

Технологические подходы к повышению качества композиционных материалов

Р.М. Хазиахмедова^a, А.А. Макаров^b, А.И. Валиуллина^c, А.Р. Валеева^d, Г.М. Бикбулатова^e

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

^a rimmo4ka_0694@mail.ru, ^b smakarov86@gmail.com, ^c almi.sabirzyanova@yandex.ru,

^d samirhanova@rambler.ru, ^e gm.bikbulatova@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-9278-816X>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-3456-0359>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-0909-9126>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-8656-7643>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-1076-6889>

Статья поступила 04.04.2022, принята 30.04.2022

Использование лигноцеллюлозного сырья — возобновляемого природного ресурса, который встречается в изобилии во многих частях мира — может в значительной мере обеспечить экономию энергии, сохранение дефицитных ресурсов и защиту окружающей среды. Однако данный вид сырья обладает некоторыми нежелательными свойствами, которые затрудняют получение на их основе высокопрочных композиционных материалов с минеральными вяжущими. Термическая обработка наполнителя из древесного сырья при 240 °С способна уменьшить негативный характер, что, в конечном итоге, приводит к улучшению адгезионного взаимодействия в композиционных строительных материалах. В данной статье экспериментально исследована прочность при одноосном сжатии образцов древесно-цементного композиционного материала. Испытаны образцы в форме куба размерами 100×100×100 мм. Компоненты материала — опилки древесные, портландцемент М400, вода. Установлено, что термическая модификация древесной муки оказывает существенное влияние на прочностные свойства древесно-цементных композиционных материалов. По результатам исследований влияния термической обработки древесного сырья без доступа кислорода доказана целесообразность использования данного вида обработки в производстве композиционных материалов с целью повышения их эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: торрефикация; термическая модификация; композиционные материалы; прочность на сжатие; арболит; опилкобетон.

Technological approaches to improving the quality of composite materials

R.M. Khaziakhmedova^a, A.A. Makarov^b, A.I. Valiullina^c, A.R. Valeeva^d, G.M. Bikbulatova^e

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

^a rimmo4ka_0694@mail.ru, ^b smakarov86@gmail.com, ^c almi.sabirzyanova@yandex.ru,

^d samirhanova@rambler.ru, ^e gm.bikbulatova@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-9278-816X>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-3456-0359>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-0909-9126>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-8656-7643>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-1076-6889>

Received 04.04.2022, accepted 30.04.2022

The use of lignocellulosic raw materials, a renewable natural resource found in abundance in many parts of the world, can directly lead to energy savings, conservation of the world's most scarce resources and environmental protection. However, this type of raw material has some undesirable properties that make it difficult to obtain high-strength composite materials based on them with mineral binders. Heat treatment of filler from wood raw materials at 240 °C can reduce the negative character, which ultimately leads to an improvement in adhesive interaction in composite building materials. In this article, the strength under uniaxial compression of samples of wood-cement composite material is experimentally studied. Samples in the form of a cube with dimensions of 100 × 100 × 100 mm were tested. Material components: wood sawdust, Portland cement M400, water. It has been established that the thermal modification of wood flour has a significant effect on the strength properties of wood-cement composite materials. According to the results of studies of the effect of thermal treatment of wood raw materials without access to air oxygen, the expediency of using this type of processing in the production of composite materials in order to improve their performance characteristics has been proved.

Keywords: torrefication; thermal modification; composite materials; compressive strength; arbolite; sawdust concrete.

Введение. Основным направлением решения существующих проблем в отечественном лесопромышленном комплексе является повышение эффективности использования ресурсов по всей производственной цепочке, от

заготовки до производства готовой продукции. Эффективность использования ресурсов может снизить потребность в древесном сырье в лесном комплексе Российской Федерации, снизить себестоимость лесозаготовок, смяг-

чить риски и угрозы сокращения доступности ресурсов в будущем. Рациональное использование может ограничить негативное воздействие на истощение лесных запасов, их загрязнение и утрату биоразнообразия. Снижение затрат будет стимулировать инвестиции в инновационные проекты, которые могут обеспечить другие экономические выгоды.

В ряде отечественных и зарубежных источников представлены сведения по переработке древесных отходов [1–5], однако проблемы сокращения их количества остаются актуальными на сегодняшний день [6; 7].

