

Экспериментальная установка для исследования пирогенетической переработки органических отходов

Р.Г. Сафин^a, А.С. Родионов^b, Д.Ф. Зиятдинова^c, Е.И. Байгильдеева^d, И.Р. Каримов^e

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

^a safin@mail.ru, ^b rodionov2014@bk.ru, ^c Ziatdinova2804@gmail.com, ^d baigildeeva_e_i@mail.ru, ^e karimov2009@mail.ru
^a <https://orcid.org/0000-0002-4369-073X>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-4369-073X>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-4369-073X>,
^d <https://orcid.org/0000-0002-4369-073X>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-4369-073X>

Статья поступила 18.02.2022, принята 21.02.2022

Представлены исследования в области пиролиза — одного из перспективных способов альтернативного получения углеводородов. В целях проведения исследований на кафедре переработки древесных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета была разработана экспериментальная установка пирогенетической переработки материалов, включающая камеру пиролиза, смолоуловитель, конденсатор, мерник жижики, сборник несконденсированных газов. В результате проведенных экспериментов получены кинетические кривые продуктов пиролиза (жижки, несконденсированного газа, угля). Анализ полученных данных свидетельствует о сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований, что подтверждает возможность использования данной установки для дальнейших исследований.

Ключевые слова: пиролиз; переработка отходов; биотопливо; уголь; жижка.

Experimental installation for investigation of pyrogenetic processing of organic waste

R.G. Safin^a, A.S. Rodionov^b, D.F. Ziatdinova^c, E.I. Baigildeeva^d, I.R. Karimov^e

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

^a safin@mail.ru, ^b rodionov2014@bk.ru, ^c Ziatdinova2804@gmail.com, ^d baigildeeva_e_i@mail.ru, ^e karimov2009@mail.ru
^a <https://orcid.org/0000-0002-4369-073X>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-4369-073X>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-4369-073X>,
^d <https://orcid.org/0000-0002-4369-073X>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-4369-073X>

Received 18.02.2022, accepted 21.02.2022

The research in the field of pyrolysis, which is one of the most promising methods for alternative production of hydrocarbons, is presented in the article. In order to conduct the research at the Department of Wood Materials Processing of the Kazan State Research Technological University, an experimental plant for the processing of wood materials was developed, including a pyrolysis chamber, a resin trap, a condenser, a liquid measuring tank, and a storage of non-condensed gases. As a result of the experiments carried out, the kinetic curves of pyrolysis products (liquid, non-condensed gas, coal) have been obtained. Analysis of the data obtained indicates the convergence of the results of theoretical and experimental studies, which confirms the possibility of using this installation for further research.

Keywords: pyrolysis; waste processing; biofuel; coal; liquid.

Введение. Нефть, газ и каменный уголь на данный момент являются основными источниками энергии и сырьем для производства широкой номенклатуры материалов и изделий. Исчерпаемость природных ископаемых становится ключевой причиной для поиска альтернативных путей получения углеводородов. Одним из методов получения данного сырьевого ресурса является пирогенетическая переработка органических отходов, имеющая низкие инвестиционные затраты и высокую энергетическую эффективность по сравнению с другими известными процессами. Исходным сырьем для пирогенетической переработки могут служить разнообразные органические отходы, доступные по свое-

му местоположению, извлекаемости и стоимости. Постоянно функционирующим источником сырья для пиролиза являются лесозаготовительные и деревоперерабатывающие производства, на которых формируются отходы в виде древесной зелени, веток, коры, пней, опилок, кусков, щепы, горбылей, реек, обрезков бумаги и картона, частей древесно-композиционных материалов, содержащих химически связующие вещества и т. д. Сырьем для пиролиза могут быть пластмассы, полиэтилен, полипропилен; отходы текстильной промышленности, в частности, синтетические, льняные и хлопковые ткани; пищевые отходы, например, косточки фруктов, скорлупа орехов; отходы резинотехниче-

ских изделий, в том числе изношенные шины, уплотнители, резиновые трубы.

