

Переработка отходов скорлупы фундука методом быстрого абляционного пиролиза

А.И. Валиуллина^a, А.Р. Валеева^b, С.А. Забелкин^c, А.Н. Грачев^d,
Г.М. Бикбулатова^e, Р.М. Хазиахмедова^f

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
ул. Карла Маркса, 68, Казань, Республика Татарстан, Россия

^a almi.sabirzyanova@yandex.ru, ^b samirhanova@rambler.ru, ^c szabelkin@gmail.com, ^d energolesprom@gmail.com,
^e gm.bikbulatova@yandex.ru, ^f rimmo4ka_0694@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-0909-9126>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-8656-7643>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-1349-6669>

^d <https://orcid.org/0000-0003-1076-6889>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-1076-6889>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-9278-816X>

Статья поступила 15.04.22, принята 16.09.2022

Переработка отходов с получением полезных продуктов для вторичного их использования играет важную роль в современном промышленном и экологическом мире. Различные методы переработки отходов позволяют получить разного рода материалы. В данной статье описан метод быстрого абляционного пиролиза, применяемый для переработки агропромышленных отходов, в частности, скорлупы ореха фундука. При данном методе переработки получают уголь, жидкость и газ. Пиролизная жидкость была изучена на предмет химического состава методом ГХМС, отделена легколетучая фракция методом вакуумной отгонки. Конденсат, полученный после упаривания пиролизной жидкости скорлупы фундука, имеет до 27 % фенолов, до 21 % фурфурола и 13 % кислоты, которая представлена муравьиной, пропионовой и фенантренкарбоновой кислотами. Пиролизная жидкость после упаривания в своем составе имеет до 34,5 % фенолов. Углеводная часть пиролизной жидкости представлена такими соединениями, как 1,6-ангидро-бета-D-глюкопираноза (7,25 %) и 3,4-Ангидро-d-галактоза (0,67 %). Также у пиролизной жидкости после упаривания были измерены физические свойства. Теплота сгорания пиролизной жидкости после упаривания равна 18 424 Дж/г и преобладает над теплотворной способностью древесины березы (10 883 Дж/г) и бурого угля (14 700 Дж/г).

Ключевые слова: абляционный пиролиз; пиролизная жидкость; скорлупа фундука; ГХМС; переработка растительных отходов; биотопливо.

Processing of hazelnut shell waste by rapid ablative pyrolysis

A.I. Valiullina^a, A.R. Valeeva^b, S.A. Zabelkin^c, A.N. Grachev^d,
G.M. Bikbulatova^e, R.M. Khaziakhmetova^f

Kazan National Research Technological University; 68, K. Marx St., Kazan, Republic of Tatarstan

^a almi.sabirzyanova@yandex.ru, ^b samirhanova@rambler.ru, ^c szabelkin@gmail.com, ^d energolesprom@gmail.com,
^e gm.bikbulatova@yandex.ru, ^f rimmo4ka_0694@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-0909-9126>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-8656-7643>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-1349-6669>

^d <https://orcid.org/0000-0003-1076-6889>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-1076-6889>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-9278-816X>

Received 15.04.22, accepted 16.09.2022

Recycling of waste to produce useful products for their secondary use plays an important role in the modern industrial and ecological world. Various methods of waste processing makes it possible to get different kinds of materials. Recycling to produce useful products for recycling plays an important role in the modern industrial and ecological world. Various waste processing methods make it possible to obtain various kinds of materials. This article describes the method of rapid ablative pyrolysis used to process agro-industrial waste, in particular hazelnut shells. In this processing method, coal, liquid and gas are obtained. The pyrolysis liquid is studied for chemical composition by the HCMS method, and the volatile fraction is separated by vacuum distillation. The condensate obtained after evaporation of the pyrolysis liquid of the hazelnut shell has up to 27% phenols, up to 21% furfural and 13% acid, which is represented by formic, propionic and phenanthrenecarboxylic acids. Pyrolysis liquid after evaporation has up to 34.5% phenols in its composition. The carbohydrate part of the pyrolysis liquid is represented by such compounds as 1,6-anhydro-beta-D-glucopyranose (7.25%) and 3,4-Anhydro-d-galactose (0.67%). Also, the physical properties of the pyrolysis liquid were measured after evaporation. The heat of combustion of the pyrolysis liquid after evaporation is equal to 18424 J/g and prevails over the calorific value of birch wood (10883 J/g) and brown coal (14700 J/g).