Легкий бетон, изготовленный из отходов деревообрабатывающих производств, часто используется в строительстве зданий. Экологичность теплоизоляции на основе древесных частиц в сочетании с другими потребительскими свойствами является одной из причин использования древесины в качестве целлюлозного наполнителя. Опилки могут являться сырьем для производства древесно-цементных материалов.

Вопросы, связанные с физико-химическим взаимодействием в системе «древесина – цемент», изучены несколькими исследователями [7–11]. В ряде работ предложены добавки и модификаторы для древесно-цементных композитов [6; 12], а также разработаны методы расчета, учитывающие, в частности, анизотропию древесно-цементных материалов [13; 14].

Почти все органические теплоизоляционные материалы изготавливаются в виде крупных блоков, что упрощает строительные работы и снижает затраты на строительство [9; 10]. Структура древесно-цементного материала, например, арболита (легкого бетона), формируется с помощью цементного камня в виде пространственной решетки, заполненной взаимосвязанными частицами органического наполнителя — древесной щепы (рис. 1). Цементный камень включает в себя микропоры и капилляры с химически несвязанной водой, а также водяным паром и воздушными порами. Поэтому древесно-цементные композиты (арболит, фибролит и др.) представляют собой капиллярно-пористый каменный материал, в котором нарушена сплошность и присутствуют все три фазы — твердая, жидкая и газообразная.

Особыми свойствами обладает контактная зона — слой цементного камня на границе с частицами органического наполнителя. В зоне контакта есть микродефекты — зерна минерального вяжущего, не прореагировавшие с водой, и другие, способные нарушить однородность древесно-цементного материала.

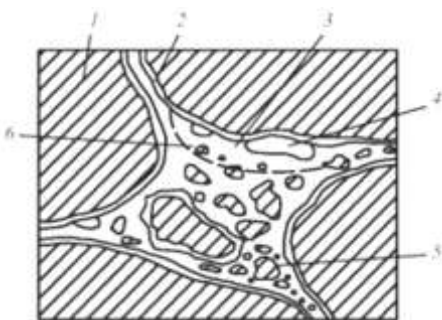


Рис. 1. Структура легкого бетона: 1 — наполнитель; 2 — зона контакта; 3 — зона структуры; 4 — пузырьки воздуха; 5 — зона уплотненной структуры; 6 — крупные седиментационные поры

Замедление схватывания происходит из-за химической несовместимости между древесиной, органическим материалом и неорганическим связующим. По мнению многих авторов, влияние древесины на схватывание цемента может зависеть от различных факторов, таких как географическое положение дерева, сезон рубки, его вид и различные химические компоненты в составе.

Таким образом, основной проблемой при формировании композиционного материала на основе цемента и древесины является то, что наличие в древесине моносахаридов (легкогидролизуемых углеводов) приводит к щелочному гидролизу с выделением низкомолекулярных смесей [9; 10], что, в конечном итоге, приводит к ухудшению адгезионных взаимодействий в результате снижения прочностных показателей композиционных материалов [7; 11].

Для получения высоких прочностных свойств древесно-цементного материала необходимо локализовать вредные для цемента вещества.

Есть несколько известных способов, среди которых обработка частиц древесины раствором хлористого кальция, окисление древесины под воздействием воздуха и перевод моносахаридов в нерастворимую форму, обработка жидким стеклом или известью и т. д.

Купаи и др. [25] изучали влияние предварительной обработки оболочки масличной пальмы с использованием различных растворов щелочей на бетон. Yew и др. [26] установили, что термически обработанная оболочка масличной пальмы при 60 °С в течение 0,5 ч улучшала физико-механические свойства бетона. Однако химические растворы могут вымываться из наполнителя во время сезона дождей и переноситься дождевой водой в реку и почву и в конечном итоге вызывать загрязнение окружающей среды.

Одним из способов удаления моносахаридов может являться торрефикация [15; 16], которая в значительной мере влияет на качественные характеристики древесины [17; 18].