В России ежегодно скапливается до 300 млн т органических отходов. В результате пирогаенетической переработки органических отходов получают уголь, жижка и горючий газ. Такой уголь находит свое применение в качестве источника энергии, сырья для производства адсорбентов, восстановителя в металлургии и т. д. Разделением жижки на ее составляющие можно получать алкены, спирты, кислоты, эфиры, фенолы и т. д. Моторное топливо, полученное из жижки, имеет ряд преимуществ перед топливом, полученным по классической технологии: более высокую теплоту сгорания, стабильность состава при хранении, удобство при транспортировке. Получаемый в результате пиролиза газ состоит из простейших углеводородов и может быть использован как для синтеза различных органических веществ, так и в качестве источника энергии. Значительный вклад в развитие технологии термохимической конверсии древесины с получением жидкого топлива и химических веществ внесли ученые А.Н. Кислицын, А.Н. Грачев, С.П. Гориславец, Н.И. Богданович, Ю.Л. Юрьев, Д.А. Понамарев, В.Н. Пиялкин и др. [1–7].

Для оперативного исследования процессов пиролиза широкой номенклатуры отходов актуально создание мобильной экспериментальной установки, позволяющей выявить рациональные режимы термохимической переработки. Для исследования процессов пирогаенетической переработки широкой номенклатуры органических отходов и выявления рациональных режимов термохимической переработки на кафедре «Переработка древесных материалов» КНИТУ была создана экспериментальная установка.

Материалы и методы исследования. Установка пирогаенетической переработки органических отходов (рис. 1) включает камеру пиролиза 3, муфельную печь 2, обогреваемую трубку 4, смолоуловитель 9, конденсатор 11, мерник жижки 13, емкость для сбора газа 15, гидрозатвор 14. Камера пиролиза 3, нагреваемая муфельной печью 2, выполнена из стали 15Х25Т и имеет цилиндрическую форму. Крышка 20 присоединяется к корпусу посредством фланцевого соединения с шиппазом 18, 19, что обеспечивает достаточную герметичность камеры. Патрубок пиролизной камеры, отводящий пиролизные газы, соединяется с обогреваемой трубкой 4 для поддержания паров высококипящих компонентов (пиролизной смолы) в газообразном состоянии. Ее нагрев осуществляется электронагревателем 6. Для снижения потерь тепла электронагреватель 6 снабжен асбестовой теплоизоляцией 7. Терморегулятор 8 поддерживает заданную температуру обогреваемой трубки, измеряя ее хромель-копелевой термопарой 5. В смолоуловителе 9 происходит конденсация высококипящих компонентов. Металлическая стружка 10 предназначена для увеличения поверхности конденсации и сбора пиролизной смолы. Конденсатор 11 предназначен для охлаждения паров жижки. Для его охлаждения применяется проточная вода, проходящая через конденсатор в режиме противотока. Расход проточной воды замеряется расходомером 12. Сконденсированная жижка отбирается в мерник жижки 13. Несконденсированные газы попадают в сборник газа через гидрозатвор 14.