Keywords: ablative pyrolysis, pyrolysis liquid, hazelnut shell, processing of plant waste, biofuels.

Введение. Зеленая химия, возобновляемая энергия и управление отходами в последнее время стали повторяющимся трифактором в авангарде инновационных исследований. В связи с этим все большее внимание уделяется производным побочных продуктов, или отходов, полученным по экологически безопасным протоколам, предназначенным для использования в различных областях, таких как возобновляемые источники энергии, поскольку они не только представляют собой альтернативный источник химических веществ, но и обеспечивают альтернативный подход к утилизации отходов [1; 2]

Лещина, или лесной орех *Corylus avellana L.* и его культурная форма — фундук имеют круглую, коническую или продолговатую форму плодов. Скорлупа с ровной поверхностью, цвет ее от светло- до темно-коричневого, само ядро плотное, белое, покрыто коричневой оболочкой. Выход скорлупы при выделении ядра из фундука составляет в среднем 54,8 %. [3]. Такой значительный выход скорлупы этих видов орехов приводит к образованию отходов, и возникает необходимость их использования в качестве вторичного сырья. Состав скорлупы фундука типичен для лигноцеллюлозной биомассы и может быть исходным материалом для получения биохимических веществ и биотоплива на основе углеводов и лигнина.

Работы в данной области актуальны, к примеру, скорлупа фундука успешно используется для производства топливных брикетов или гранул [4], также скорлупу используют в качестве дренажного материала, вместо керамзита. Скорлупа фундука ввиду своих свойств к долговременному разложению используется при мульчировании в садоводстве для декорирования клумб и цветников и одновременно для защиты почвы от выветривания, пересыхания и потери влаги.

Группа ученых из Испании J.F.Balart и др. добавляют муку из скорлупы лесного ореха (HSF) в композиты с полимолочной кислотой (PLA) для обеспечения пластифицирующего эффекта и улучшения свойств низкой внутренней пластичности композитов PLA/HSF [5]. M. Gürgü и соавторы используют скорлупу лесного ореха при изготовлении карбамидоформальдегидной стружечной плиты. Были исследованы такие параметры, как количество летучей золы, количество фенолформальдегида и влияние этих параметров на напряжение изгиба, предельный кислородный индекс, водопоглощающую способность и набухание в толщину [6]. В рамках научного исследования была проведена физическая модификация фольги из отходов полиэтилена высокой плотности с использованием муки фундука тонкого помола с получением композита [7].

Ученые из Польши Tomasz Hebda и др. исследовали свойства скорлупы фундука с точки зрения ее пригодности для производства биотоплива. Проведенные ими исследование и анализ выбранных физико-химических свойств показали, что скорлупа фундука пригодна для производства биотоплива [8]. Автор статьи [9] Ayhan Demirbaş изучал свойства древесного угля из скорлупы фундука, а также описал использование данного угля в производстве брикетов с использованием пиролитического масла. Уголь был получен в процессе пиролиза при различных температурах [9]. Также в другой рабо-

те [10] у того же автора было изучено влияние основных параметров реакции, таких как температура, размер частиц, катализатор и скорость нагревания, на выходы продуктов при пиролизе скорлупы фундука. Также в данной работе приведены кинетические параметры энергии активации, константа скорости пиролиза и порядок реакции [10].

В Гиресунском университете было исследовано потенциальное использование отходов завода по переработке фундука, скорлупы и кожицы фундука, для одновременного удаления Al, Cr, Cu, Cd, Pb, As и Fe из воды. Результаты показали, что поверхность обоих сорбентов шероховатая, содержит поры, позволяющие улавливать тяжелые металлы и функциональные группы, такие как карбоновая кислота, фенольные соединения и т. д., к которым могут присоединяться ионы тяжелых металлов [11].

В данной работе рассматривается переработка отходов скорлупы орехов методом быстрого абляционного пиролиза. При абляционном пиролизе пиролизуемое сырье претерпевает реакции плавления и/или сублимации, поскольку оно непосредственно контактирует с горячей твердой поверхностью. На поверхности сырья наблюдается резкий температурный градиент, приводящий к образованию тонкого поверхностного слоя реагирующего твердого вещества. Следовательно, реакционный процесс в абляционном реакторе происходит только в поверхностном слое, а не во всей частице биомассы, и скорость реакции не ограничивается теплопередачей через всю частицу.

Абляционный пиролиз позволяет при быстром нагреве (до 550 °C) и недостатке кислорода разложить пиролизуемое сырье на три продукта: уголь, газ и жидкость (пиролизная жидкость) [12].