Термическая обработка может устранить негативное воздействие биомассы на легкий бетон. Включение термообработанного древесного наполнителя в бетон обеспечивает значительно более высокую механическую прочность, например, добавление в строительный раствор предварительно обработанной биомассы при определенных температурах торрефикации позволит увеличить прочность на сжатие на 40–50 % по сравнению с обычным строительным раствором. Кроме того, термическая обработка может улучшить качество поверхности древесного наполнителя и повысить его адгезию к раствору, что значительно увеличит механическую прочность легкого бетона. Также при термической обработке происходит разложение питательных веществ для роста грибов и микробов, что приводит к превосходной устойчивости композиционных материалов к биологическому разложению.

Методы и материалы. Торрефикация — это мягкий процесс пиролиза. В этом процессе биомассу нагревают в инертной или азотной атмосфере с температурой в диапазоне 200–300 °С [19; 20]. После проведения торрефикации влага, содержащаяся в биомассе, существенно

снижается, и высвобождаются компоненты легколетучих органических соединений. В результате образуются гидрофобные твердые вещества с более высоким содержанием фиксированного углерода [14]. Это, в свою очередь, означает, что плотность энергии торрефицированной биомассы увеличивается, а измельчаемость твердых веществ значительно улучшается [21; 22].

Торрефикация является эндотермическим процессом и, следовательно, требует энергии как для запуска процесса, так и для его поддержания. Эта энергия, однако, может быть получена за счет сжигания произведенного топлива [23]. Ключевые процессы, происходящие при торрефикации, включают:

1. Процесс удаления летучих веществ, что приводит к значительной потере веса, главным образом за счет части биомассы, на начальной стадии торрефикации. На этой стадии большинство низкомолекулярных компонентов переходят в газообразное состояние, в то время как высокомолекулярные компоненты распадаются на более мелкие [23];

2. Процесс дезоксигенирования, что приводит к удалению кислорода и увеличению соотношений C/O и C/N. В результате этого процесса также образуются такие газы, как CO₂, CO и т. д. [23; 24];

3. Процесс деполимеризации приводит к распаду полимера на мономеры;

4. Процесс карбонизации, который приводит к максимизации фиксированного углерода.

В целом торрефикация фокусируется на производстве твердой фракции, которая может быть использована в качестве твердого топлива в котлах с совместным сжиганием и цементных печах, а также может быть преобразована в транспортное топливо, экологически чистое авиационное топливо и химикаты путем каталитического пиролиза или газификации [23].

Изменение свойств биомассы при торрефикации показано на рис. 2.



Рис. 2. Свойства биомассы до и после торрефикации

Типовой энергетический и материальный баланс процесса торрефикации древесной биомассы: около 70 % исходной биомассы остается в виде твердого вещества, удерживая около 90 % от первоначальной теплоемкости, а 30 % сырья переходит в паргазовую фракцию, теряя до 10 % теплоемкости исходного материала.

Процесс торрефикации можно условно разделить на следующие стадии (рис. 3): предварительная сушка; сушка; основной нагрев; торрефикация; охлаждение.

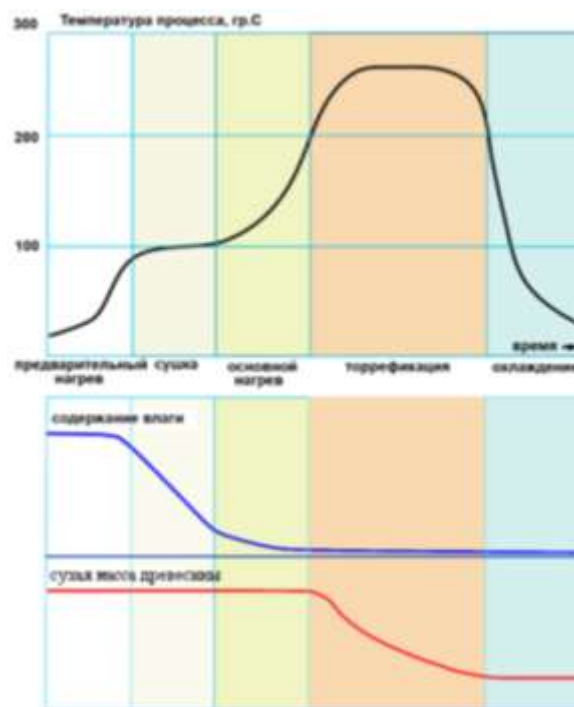


Рис. 3. Стадии процесса торрефикации древесного сырья

В лабораторных условиях был проведен процесс термической модификации древесного сырья. Отходы лесопиления и деревообрабатывающей промышленности использовались в качестве сырья для процесса торрефикации. Торрефикация древесного сырья осуществлялась при 240 °С с продолжительностью выдержки 1 ч.