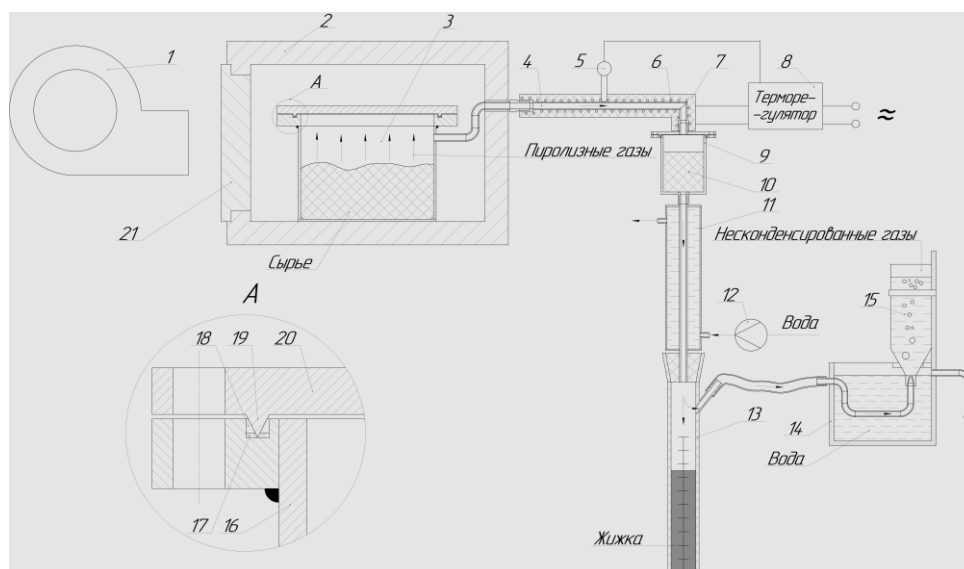


Рис. 1. Схема экспериментальной установки пиролиза: 1 — вентилятор; 2 — муфельная печь; 3 — камера пиролиза; 4 — обогреваемая трубка; 5 — термопара; 6 — нагревательный элемент; 7 — теплоизоляция; 8 — терморегулятор; 9 — смолоуловитель; 10 — металлическая стружка; 11 — конденсатор; 12 — расходомер; 13 — мерник жижки; 14 — гидрозатвор; 15 — емкость для сбора газа; 16 — корпус; 17 — уплотнитель; 18 — шип; 19 — паз; 20 — крышка

При подготовке установки к работе в паз 18 фланца укладывается термостойкая прокладка 17 толщиной

около 1 мм (выполняется из паронита или термостойкого герметика). Затем в камеру пиролиза засыпается

исходное сырье и закрывается крышка 20. Собранная камера помещается в муфельную печь 2 и последовательно присоединяются обогреваемая трубка 4, смолотловитель 9, конденсатор 11, мерник жижки 13 и сборник газов 14, 15 [8; 9].

Исходные данные эксперимента: температура муфельной печи 500 °С, внутри обогреваемой трубки — 350 °С, давление — атмосферное, масса сырья — 180 г, продолжительность эксперимента — до прекращения выделения жижки и несконденсированного газа, расход проточной воды — 0,5 м³/ч. Сырье для пиролиза: скорлупа грецкого ореха, хлопчатые текстильные отходы, измельченные до размеров 20÷25 мм, отходы резино-технических изделий (автомобильные коврики), измельченные до размеров 10÷15 мм [8–12].

В ходе эксперимента фиксируются следующие параметры: продолжительность эксперимента; начало выделения жижки и несконденсированного газа; продолжительность наполнения емкости для сбора несконденсированных газов 15; текущий объем жижки в мерной колбе 13; окончание выделения жижки и несконденсированного газа. По мере прогрева пиролизной камеры воздух, находящийся в ней расширяется, вследствие этого в емкость 15 подается воздух. Это может внести погрешность в расчет массы пиролизного газа. Во избежание этого отсчет объема газа начинается с момента выхода жижки из конденсатора [12–15].

После завершения эксперимента муфельная печь отключается, и открывается дверка 21, для ускорения процесса охлаждения включается вентилятор 19. Когда температура внутри муфельной печи опускается до 300 °С, отключается подача воды в конденсатор 2, жижка из мерника 3 сливается и отправляется на анализ. После полного остывания установка разбирается, из муфельной печи 5 извлекается пиролизная камера 1, снимается ее крышка, полученный уголь взвешивается

и отправляется на анализ для дополнительного исследования [16–19].

В процессе экспериментального исследования фиксируются начальная $m_{сн}^*$ и конечная $m_{ск}^*$ масса сырья, текущая масса жижки $m_{ж}^*(\tau)$ и текущий объем несконденсированного газа $V_r^*(\tau)$. Для составления материального баланса продуктов пиролиза рассчитывается средняя плотность несконденсированного газа:

$$\rho_{ср} = \sum_{i=1}^n (y_i * \rho_i) \quad (1)$$

где: y_i – доля i компонента несконденсированных газов; ρ_i – плотность i газового компонента, кг/м³.