Была проведена исследовательская работа по изучению химического состава, а также физических свойств жидкого продукта пиролиза, полученного при переработке скорлупы фундука методом быстрого абляционного пиролиза.

Методы и материалы. Для проведения исследования в качестве сырья были приобретены скорлупа фундука, полученная при очистке ореха на производстве. Внешний вид сырья представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид скорлупы фундука, используемого в качестве сырья для пиролиза

Пиролизная жидкость была получена на установке быстрого абляционного пиролиза FPP02 [13; 14] при температуре 500-550 °C.

Были измерены физические показатели пиролизной жидкости. Влажность определялась на волнометрическом титраторе методом Карла Фишера «V20» в со-

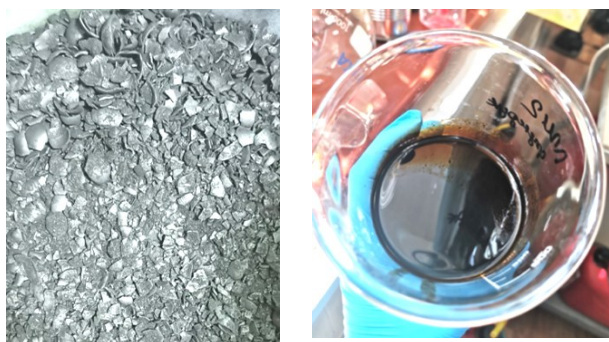
ответствии с ASTM E 203-16. Водородный показатель определялся при температуре $25 \pm 0,5$ °C рН-метром «рН-150 МИ». Вязкость определялась при температуре $25 \pm 0,5$ °C при помощи вискозиметра ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм. Теплота сгорания — с помощью бомбового калориметра ИКА серии 5000. Для определения плотности использовался набор ареометров АОН-1 (700-1840). Для проведения процесса вакуумной перегонки использовался ротационный испаритель марки ИКА модель RV 8, с подведенным вакуумным струйным насосом. Условия процесса: температура 80 °C, давление 0,02–0,03 Мпа.

Химический состав образцов определяли на приборе GCMS-QP2010 (компания «Shimadzu») на колонне HP-5MS (длина 30 м, диаметр 0,320 мм, толщина пленки 0,25 мкм), используя следующие параметры: в качестве газа-носителя — гелий марки А, температура инжектора 300 °C, расход 1 мл/мин через колонку, режим с разделением потока, разделение в соотношении 1:50, продувка 3 мл/мин, температурная программа термостата — 80 °C в течение 2 мин, градиент увеличивают до 200 °C со скоростью 10 °C/мин, затем выдерживают при 200 °C в течение 6 мин. Параметры масс-спектрометра составляли: температура источника ионов 270 °C, режим сканирования, диапазон регистрируемых ионов 35–600 м/с, время удержания растворителя 2 мин. Образцы были взяты с помощью прецизионного шприца Gilson в количестве 1 мл.

Результаты. В ходе реакции пиролиза скорлупы фундука были получены уголь, пиролизная жидкость и газ.

Твердый продукт пиролиза скорлупы фундука имеет черный цвет, сохраняя форму скорлупы.

Пиролизная жидкость имеет темный цвет, однородная, непрозрачная, с характерным запахом копчения. Однако следует отметить, что запах копчености присутствует меньше, чем в пиролизной жидкости древесины. Внешний вид образцов продуктов пиролиза представлен на фото (рис. 2).



Уголь

Пиролизная жидкость

Рис. 2. Внешний вид продуктов пиролиза скорлупы фундука

Далее методом вакуумной отгонки из пиролизной жидкости были отделены легколетучие компоненты и вода.

Упаренный конденсат представляет собой жидкость светло-желтого цвета, однородная, прозрачная, с ха-

рактерным запахом уксуса и фурфурола. Внешний вид упаренного конденсата представлен на фото (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид конденсата, упаренного из пиролизной жидкости скорлупы фундука

Был определен химический состав остатка пиролизной жидкости после упаривания и конденсата. Результаты анализа ГХМС образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Состав фракций после упаривания пиролизной жидкости

Состав остатка пиролизной жидкости после упаривания, %		Состав конденсата упаренной жидкости, %	
Кислоты	13,04	Кислоты	13,27
Кетоны	6,76	Фурфурол	21,37
Алкены	2,06	Фенол	26,86
Фенолы	34,53		
Альдегиды	1,4		
Сахара	7,92		