Термическая обработка биомассы была проведена на установке торрефикации (рис. 4).

В процессе торрефикации происходит потеря веса древесины; величина потери веса зависит от температуры нагрева и времени. За счет торрефикации повышается пористость клеточной стенки, что в конечном итоге приводит к снижению плотности.



Рис. 4. Установка для исследования процесса торрефикации: 1 - реактор; 2 - шкаф электрический; 3 - баллон с азотом; 4 - заглушка поворотная; 5 - бункер для подачи сырья; 6 - линия подачи сырья; 7 - рама; 8 - мотор-редуктор; 9 - муфта; 10 - бункер выгрузки сырья; 11 - термопара; 12 - патрубок для подвода азота; 13 - кожух; 14 - нагреватель; 15 - гидрозатвор

Далее обработанная биомасса выгружается в бункер выгрузки сырья.

Торрефицированный образец и исходная биомасса представлены на рис. 5.



Рис. 5. Отходы древесного сырья до и после торрефикации

Для реализации задач исследования использовались следующие сырьевые материалы: опилки древесные (необработанные и термически обработанные при 240 °С), портландцемент (М400), песок, известь гашеная, вода.

Таблица. Химический состав цемента (% по массе оксидов)

	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
Портланд-цемент М400	63.5	3.1	19.4	4.1	2.3	0.2	1.1	3.0

Из сырьевых смесей формировались образцы древесно-цементного композита в форме куба размером 10×10×10 см. В ходе исследований готовились контрастные образцы с термически обработанным и необработанным древесным наполнителем с содержанием 40–70 % масс. Было установлено, что замена необработанного наполнителя обработанным снижала водопоглощение.



Рис. 6. Внешний вид блоков

Каждый образец имел определенный состав смеси. Изготовление сырьевой смеси проводилось смешиванием сухой части из портландцемента, извести, песка с древесными частицами и водой [9].

Каждый слой уплотняли в соответствии с СН 549-82. Образцы набирали прочность при температуре 18–20 °С. С течением времени масса образцов уменьшалась.

Результаты. Образцы были испытаны на прочность при сжатии в возрасте 28 суток. Испытания образцов выполнены на испытательной машине LDS.5.L.01.РЭ по методу ГОСТ 10180-2012 двумя повторностями [9].

Прочность экспериментальных образцов из деревобетона, МПа, приведена на рис. 7.

Параллельно были изготовлены образцы гипсобетона с необработанной и термически обработанной древесиной.

Показатели прочности при сжатии представлены на рис. 8.

