 °C	13,91	0,669	–	–

Таким образом, выше 600 °C скорость потери массы становится незначительной: в интервале 600–1000 °C теряется лишь 6,39 % массы, то есть основные процессы термического разложения к этой температуре завершаются. В соответствии с принятым критерием в качестве температур пиролиза были выбраны 650 °C (температура достижения практически постоянной массы) и 950 °C (максимальная температура обработки): при этих температурах от исходного материала остаётся преимущественно углеродный каркас биоугля и минеральная (зольная) часть.

Функциональные группы на поверхности исходного сырья и биоугля определяли методом ИК-Фурье-спектроскопии. FTIR-спектры образцов до и после пиролиза представлены на рис. 2, а отнесение характеристических полос поглощения исходных рисовых отрубей приведено в табл. 2. Спектры образцов RB-650 и RB-950 существенно упрощены по сравнению со спектром исходного сырья и практически лишены выраженных полос поглощения, что связано с исчезновением большинства кислородсодержащих функциональных групп в результате карбонизации. Широкая полоса с минимумом около 3260 $см^{-1}$, относящаяся к валентным колебаниям O–H целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина и адсорбированной воды, после пиролиза практически исчезает.

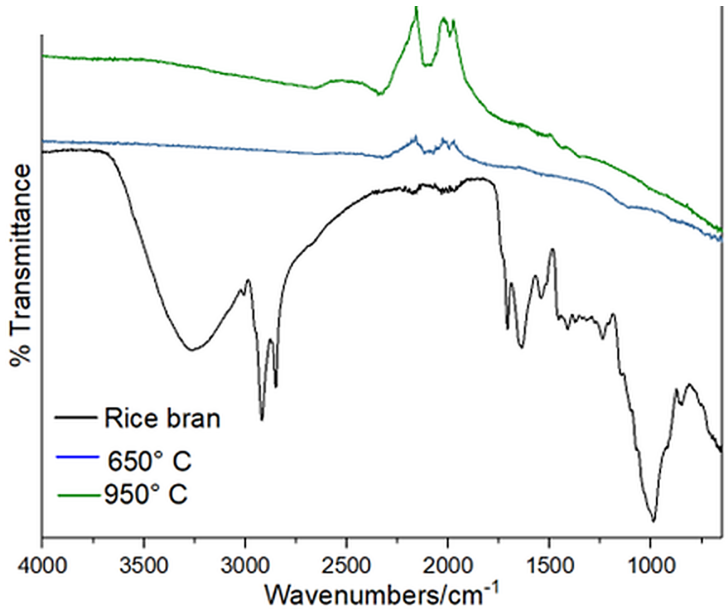

Рисунок 2. FTIR-спектры исходных рисовых отрубей и биоугля, полученного при 650 и 950 °C

Таблица 2. Отнесение полос поглощения в FTIR-спектре рисовых отрубей

№	Область	Волновое число, см⁻¹	Тип колебаний и отнесение
1	Одинарные связи (4000–2500)	~3260	валентные колебания O–H (целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин, адсорбированная вода)
2	Одинарные связи (4000–2500)	~2920 и ~2850	асимметричные и симметричные валентные колебания алифатических групп $–CH_2–$, $–CH_3$ (липидная фракция отрубей, целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин)
3	Тройные связи (2500–2000)	~2350–2000	область C≡C, C≡N; как правило, поглощение CO_2 и кристалла НПВО
4	Двойные связи (2000–1500)	~1745	валентные колебания C=O сложноэфирных групп (триглицериды рисового масла, ацетильные группы гемицеллюлозы)
5	Двойные связи (2000–1500)	~1650–1600	C=O / ароматические C=C, адсорбированная вода
6	«Отпечатки пальцев» (1500–500)	~1500–1400	валентные колебания C–C ароматических структур лигнина
7	«Отпечатки пальцев» (1500–500)	~1450–1240	валентные колебания C–O сложноэфирных и карбоксильных групп лигнина
8	«Отпечатки пальцев» (1500–500)	~990	валентные колебания C–O–C и C–O микрокристаллической целлюлозы
9	«Отпечатки пальцев» (1500–500)	~850	колебания Si–O–Si (минеральная составляющая отрубей)