Конденсат, полученный после упаривания пиролизной жидкости скорлупы фундука, имеет до 27 % фенолов, которые представлены такими соединениями как 2-метокси-фенол, 2,6-диметил-фенол, 2-метокси-3-метил-фенол, 2-метокси-4-метил-фенол, 4-этил-2-метокси-фенол. Также конденсат богат фурфуролом, его содержание составляет до 21 %. Содержание кислоты, которая представлена муравьиной, пропионовой и фенантренкарбоновой кислотами, составляет 13 %. Для сравнения, конденсат из пиролизной жидкости древесины в своем составе имеет уксусную кислоту до 58 %, а фурфурола всего 10 %. Также имеются фенольные соединения, представленные такими соединениями, как (2-метоксифенол) и 2-метокси-4-метилфенол с содержанием 5,94 и 4,75 % соответственно.

Пиролизная жидкость после упаривания в своем составе имеет до 34,5 % фенолов, из которых 12,6 % представлены 1,2-бенздиолом, 5,25 % составляет содержание 4-метил-1,2-бенздиола, 2,30 % 2-метокси-фенола, 1,83 % 3-метил-фенола и др. Содержание чистого фенола составляет 1,34 %.

Сахара, которые содержатся в пиролизной жидкости, представлены такими соединениями, как 1,6-ангидро-бета-D-глюкопираноза (7,25 %) и 3,4-Ангидрод-галактоза (0,67 %).

Также у пиролизной жидкости после упаривания были измерены физические свойства, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2. Физические свойства пиролизной жидкости после упаривания

Физический показатель	Значение
Плотность, кг/м ³	1 219
Вязкость, сек	22
pH	3,32
Теплота сгорания, Дж/г	18 424
Влажность, %	17,6

По теплоте сгорания пиролизная жидкость после упаривания преобладает над теплотворной способностью древесины березы (10 883 Дж/г) и бурого угля (14 700 Дж/г).

Выводы. Полученные данные по проведенному исследованию позволяют сделать вывод, что данный вид переработки обеспечивает получение готового товарного продукта в виде угля. Уголь имеет топливную способность, а также может рассматриваться как биоудобрение в сельском хозяйстве.

Теплота сгорания жидкого продукта пиролиза скорлупы фундука, имеет значение, равное 18 424 Дж/г, что выше, чем у древесины березы и бурого угля. Исходя

Литература

- Mubofu Egid B. From cashew nut shell wastes to high value chemicals // Pure and Applied Chemistry. 2016. № 1-2. V. 88. P. 17-27. URL: <https://doi.org/10.1515/pac-2015-0603> (дата обращения: 16.09.2022).
- Хазиахмедова Р.М., Грачев А.Н., Башкиров В.Н. Взаимодействие адгезива с поверхностью субстрата в композиционных материалах на основе лигноцеллюлозного сырья // Промышленное производство и использование эластомеров. 2021. № 3. С. 58-62.
- Суббота Е.Ю., Ерина Е.М., Прокопец А.С. Безотходная переработка орехов // Молодая наука - 2013: материалы IV Открытой междунар. молодежной науч.-практической конф. (Туапсе, 16 апр. 2013 г.). Краснодар: «Издательский Дом - Юг», 2014. С. 254-255.
- Грузинская компания начала производить брикеты угля из фундучной скорлупы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.trend.az/business/energy/3153006.html> (дата обращения: 7.04.2022).
- Balart J.F., Fombuena V., Fenollar O., Boronat T., Sánchez-Nacher L. Processing and characterization of high environmental efficiency composites based on PLA and hazelnut shell flour (HSF) with biobased plasticizers derived from epoxidized linseed oil (ELO) // Composites Part B: Engineering. 2016. V. 86. P. 168-177. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.063> (дата обращения: 16.09.2022).
- Gürü M., Aruntaş Y., Tüzün F.N., Bilici İ. Processing of urea-formaldehyde-based particleboard from hazelnut shell and improvement of its fire and water resistance // Fire and Materials homepage. 2009. № 8. V. 33. P. 413-419. URL: <https://doi.org/10.1002/fam.1011> (дата обращения: 16.09.2022).
- Salasinska K., Ryszkowska J. Natural fibre composites from polyethylene waste and hazelnut shell: dimensional stability, physical, mechanical and thermal properties // Composite Interfaces. 2012. V. 19:5. P. 321-332.
- Hebda Tomasz, Brzychczyk Beata, Francik Slawomir, Pedryc Norbert. Evaluation of suitability of hazelnut shell energy for production of biofuels // Engineering for rural development. 2018. P. 1860-1865.