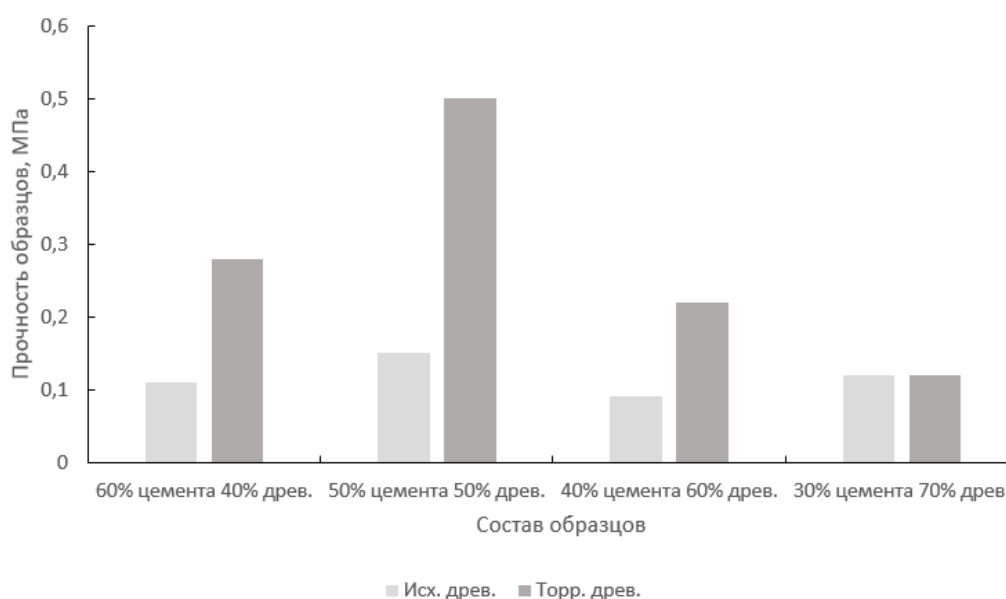


Рис. 7. Зависимость прочности образцов деревобетона от содержания древесных опилок в их составе

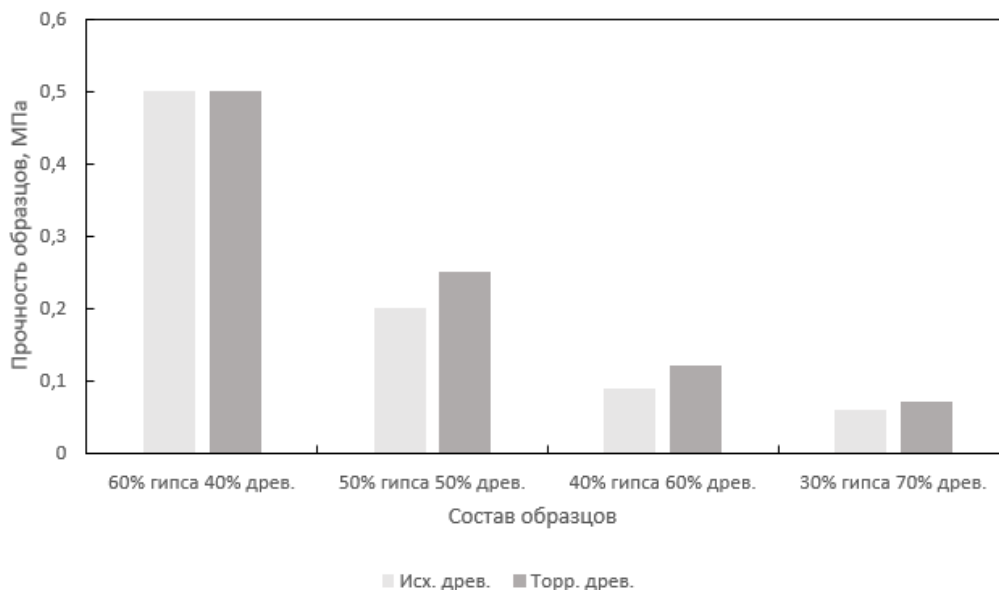


Рис. 8. Зависимость прочности образцов гипсобетона от содержания древесных опилок в их составе

Выводы. В лабораторных условиях была проведена термическая модификация биомассы при 240 °С с продолжительностью выдержки 1 ч. Термически обработанная биомасса служила сырьем для формирования образцов древесно-цементных материалов. Полученные образцы исследовались на прочность при сжатии.

Как представлено на рис. 7, прочность полученных образцов с необработанным наполнителем незначительно меняется в представленном диапазоне с отсутствием какой-либо зависимости предела прочности от состава смеси, в то время как для образцов с термически обработанным наполнителем существует зависимость с максимальным значением прочности при содержании обработанного наполнителя, равном 50 %. Причем прочность данного композиционного материала в 3 раза выше, чем у контрольного образца. При содержании наполнителя, равном 70 %, прочность обоих образцов почти одинакова.

Отсутствие тенденции к изменению прочности при различных содержаниях древесного наполнителя можно объяснить неудовлетворительным отверждением це-

ментной матрицы при наличии цементных ядов, образовавшихся при гидролизе гемицеллюлоз древесины, и низкой адгезией матрицы к наполнителю.

Снижение прочности композиционного материала с торрефицированным наполнителем, вероятно, связано с уменьшением влияния матрицы на композит и возникновением дефектов наполнителя [9].

По данным, представленным на рис. 8, видно, что прочность образцов гипсобетона с обработанным наполнителем незначительно возрастает при концентрации наполнителя от 50–70 %. При содержании концентрации наполнителя в 40 % прочность остается практически одинаковой.