По значениям текущего объема и средней плотности несконденсированных газов определяется текущая масса несконденсированных газов:

$$m_r(\tau) = V_r^*(\tau) * \rho_{ср} \quad (2)$$

По значениям текущих масс жижки и несконденсированного газа определялась текущая масса сырья в процессе пиролиза:

$$m_c(\tau) = m_{сн}^* - m_{ж}^*(\tau) - m_{нг}(\tau) \quad (3)$$

По расхождению расчетных значений конечной массы сырья с экспериментальными значениями оценивается относительная погрешность экспериментального исследования процесса в разработанной экспериментальной установке [17–23]:

$$\delta_a = \frac{m_{ск} - m_{ск}^*}{m_{ск}^*} \quad (4)$$

Результаты. В табл. 1 представлен состав несконденсированных газов, выделившихся при пиролизе скорлупы грецкого ореха.

Таблица 1. Состав несконденсированного газа при пиролизе скорлупы грецкого ореха

Состав несконденсированного газа	Доля компонента, %	Плотность ρ_i , кг/м ³
CO_2	14,4	1,98
C_dH_{2d}	7,55	1,97
O_2	1,9	1,42
CO	32,9	1,25
H_2	14,6	0,089
CH_4	20,5	0,71
N_2	8,15	1,16

Несконденсированный газ, полученный при пиролизе скорлупы грецкого ореха, содержит в себе 75 % горючих газов с высокой теплотой сгорания. Наличие в составе несконденсированных газов компонентов синтеза газа говорит о его пригодности для синтеза органических веществ. Анализ несконденсированных газов проводился в Центре коллективного пользования научным оборудованием по получению и исследованию наночастиц

металлов, оксидов металлов и полимеров Казанского национального технологического университета.

В табл. 2 приведены данные по результатам испытаний различных видов органических отходов.

Анализ результатов испытаний позволяет сделать вывод что, наибольшее количество жижки выделяется из автомобильных ковриков с низкой плотностью, но с высокой температурой кипения. По выходу углеродистого остатка имеет преимущество скорлупа грецкого ореха. Судя по протонной плотности, можно сказать,

что уголь, полученный из скорлупы грецкого ореха, ственно и поглотительную способность. имеет наибольшую удельную поверхность, соответ-

Таблица 2. Результаты испытаний различных видов органического сырья

Физические свойства	Вид сырья	Скорлупа грецкого ореха	Текстиль	Автомобильные коврики
Температура начала выделения жижки, °C		488	390	362
Конечный объем жижки, мл		80	90	180
Конечная масса жижки, г		94,8	84	146
Плотность жижки		1 185	930	810
Температура начала выделения несконденсированного газа, °C		332	362	500
Конечный объем несконденсированного газа, л		17	14	10
Плотность несконденсированного газа		1,03	1,1	1,07
Конечная масса угля, г		67,58	49,23	23,3
Время пиролиза, мин		80	98	112
Протонная плотность *10 ²¹		7,7	7,85	7,75

На рис. 2 приведены кинетические кривые текущей массы жижки в процессе пиролиза.

Анализ кривых показывает, что у скорлупы грецкого ореха наблюдается самое непродолжительное время выделения жижки. У текстиля пиролиз начинается раньше, а количество выделяемой жижки сопостави-

мо со скорлупой грецкого ореха. При переработке автомобильных ковриков выделение жижки начинается позже, но ее количество больше остальных на 33 %.

На рис. 3 показаны кинетические кривые текущей массы газа в процессе пиролиза.

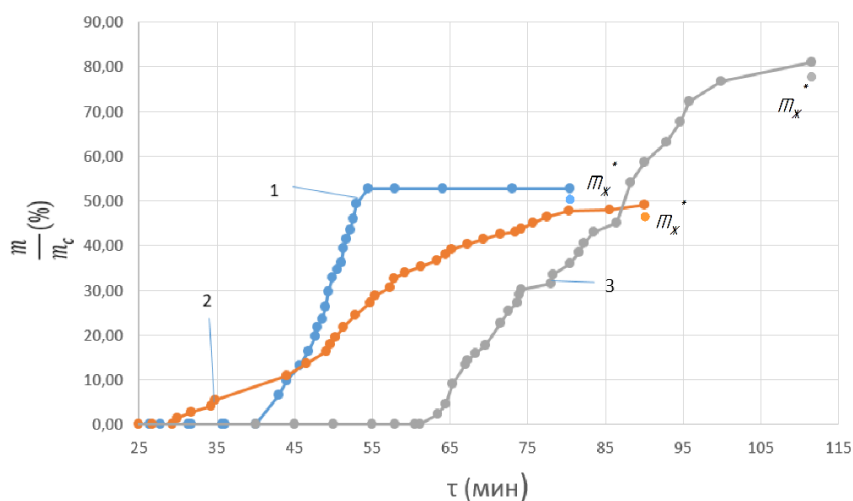


Рис. 2. Кинетические кривые текущей массы жижки: 1 — скорлупа грецкого ореха; 2 — текстиль; 3 — автомобильные коврики