из этого, можно сделать вывод, что пиролизная жидкость, полученная при переработке скорлупы фундука, может служить альтернативным источником топлива.

Жидкий продукт также имеет в своем составе до 34 % соединений фенола, который является ценным химическим сырьем. Подобные фенольные соединения растительного, природного происхождения пользуются высоким интересом в научной среде для замены синтетического фенола в промышленности [15–17].

Конденсат, который можно получить при упаривании пиролизной жидкости, имеет в своем составе до 21 % фурфурола, который, в свою очередь, представляет ценность в качестве химического сырья. Также конденсат, богатый фенольными соединениями, может рассматриваться как биостимулятор для растений.

Сельскохозяйственные отходы и побочные продукты являются дешевым, доступным и возобновляемым сырьем, которое может служить источником ценных компонентов.

Таким образом, переработка скорлупы фундука методом быстрого абляционного пиролиза имеет высокий потенциал и перспективу к реализации в борьбе с отходами в рамках природопользования.

- Ayhan Demirbaş. Properties of charcoal derived from hazelnut shell and the production of briquettes using pyrolytic oil // Energy. 1999. № 2. V. 24. P. 141-150. URL: [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(98\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(98)00077-2) (дата обращения: 16.09.2022).
- Ayhan Demirbaş. Kinetics for non-isothermal flash pyrolysis of hazelnut shell // Bioresource Technology. 1998. V. 66. P. 247-252. URL: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(98\)00045-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(98)00045-5) (дата обращения: 16.09.2022).
- Özlem Tunç Dede. Potential use of hazelnut processing plant wastes as a sorbent for the simultaneous removal of multi-elements from water // Journal of Engineering Sciences and Design. 2019. V. 7. P. 301-312. URL: <https://doi.org/10.21923/jesd.486065> (дата обращения: 16.09.2022).
- Бикбулатова Г.М., Валеева А.Р., Сабирзянова А.И., Забелкин С.А. Потенциальные пути применения продуктов термического разложения отходов элеватора // Молодежь и наука: шаг к успеху: сб. науч. ст. 5-й Всерос. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых (22-23 марта 2021 г.). Курск, 2021. Т. 4. С. 69-72.
- Установка для эффективной переработки отходов [Электронный ресурс]. URL: <https://energolesprom.ru> (дата обращения: 16.09.2022).
- Ситдыкова К.Н., Хазиахмедова Р.М., Бешимов Б.Ч., Аширметов Ч.Ш. Технология быстрого абляционного пиролиза // Теоретические и экспериментальные исследования процессов синтеза, модификации и переработки полимеров: тезисы докл. VII Всерос. науч. конф., посвящ. 90-летию К.С. Минскера (3-6 июня 2019 г.). Уфа: Башкирский гос. ун-т, 2019. С. 79-81.
- Valiullina A.I., Valeeva A.R., Zabelkin S.A., Grachev A.N., Bikbulatova G.M., Bashkirov V.N. Effect of molar ratios of phenol, formaldehyde, and catalyst on the properties of phenol - formaldehyde resin with partial replacement of synthetic phenol with depolymerized lignocelluloses biomass // Biomass Conversion And Biorefinery - Springer Journal. 2021. P. 1-9. URL: <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02071-y> (дата обращения: 16.09.2022).
- Pérez-Armada Lorena, Rivas Sandra, González Begoña, Moure Andrés. Extraction of phenolic compounds from ha-

zelnut shells by green processes // Journal of Food Engineering. 2019. V. 255. P. 1-8.

17. Stéviigny Caroline, Rolle Luca, Valentini Nadia, Zeppa Giuseppe. Optimization of extraction of phenolic content from hazelnut shell using response surface methodology // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2007. V. 87. P. 2817-2822.