По результатам исследований на прочность при сжатии образцов можно сделать вывод, что замена необработанного наполнителя в древесно-цементных материалах улучшает механические свойства, а именно прочность древесно-цементного композита, но практически не оказывает влияние на прочность гипсобетона.

Литература

1. Андреев А.А. Ресурсосбережение и использование отходов заготовки и переработки древесного сырья // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. 2014. № 10. С. 148-155.
2. Валиуллина А.И., Бикбулатова Г.М., Валеева А.Р. Сепарация жидких продуктов пиролиза лигноцеллюлозной биомассы с целью получения биополиола // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VI Междунар. науч.-технической конф., посвящ. памяти проф. В.И. Комарова (9-11 сент. 2021 г.). Архангельск: САФУ, 2021. С. 368-371.
3. Хазиахмедова Р.М., Башкиров В.Н., Грачев А.Н. Термическая модификация лигноцеллюлозного сырья в производстве композиционных материалов // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VI Междунар. науч.-технической конф., посвящ. памяти проф. В.И. Комарова (9-11 сент. 2021 г.). Архангельск: САФУ, 2021. С. 378-382.
4. Валеева А.Р., Сабирзянова А.И., Бикбулатова Г.М., Забелкин С.А. Прочность фенолоформальдегидной смолы модифицированной жидкими продуктами пиролиза древесины в зависимости от использования различных ее фракций // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XXII Междунар. науч.-практической конф. студентов и молодых ученых посвящ. 125-летию со дня основания Томского политехн. ун-та (17-20 мая 2021 г.). Томск: Нац. исслед. Томский политехн. ун-т, 2021. С. 240-241.
5. Запруднов В.И., Санаев В.Г. Макроскопические свойства древесноцементных композитов // Вестн. Московского гос. ун-та леса. Лесной вестн. 2012. № 6 (89). С. 168-171.
6. Наназашвили И.Х. Строительные материалы из древесно-цементной композиции. Л.: Стройиздат, 1990. 415 с.
7. Сабирзянова А.И., Валеева А.Р., Бикбулатова Г.М., Хазиахмедова Р.М. Деструкция модифицированного биополиола пенополиуретана под воздействием искусственно созданных климатических факторов // Молодежь и XXI век - 2021: материалы XI Междунар. молодежной науч. конф. (18-19 февр. 2021 г.). Курск, 2021. С. 382-385.
8. Пошарников Ф.В., Филичкина М.В. Анализ структуры смеси для опилкобетона на основании многофакторного планирования эксперимента // Вестн. Московского гос. ун-та леса. Лесной вестн. 2010. № 1. С. 111-114.