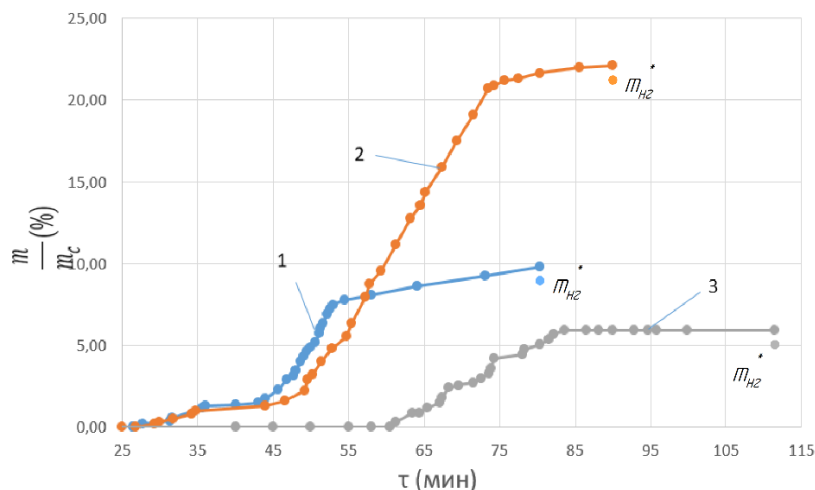


Рис. 3. Кинетические кривые текущей массы несконденсированных газов во время пиролиза: 1 — скорлупа грецкого ореха; 2 — текстиль; 3 — автомобильные коврики

Анализ кривых показывает, что наибольшее количество несконденсированного газа выделяется при переработке текстиля. У скорлупы грецкого ореха и автомобильных ковриков на 13 и 16 % меньше соответственно. Время начала выделения несконденсированных газов у текстиля и автомобильных ковриков одинаково и меньше, чем у автомобильных ковриков, на 22 мин. Также для автомобильных ковриков характерен самый низкий расход выделяющихся несконденсированных газов.

На рис. 4 показаны кинетические кривые текущей массы сырья во время пиролиза.

Анализ результатов кривых позволяет сделать вывод, что наибольший выход угля наблюдается из скорлупы грецкого ореха, а пиролиз протекает быстро. При этом автомобильные коврики показывают выход угля на 25 % меньше.

На рис. 5 изображены совмещенные кинетические кривые температуры и продуктов пиролиза.

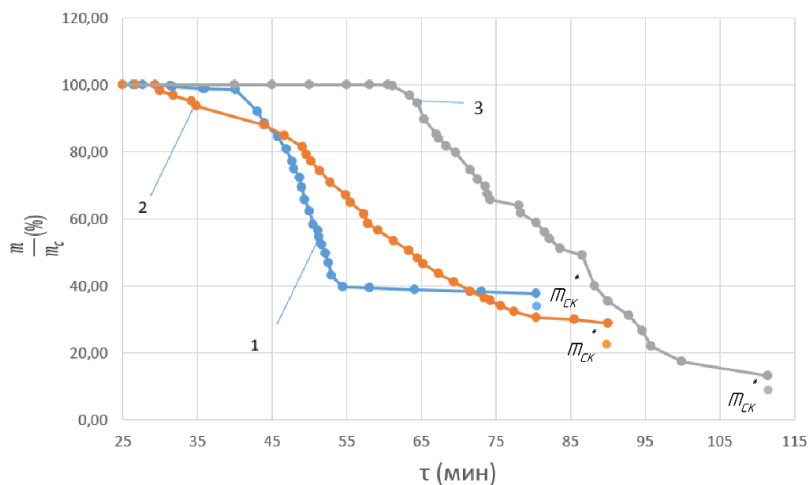


Рис. 4. Кинетические кривые текущей массы сырья во время пиролиза: 1 — скорлупа грецкого ореха; 2 — текстиль; 3 — автомобильные коврики