Полученные результаты свидетельствуют о дегидратации биомассы. Интенсивные полосы при 2920 и 2850 $см^{-1}$, относящиеся к асимметричным и симметричным валентным колебаниям алифатических групп $–CH_2–$ и $–CH_3$ и обусловленные прежде всего липидной фракцией отрубей, после пиролиза полностью исчезают. Исчезает также полоса около 1745 $см^{-1}$, характерная для валентных колебаний C=O сложноэфирных групп (триглицериды рисового масла, ацетильные группы гемицеллюлозы). В области 2350–2000 $см^{-1}$ наблюдаются слабые полосы, относящиеся к группам C≡C и C≡N; в этой же области проявляется

поглощение диоксида углерода и кристалла НПВО, вследствие чего соответствующие сигналы присутствуют во всех спектрах. Полосы в области 1650–1600 $см^{-1}$, относящиеся к колебаниям C=O и ароматических связей C=C, а также полосы в области 1500–1400 $см^{-1}$, обусловленные колебаниями C–C ароматических структур лигнина, после пиролиза исчезают. Полосы сложноэфирных и карбоксильных групп лигнина в области 1450–1240 $см^{-1}$ сглаживаются, а интенсивная полоса около 990 $см^{-1}$, характерная для валентных колебаний C–O–C и C–O микрокристаллической целлюлозы, практически исчезает. Слабая полоса около 850 $см^{-1}$, обусловленная колебаниями Si–O–Si, отражает присутствие минеральной составляющей отрубей; её невысокая интенсивность согласуется с тем, что минеральная часть рисовых отрубей, в отличие от рисовой шелухи, представлена преимущественно соединениями фосфора, калия и магния при относительно низком содержании кремнезёма, и соответствует меньшей величине нелетучего остатка (13,91 %). Спектры образцов RB-650 и RB-950 близки между собой, что свидетельствует о завершении основных процессов карбонизации уже при 650 °C.

Совокупность полученных данных показывает, что при 950 °C из рисовых отрубей формируется глубоко карбонизированный материал, который может быть использован в качестве предшественника при получении активированного углерода. Химическая активация биоугля RB-950 гидроксидом калия при массовых соотношениях KOH: биоуголь 2:1 и 6:1 [6, 4], определение удельной поверхности, объёма и распределения пор по изотермам адсорбции азота с соблюдением современных требований к воспроизводимости расчётов по методу BET [9], а также измерение изотерм «давление – состав – температура» и водородной ёмкости при 77 K [2, 7] составляют предмет следующего этапа исследований.

Заключение

В данной работе из рисовых отрубей, полученных на рисоперерабатывающем предприятии Сырдарьинской области, методом пиролиза при 950 °C получен биоуголь, структура и состав которого изучены методами термогравиметрического анализа (ТГА) и ИК-Фурье-спектроскопии.

Термогравиметрический анализ показал, что термическое разложение рисовых отрубей протекает в четыре стадии. На первой стадии (45–130 °C) удаляется влага (6,74 %). На второй стадии (130–230 °C) происходит удаление структурной воды и начинается разложение наименее термостабильных компонентов биомассы (14,21 %). На третьей стадии (230–600 °C) разлагаются гемицеллюлоза и целлюлоза (58,75 %). На четвёртой стадии (600–1000 °C) удаляются оставшиеся углеродсодержащие компоненты (6,39 %). Суммарная потеря массы составила 86,09 %, нелетучий остаток при 1000 °C — 13,91 %. Поскольку выше 600 °C основные процессы разложения завершаются, для пиролиза были выбраны температуры 650 и 950 °C, гарантирующие полное удаление летучих компонентов.