References

1. Mubofu Egid B. From cashew nut shell wastes to high value chemicals // Pure and Applied Chemistry. 2016. № 1-2. V. 88. P. 17-27. URL: <https://doi.org/10.1515/pac-2015-0603> (data obrashcheniya: 16.09.2022).
2. Haziahmedova R.M., Grachev A.N., Bashkirov V.N. Interaction of the adhesive with the surface of the substrate in composite materials based on lignocellulosic raw materials // Industrial production and use elastomers. 2021. № 3. P. 58-62.
3. Subbota E.YU., Erina E.M., Prokopec A.S. Non-waste processing of nuts // Molodaya nauka - 2013: materialy IV Otkrytoj mezhdunar. molodezhnoj nauch.-prakticheskoy konf. (Tuapse, 16 apr. 2013 g.). Krasnodar: «Izdatel'skiy Dom - YUg», 2014. P. 254-255.
4. Georgian company started producing coal briquettes from hazelnut shells [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.trend.az/business/energy/3153006.html> (data obrashcheniya: 7.04.2022).
5. Balart J.F., Fombuena V., Fenollar O., Boronat T., Sánchez-Nacher L. Processing and characterization of high environmental efficiency composites based on PLA and hazelnut shell flour (HSF) with biobased plasticizers derived from epoxidized linseed oil (ELO) // Composites Part B: Engineering. 2016. V. 86. P. 168-177. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.063> (data obrashcheniya: 16.09.2022).
6. Gürü M., Aruntaş Y., Tüzün F.N., Bilici İ. Processing of urea-formaldehyde-based particleboard from hazelnut shell and improvement of its fire and water resistance // Fire and Materials homepage. 2009. № 8. V. 33. P. 413-419. URL: <https://doi.org/10.1002/fam.1011> (data obrashcheniya: 16.09.2022).
7. Salasinska K., Ryszkowska J. Natural fibre composites from polyethylene waste and hazelnut shell: dimensional stability, physical, mechanical and thermal properties // Composite Interfaces. 2012. V. 19:5. P. 321-332.
8. Hebda Tomasz, Brzychczyk Beata, Francik Slawomir, Pedryc Norbert. Evaluation of suitability of hazelnut shell energy for production of biofuels // Engineering for rural development. 2018. P. 1860-1865.
9. Ayhan Demirbaş. Properties of charcoal derived from hazelnut shell and the production of briquettes using pyrolytic oil // Energy. 1999. № 2. V. 24. P. 141-150. URL: [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(98\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(98)00077-2) (data obrashcheniya: 16.09.2022).
10. Ayhan Demirbaş. Kinetics for non-isothermal flash pyrolysis of hazelnut shell // Bioresource Technology. 1998. V. 66. P. 247-252. URL: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(98\)00045-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(98)00045-5) (data obrashcheniya: 16.09.2022).
11. Özlem Tunç Dede. Potential use of hazelnut processing plant wastes as a sorbent for the simultaneous removal of multi-elements from water // Journal of Engineering Sciences and Design. 2019. V. 7. P. 301-312. URL: <https://doi.org/10.21923/jesd.486065> (data obrashcheniya: 16.09.2022).
12. Bikbulatova G.M., Valeeva A.R., Sabirzyanova A.I., Zabelkin S.A. Potential ways of using products of thermal decomposition of elevator waste // Molodezh' i nauka: shag k uspekhu: sb. nauch. st. 5-j Vseros. nauch. konf. perspektivnyh razrabotok molodyh uchenyh (22-23 marta 2021 g.). Kursk, 2021. V. 4. P. 69-72.
13. Installation for efficient waste processing [Elektronnyj resurs]. URL: <https://energolesprom.ru> (data obrashcheniya: 16.09.2022).
14. Sitdykova K.N., Haziahmedova R.M., Beshimov B.CH., Ashirmetov CH.SH. Technology of fast ablative pyrolysis // Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya processov sinteza, modifikacii i pererabotki polimerov: tezisy dokl. VII Vseros. nauch. konf., posvyashch. 90-letiyu K.S. Minskera (3-6 iyunya 2019 g.). Ufa: Bashkirskij gos. un-t, 2019. P. 79-81.
15. Valiullina A.I., Valeeva A.R., Zabelkin S.A., Grachev A.N., Bikbulatova G.M., Bashkirov V.N. Effect of molar ratios of phenol, formaldehyde, and catalyst on the properties of phenol - formaldehyde resin with partial replacement of synthetic phenol with depolymerized lignocelluloses biomass // Biomass Conversion And Biorefinery - Springer Journal. 2021. P. 1-9. URL: <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02071-y> (data obrashcheniya: 16.09.2022).
16. Pérez-Armada Lorena, Rivas Sandra, González Begoña, Moure Andrés. Extraction of phenolic compounds from hazelnut shells by green processes // Journal of Food Engineering. 2019. V. 255. P. 1-8.
17. Stéviigny Caroline, Rolle Luca, Valentini Nadia, Zeppa Giuseppe. Optimization of extraction of phenolic content from hazelnut shell using response surface methodology // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2007. V. 87. P. 2817-2822.