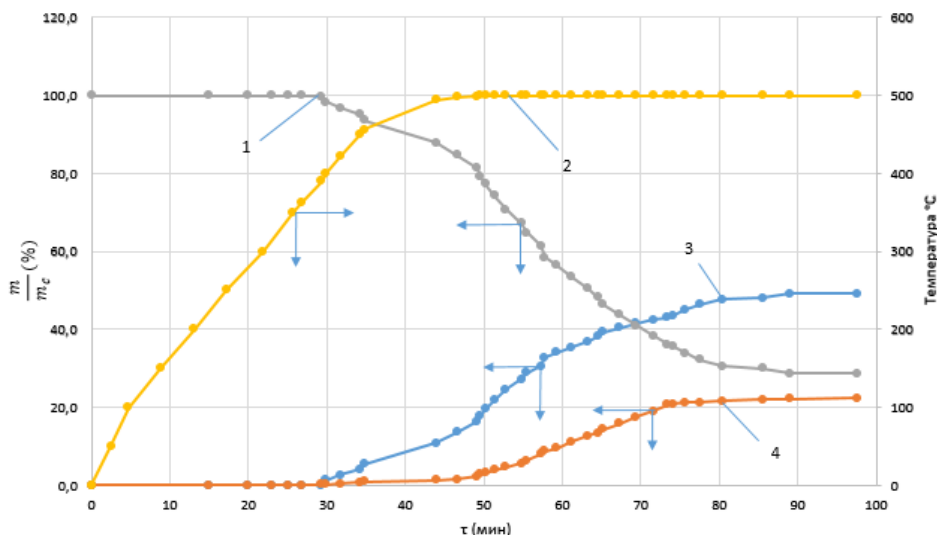


Рис. 5. Совмещенные кинетические кривые температуры и продуктов пиролиза текстиля: 1 — текущая масса угля; 2 — текущая температура; 3 — масса жижки; 4 — масса несконденсированного газа

Заключение

Малое расхождение между теоретической и расчетной конечной массами сырья показывает, что потеря продукта при пиролизе незначительна, что свидетельствует о возможности использования данной установки для дальнейших исследований.

Процентное соотношение угля, жижки, несконденсированного газа при пиролизе различных органических отходов неодинаково: скорлупа грецкого ореха 38:53:10, текстиль 27:47:26, автомобильные коврики 13:81:6.

Литература

1. Глухих В.В., Мухин Н.М., Шкуро А.Е., Бурындин В.Г. Получение и применение изделий из древесно-полимерных композитов с термопластичными полимерными матрицами. Екатеринбург: УГЛТУ, 2014. 85 с.
2. Бондаренко В.М., Римшин В.И. Строительная наука направления развития // Строительные материалы. 1998. Т. 1. № 4. С. 2-4.
3. Барина Л.С., Куприянов Л.И., Миронов В.В. Современное состояние и перспективы развития строительного комплекса России // Строительные материалы. 2004. Т. 3. № 9. С. 2-7.
4. Основин В.Н., Шуляков Л.В., Дубяго Д.С. Справочник по строительным материалам и изделиям. 2-е изд. Ростов н/Д.: Феникс, 2006. 443 с.
5. Разиньков Е.М., Мурзин В.С. Технология и оборудование древесных плит и композиционных материалов. Воронеж: Воронежский гос. лесотехнический ун-т им. Г.Ф. Морозова, 2012. 228 с.
6. Угрюмов С.А., Осетров А.В. Экологически чистые композиционные материалы // Вестн. КГТУ. 2011. № 1 (26). С. 48-49.
7. Алексеева Л.В. Перспективы производства и применения вспученного перлита как наполнителя для легких бетонов // Строительные материалы. 2006. Т. 1. № 6. С. 74-77.
8. Тажибаева Д.М. Исследование смешанного магнезиального вяжущего с наполнителями // Технические науки в России и за рубежом: материалы V Междунар. науч. конф. (январь 2016 г.). М.: Буки-Веди, 2016. С. 43-45.
9. Угрюмов С.А., Осетров А.В. Экологически чистые композиционные материалы конструкционного назначения

По результатам исследования пиролиза органических отходов можно сделать вывод, что для получения большего количества угля с низкой протонной плотностью целесообразно использовать скорлупу грецкого ореха. Для получения большего количества жижки необходимо пиролизировать отходы резинотехнических изделий. Больше несконденсированных газов выходит при пиролизе текстиля. Продолжительность пиролиза меньше всего у скорлупы грецкого ореха — 80 мин, у текстиля — 98 мин, а у отходов резинотехнических изделий — 110 мин.