9. Хазиахмедова Р.М., Грачев А.Н., Пушкин С.А., Башкиров В.Н. Физико-механические свойства опилкобетона с торрефицированным древесным наполнителем // *Деревообрабатывающая пром-сть*. 2019. № 3. С. 54-60.
10. 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.
11. Acharya B., Sule I., Dutta A. A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2 (2012). P. 349-369. URL: <https://doi.org/10.1007/s13399-012-0058-y> (дата обращения: 29.04.2022).
12. Campuzano F., Brown R.C., Martinez J.D. Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 102 (2019). P. 372-409. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.014> (дата обращения: 29.04.2022).
13. Felfli F.F., Luengo C.A., Suarez J.A. Wood briquette torrefaction // *Energy Sustain Develop*. 2005. V. 9 (3). P. 19-22.
14. Prins M.J., Ptasincki K.J., Janssen F.J.J.G. More efficient biomass gasification via torrefaction // *Energy*. 2006. V. 31 (15). P. 3458e70.
15. Mamvura T.A., Danha G. Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production, *Heliyon*, 6 (2020).
16. Cherubini F., Strömman A.H. Chapter 1 - Principles of Biorefining, in: A. Pandey, C. Larroche, S.C. Ricke, C.-G. Dussap, E. Gnansounou (Eds.) *Biofuels*, Academic Press, Amsterdam, 2011. P. 3-24.
17. Xu Z., Kolapkar S.S., Zinchik S., Bar-Ziv E., McDonald A.G. Comprehensive kinetic study of thermal degradation of polyvinylchloride (PVC), *Polymer Degradation and Stability*, 176 (2020). URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109148> (дата обращения: 29.04.2022).
18. Xu Z., Kolapkar S.S., Zinchik S., Bar-Ziv E., Ewurum L., McDonald A.G., Klinger J., Fillerup E., Schaller K., Pilgrim C. Bypassing Energy Barriers in Fiber-Polymer Torrefaction, *Frontiers in Energy Research*, 9 (2021). URL: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.643371> (дата обращения: 29.04.2022).
19. Galadima A., Muraza O. Waste to liquid fuels: potency, progress and challenges // *International Journal of Energy Research*. 2015. № 39. P. 1451-1478.
20. Bauen A., Bitossi N., German L., Harris A., Leow K. Sustainable Aviation Fuels Status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in 13 aviation, *Johnson Matthey Technology Review*, 64 (2020). P. 263-278. URL: <https://doi.org/10.1595/205651320x1581675601204> (дата обращения: 29.04.2022).
21. Li Q.Y., Faramarzi A., Zhang S., Wang Y., Hu X., Gholizadeh M. Progress in catalytic pyrolysis of municipal solid waste, *Energy Conversion and Management*, 226 (2020). URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113525> (дата обращения: 29.04.2022).
22. Arena U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review, *Waste Manag*, 32 (2012). P. 625-639. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025> (дата обращения: 29.04.2022).
23. Chen W.H., Peng J., Bi X.T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. V. 44. P. 847-866.
24. Nurminen F. Environmental impacts of torrefied wood pellet production // *Energy*. 2012. V. 475. P. 500-600.
25. Kupaei R.H., Alengaram U.J., Jumaat M.Z. The effect of different parameters on the development of compressive strength of oil palm shell geopolymer concrete *Sci. World J.* (2014).
26. Yew M.K., Mahmud H.B., Ang B.C., Yew M.C. Effects of heat treatment on oil palm shell coarse aggregates for high strength lightweight concrete *Mater. Des.*, 54 (2014) (1980-2015). P. 702-707.

References

1. Andreev A.A. Resource conservation and use of waste from harvesting and processing of wood raw materials // *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: problemy i rezul'taty*. 2014. № 10. P. 148-155.
2. Valiullina A.I., Bikbulatova G.M., Valeeva A.R. Separation of liquid pyrolysis products of lignocellulose biomass in order to obtain biopolyol // *Problemy mekhaniki cellyulozno-bumazhnyh materialov: materialy VI Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf., posvyashch. pamyati prof. V.I. Komarova (9-11 sent. 2021 g.)*. Arhangel'sk: SAFU, 2021. P. 368-371.
3. Haziakhmedova R.M., Bashkirov V.N., Grachev A.N. Thermal modification of lignocellulose raw materials in the production of composite materials // *Problemy mekhaniki cellyulozno-bumazhnyh materialov: materialy VI Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf., posvyashch. pamyati prof. V.I. Komarova (9-11 sent. 2021 g.)*. Arhangel'sk: SAFU, 2021. P. 378-382.
4. Valeeva A.R., Sabirzyanova A.I., Bikbulatova G.M., Zabelkin S.A. The strength of phenol-formaldehyde resin modified by liquid pyrolysis products of wood, depending on the use of its various fractions // *Himiya i himicheskaya tekhnologiya v XXI veke: materialy XXII Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. studentov i molodyh uchenyh posvyashch. 125-letiyu so dnya osnovaniya Tomskogo politekhn. un-ta (17-20 maya 2021 g.)*. Tomsk: Nac. issled. Tomskij politekhn. un-t, 2021. P. 240-241.
5. Zaprudnov V.I., Sanaev V.G. Macroscopic properties of wood-cement composites // *Moscow state forest university bulletin - Lesnoy vestnik*. 2012. № 6 (89). P. 168-171.
6. Nanazashvili I.H. Building materials made of wood-cement composition. L.: Strojizdat, 1990. 415 p.
7. Sabirzyanova A.I., Valeeva A.R., Bikbulatova G.M., Haziakhmedova R.M. Destruction of polyurethane foam modified with biopolyols under the influence of artificially created climatic factors // *Molodezh' i XXI vek - 2021: materialy XI Mezhdunar. molodezhnoj nauch. konf. (18-19 fevr. 2021 g.)*. Kursk, 2021. P. 382-385.
8. Posharnikov F.V., Filichkina M.V. Analysis of the structure of a mixture for sawdust concrete based on multifactorial planning of the experiment // *Moscow state forest university bulletin - Lesnoy vestnik*. 2010. № 1. P. 111-114.
9. Haziakhmedova R.M., Grachev A.N., Pushkin S.A., Bashkirov V.N. Physical and mechanical properties of sawdust concrete with torrefied wood filler // *Derevoobrabativatshaya promishlennost' (Woodworking industry)*. 2019. № 3. P. 54-60.
10. Haziakhmedova R.M., Grachev A.N., Bashkirov V.N. Interaction of the adhesive with the substrate surface in composite materials based on lignocellulose raw materials // *Industrial production and use elastomers*. 2021. № 3. P. 58-62.
11. Acharya B., Sule I., Dutta A. A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2 (2012). P. 349-369. URL: <https://doi.org/10.1007/s13399-012-0058-y> (дата обращения: 29.04.2022).
12. Campuzano F., Brown R.C., Martinez J.D. Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 102 (2019). P. 372-409. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.014> (дата обращения: 29.04.2022).
13. Felfli F.F., Luengo C.A., Suarez J.A. Wood briquette torrefaction // *Energy Sustain Develop*. 2005. V. 9 (3). P. 19-22.
14. Prins M.J., Ptasincki K.J., Janssen F.J.J.G. More efficient biomass gasification via torrefaction // *Energy*. 2006. V. 31 (15). P. 3458e70.