По данным ИК-Фурье-спектроскопии в процессе пиролиза полосы, характерные для групп O–H, $–CH_2–$, C=O и C–O, исчезают либо их интенсивность резко снижается, а спектр биоугля становится практически бесструктурным, что подтверждает дегидратацию

и глубокую карбонизацию биомассы. Сохранение слабой полосы Si–O–Si указывает на присутствие минеральной составляющей сырья и согласуется с величиной нелетучего остатка.

Полученные результаты показывают, что рисовые отруби являются доступным и перспективным сырьём для получения высококарбонизированного биоугля. Химическая активация полученного биоугля гидроксидом калия, определение его текстурных характеристик (удельной поверхности, объёма и распределения пор) и оценка водородной ёмкости при 77 K будут представлены в последующих публикациях.

Список литературы

1. Anuchitsakol S., Dilokekunakul W., Khongtor N., Chaemchuen S., Klomkliang N. Combined experimental and simulation study on H2 storage in oxygen and nitrogen co-doped activated carbon derived from biomass waste: superior pore size and surface chemistry development // RSC Advances. – 2023. – T. 13, № 51. – P. 36009–36022.
2. Blankenship L.S., Mokaya R. Modulating the porosity of carbons for improved adsorption of hydrogen, carbon dioxide, and methane: a review // Materials Advances. – 1930. – T. 3, № 4. – P. 1905–1930.
3. Chen D., Cen K., Zhuang X. et al. Insight into biomass pyrolysis mechanism based on cellulose, hemicellulose, and lignin: Evolution of volatiles and kinetics, elucidation of reaction pathways, and characterization of gas, biochar and bio-oil // Combustion and Flame. – 2022. – T. 242. – Art. 112142.
4. Illingworth J.M., Rand B., Williams P.T. Understanding the mechanism of two-step, pyrolysis-alkali chemical activation of fibrous biomass for the production of activated carbon fibre matting // Fuel Processing Technology. – 2022. – T. 235. – Art. 107348.
5. Kim D.-Y., Jung G.-B. Effects of Pyrolysis and Ball-Milling on the Physicochemical and Rhodamine B Removal Characteristics of Rice-Bran-Derived Biochar // Applied Sciences. – 2023. – T. 13, № 7. – Art. 4288.
6. Li C., Li Y., Shao Y. et al. Activation of biomass with volatilized KOH // Green Chemistry. – 2023. – T. 25, № 7. – P. 2825–2839.
7. Mahmoud L.A.M., Rowlandson J.L., Fermin D.J., Ting V.P., Nayak S. Porous carbons: a class of nanomaterials for efficient adsorption-based hydrogen storage // RSC Applied Interfaces. – 2025. – T. 2, № 1. – P. 25–55.
8. Mishra R.K., Naik S.U., Chistie S.M., Kumar V., Narula A. Pyrolysis of agricultural waste in a thermogravimetric analyzer: Studies of physicochemical properties, kinetics behaviour, and gas compositions // Materials Science for Energy Technologies. – 2022. – T. 5. – P. 399–410.
9. Osterrieth J.W.M., Rampersad J., Madden D. et al. How Reproducible are Surface Areas Calculated from the BET Equation? // Advanced Materials. – 2022. – T. 34, № 27. – Art. 2201502.
10. Safarian S. Performance analysis of sustainable technologies for biochar production: A comprehensive review // Energy Reports. – 2023. – T. 9. – P. 4574–4593.

11. Serafin J., Dziejarski B., Solis C. Ramírez de la Piscina P., Homs N. Medium-pressure hydrogen storage on activated carbon derived from biomass conversion // Fuel. – 2024. – T. 363. – Art. 130975.
12. Stock S., Kostoglou N., Selinger J. et al. Coffee Waste-Derived Nanoporous Carbons for Hydrogen Storage // ACS Applied Energy Materials. – 2022. – T. 5, № 9. – P. 10915–10926.
13. Subramaniam T., Ansari M.N.M., Krishnan S.G., Khalid M. Kenaf-based activated carbon: A sustainable solution for high-performance aqueous symmetric supercapacitors // Chemosphere. – 2024. – T. 354. – Art. 141593.
14. Usman M.R. Hydrogen storage methods: Review and current status // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – T. 167. – Art. 112743.