- на основе отходов деревообработки // Вестн. КГТУ. 2011. № 1 (26). С. 50-51.
10. Основин В.Н., Шуляков Л.В., Дубяго Д.С. Справочник по строительным материалам и изделиям. Ростов н/Д.: Феникс, 2006. С. 200-250.
11. Сафин Р.Г., Степанов В.В., Хайруллина Э.Р., Гайнуллина А.А., Степанова Т.О. Современные строительные материалы на основе древесных отходов // Вестн. Казанского технологического ун-та. 2014. Т. 17. № 20. С. 122-127.
12. Сафин Р.Г., Сотников В.Г., Каримов И.Р., Мифтахов Р.А., Ильясов И.Р. Энергосберегающая технология переработки древесных отходов // Эколого-ресурсосберегающие технологии в науке и технике: материалы Всерос. науч.-технической конф. (19-20 окт. 2021 г.). Воронеж, 2021. С. 192-196.
13. Agricultural Waste Materials as Thermal Insulation for Dwellings in Thailand: Preliminary Results / Steve Fotios // Journal of Low Energy Architecture. 2008. V. 25, iss. 1. P. 16-19.
14. A Study of Physical, Mechanical and Thermal Properties for Thermal Insulation from Narrow-leaved Cattail Fibers / Thitiwan Luamkanchanaphana, Sutharat Chotikaprahkana, Songklod Jarusombatib // Journal of APCBEE Procedia. 2012. V. 1, iss. 2. P. 46-52.
15. Kangcheng Wei, Chenglong Lv, Minzhi Chen, Xiaoyan Zhou, Zhenyu Dai, Da Shen. Development and performance evaluation of a new thermal insulation material from rice straw using high frequency hot-pressing // Journal of Energy and Buildings. 2015. V. 87, iss. 4. P. 116-122.
16. Azra Korjenica, Vít Petráněkb, Jiří Zachb, Jitka Hroudováb. Development and performance evaluation of natural thermal-

- insulation materials composed of renewable resources // *Journal of Energy and Buildings*. 2011. V. 43, iss. 9. P. 116-122.
17. Günther Kain, Viola Güttler, Marius-Catalin Barbu, Alexander Petutschnigg, Klaus Richter, Gianluca Tondi. Density related properties of bark insulation boards bonded with tannin hexamine resin // *Journal of Wood and Wood Products*. 2014. V. 72, iss. 4. P. 417-424.
 18. Singhadej Tangjuank, Supreya Kumfu. Particle Boards from Papyrus Fibers as Thermal Insulation // *Journal of Wood and Applied Sciences*. 2011. V. 11, iss. 14. P. 2640-2645.
 19. Ibraheem S.A., Aidy Ali, A. Khalina. Development of Green Insulation Boards from Kenaf Fibres and Polyurethane // *Journal of Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2011. V. 50, iss. 6. P. 613-621.
 20. Xiao-yan Zhou, Fei Zheng, Hua-guan Li, Cheng-long Lu. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers // *Journal of Energy and Buildings*. 2010. V. 42, iss. 7. P. 1070-1074.