15. Mamvura T.A., Danha G. Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production, *Heliyon*, 6 (2020).
16. Cherubini F., Strømman A.H. Chapter 1 - Principles of Biorefining, in: A. Pandey, C. Larroche, S.C. Ricke, C.-G. Dussap, E. Gnansounou (Eds.) *Biofuels*, Academic Press, Amsterdam, 2011. P. 3-24.
17. Xu Z., Kolapkar S.S., Zinchik S., Bar-Ziv E., McDonald A.G. Comprehensive kinetic study of thermal degradation of polyvinylchloride (PVC), *Polymer Degradation and Stability*, 176 (2020). URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109148> (data obrashcheniya: 29.04.2022).
18. Xu Z., Kolapkar S.S., Zinchik S., Bar-Ziv E., Ewurum L., McDonald A.G., Klinger J., Fillerup E., Schaller K., Pilgrim C. Bypassing Energy Barriers in Fiber-Polymer Torrefaction, *Frontiers in Energy Research*, 9 (2021). URL: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.643371> (data obrashcheniya: 29.04.2022).
19. Galadima A., Muraza O. Waste to liquid fuels: potency, progress and challenges // *International Journal of Energy Research*. 2015. № 39. P. 1451-1478.
20. Bauen A., Bitossi N., German L., Harris A., Leow K. Sustainable Aviation Fuels Status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in 13 aviation, *Johnson Matthey Technology Review*, 64 (2020). P. 263-278. URL: <https://doi.org/10.1595/205651320x1581675601204> (data obrashcheniya: 29.04.2022).
21. Li Q.Y., Famarzi A., Zhang S., Wang Y., Hu X., Gholizadeh M. Progress in catalytic pyrolysis of municipal solid waste, *Energy Conversion and Management*, 226 (2020). URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113525> (data obrashcheniya: 29.04.2022).
22. Arena U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review, *Waste Manag*, 32 (2012). P. 625-639. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025> (data obrashcheniya: 29.04.2022).
23. Chen W.H., Peng J., Bi X.T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. V. 44. P. 847-866.
24. Nurminen F. Environmental impacts of torrefied wood pellet production // *Energy*. 2012. V. 475. P. 500-600.
25. Kupaei R.H., Alengaram U.J., Jumaat M.Z. The effect of different parameters on the development of compressive strength of oil palm shell geopolymer concrete *Sci. World J.* (2014).
26. Yew M.K., Mahmud H.B., Ang B.C., Yew M.C. Effects of heat treatment on oil palm shell coarse aggregates for high strength lightweight concrete *Mater. Des.*, 54 (2014) (1980-2015). P. 702-707.