References

1. Gluhih V.V., Muhin N.M., SHkuro A.E., Buryndin V.G. Obtaining and application of products from wood-polymer composites with thermoplastic polymer matrices. Ekaterinburg: UGLTU, 2014. 85 p.
2. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. Construction science of the development direction // *Stroitel'nye materialy*. 1998. V. 1. № 4. P. 2-4.
3. Barinova L.S., Kupriyanov L.I., Mironov V.V. The current state and development prospects of the construction complex of Russia // *Stroitel'nye materialy*. 2004. V. 3. № 9. P. 2-7.
4. Osnovin V.N., SHulyakov L.V., Dubyago D.S. Handbook of building materials and products. 2-e izd. Rostov n/D.: Feniks, 2006. 443 p.
5. Razin'kov E.M., Murzin V.S. Technology and equipment of wood boards and composite materials: a training manual. Voronezh: Voronezhskij gos. lesotekhnicheskij un-t im. G.F. Morozova, 2012. 228 p.
6. Ugryumov S.A., Osetrov A.V. Environmentally friendly composite materials // *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*. 2011. № 1 (26). P. 48-49.
7. Alekseeva L.B. Prospects for the production and use of expanded perlite as a filler for lightweight concrete // *Stroitel'nye materialy*. 2006. V. 1. № 6. P. 74-77.
8. Tazhibaeva D.M. Research of a mixed magnesian binder with fillers // *Tekhnicheskije nauki v Rossii i za rubezhom: materialy V Mezhdunar. nauch. konf. (yanvar' 2016 g.)*. M.: Buki-Vedi, 2016. P. 43-45.
9. Ugryumov S.A., Osetrov A.V. Environmentally friendly composite materials for structural purposes based on wood-working waste // *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*. 2011. № 1 (26). P. 50-51.
10. Osnovin V.N., SHulyakov L.V., Dubyago D.S. Handbook of building materials and products. Rostov n/D.: Feniks, 2006. P. 200-250.
11. Safin R.G., Stepanov V.V., Hajrullina E.R., Gajnullina A.A., Stepanova T.O. Modern building materials based on wood waste // *Herald of Kazan Technological University (KNRTU)*. 2014. V. 17. № 20. P. 122-127.
12. Safin R.G., Sotnikov V.G., Karimov I.R., Miftahov R.A., Il'yasov I.R. Energy-saving technology for wood waste processing // *Ekologo-resursosberegayushchie tekhnologii v nauke i tekhnike: materialy Vseros. nauch.-tekhnicheskoy konf. (19-20 okt. 2021 g.)*. Voronezh, 2021. P. 192-196.
13. Agricultural Waste Materials as Thermal Insulation for Dwellings in Thailand: Preliminary Results / Steve Fotios // *Journal of Low Energy Architecture*. 2008. V. 25, iss. 1. P. 16-19.
14. A Study of Physical, Mechanical and Thermal Properties for Thermal Insulation from Narrow-leaved Cattail Fibers / Thitiwan Luamkanchanaphana, Sutharat Chotikaprakhana, Songklod Jarusombatib // *Journal of APCBEE Procedia*. 2012. V. 1, iss. 2. P. 46-52.
15. Kangcheng Wei, Chenglong Lv, Minzhi Chen, Xiaoyan Zhou, Zhenyu Dai, Da Shen. Development and performance evaluation of a new thermal insulation material from rice straw using high frequency hot-pressing // *Journal of Energy and Buildings*. 2015. V. 87, iss. 4. P. 116-122.
16. Azra Korjenica, Vít Petráněkb, Jiří Zachb, Jitka Hroudováb. Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources // *Journal of Energy and Buildings*. 2011. V. 43, iss. 9. P. 116-122.
17. Günther Kain, Viola Güttler, Marius-Catalin Barbu, Alexander Petutschnigg, Klaus Richter, Gianluca Tondi. Density related properties of bark insulation boards bonded with tannin hexamine resin // *Journal of Wood and Wood Products*. 2014. V. 72, iss. 4. P. 417-424.
18. Singhadej Tangjuank, Supreya Kumfu. Particle Boards from Papyrus Fibers as Thermal Insulation // *Journal of Wood and Applied Sciences*. 2011. V. 11, iss. 14. P. 2640-2645.
19. Ibraheem S.A., Aidy Ali, A. Khalina. Development of Green Insulation Boards from Kenaf Fibres and Polyurethane // *Journal of Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2011. V. 50, iss. 6. P. 613-621.
20. Xiao-yan Zhou, Fei Zheng, Hua-guan Li, Cheng-long Lu. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers // *Journal of Energy and Buildings*. 2010. V. 42, iss. 7. P. 1070-1074.