

Переработка древесных и полимерных отходов с получением композиционного материала для строительной теплоизоляции

А.С. Акимова, Е.С. Пикалов

Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых

Аннотация: В работе представлены результаты экспериментов по получению композиционного материала с использованием мелкокусковых древесных отходов на основе мягких сортов древесины и отходов изделий из непластифицированного поливинилхлорида. Дополнительным компонентом сырьевой смеси являлся метиленхлорид, в котором растворяли полимерные отходы. Раствор перемешивали с наполнителем, а затем проводили прессование и удаление растворителя при температуре его кипения. Установлено, что повышение степени наполнения исследуемого материала способствует формированию развитой пористой структуры. Выявлено влияние повышения пористости на основные эксплуатационные свойства, в первую очередь теплопроводность и водостойкость. Определено, что степень наполнения, равная 55 мас. %, позволяет получить материал с наиболее эффективным сочетанием значений основных свойств для применения в качестве строительной теплоизоляции. Практическое применение результатов работы дает возможность производить теплоизоляционный материал низкой стоимости за счет совместной утилизации разнородных отходов.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, теплоизоляционный материал, полимерные отходы, древесные отходы, поливинилхлорид, метиленхлорид

Введение

В современном мире во всех областях человеческой деятельности с каждым годом всё большую актуальность приобретают задачи энергоэффективности и энергосбережения. Эти задачи заключаются в уменьшении расходов энергии и энергетических ресурсов, а также в уменьшении потерь энергии для достижения конкретных целей ее применения. Важность этих задач усиливается в условиях увеличения объемов производства и роста населения с одной стороны, и ограниченности природных ресурсов, повышения цен на них и получаемую энергию с другой стороны [1-3]. Стоит учесть и тот факт, что уменьшение энергопотребления способствует уменьшению выбросов в окружающую среду, снижению объемов добычи и переработки ресурсов, что позволяет уменьшить общую антропогенную нагрузку.

Одним из основных и наиболее востребованных видов энергии является тепловая, которая применяется не только для отопления, но и для различных технологических задач, таких как нагрев, плавление, выпаривание и др. К потребителям тепла относятся санитарно-технические системы жилых, общественных и промышленных зданий, а также оборудование и установки. В случае, когда речь идет об эксплуатации зданий тепло расходуется на отопление, горячее водоснабжение, системы вентиляции и кондиционирования воздуха. При этом расходы тепловой энергии могут быть как сезонными, повышаясь в холодное время года, так и круглогодичными [4-6].

Потери тепловой энергии снижаются за счет теплоизоляционных материалов, которые препятствуют теплообмену изолируемого объема с окружающей средой за счет своей низкой теплопроводности [7-9]. Теплоизоляцию применяют как для систем транспортировки теплоносителей, так и для объема помещения или агрегата, являющегося потребителем тепловой энергии. Наименьшими показателями теплопроводности и плотности, а, следовательно низкой массой изделий и малой нагрузкой на конструкции, характеризуются материалы на органической основе, в первую очередь полимерные. Основными ограничивающими факторами их повсеместного применения являются низкая термостойкость и горючесть, поэтому эти материалы чаще применяют для строительной теплоизоляции и при отсутствии высоких температур для технической теплоизоляции [10-12].

В то же время наилучшим сочетанием эксплуатационных характеристик для теплоизоляции, как и в большинстве других сфер применения, обладают композиционные материалы, включая полимерно-матричные композиты [11, 13, 14]. Однако из-за сравнительно высокой стоимости компонентов и себестоимости технологий эти материалы не получили широкого применения. Значительно уменьшить себестоимость

композиционных материалов можно при помощи использования отходов для их производства, что кроме экономических преимуществ позволяет снизить антропогенную нагрузку и уровень загрязнения окружающей среды.

Целью данной работы является исследование зависимости свойств материала для строительной теплоизоляции от соотношения компонентов сырьевой смеси на основе древесных и полимерных отходов.

Объекты и методы исследования

Наполнителем в составе сырьевой смеси являлись измельченные и высушенные до постоянной массы отходы в виде опилок, стружки, щепы, сучьев и прочих мелкокусковых древесных отходов, преимущественно на основе мягких сортов древесины, таких как сосна, ель, липа, осина, береза и др. Подобного рода отходы практически не находят применения в других областях, поэтому поиск путей их переработки является актуальным [15, 16].

Связующим в составе сырьевой смеси являлся вторичный непластифицированный поливинилхлорид, который получали путем растворения отходов производства и потребления стыковочных профилей, плинтусов и отделочных стеновых панелей. Переработка подобных полимерных отходов затрудняется наличием в них примесей, частичной деструкцией и низкой термостабильностью данного полимера [17, 18].

Для растворения измельченных полимерных отходов применяли метиленхлорид первого сорта по ГОСТ 9968-86 с содержанием основного компонента не менее 98,8 мас. %. Растворение полимера обеспечивает большую однородность сырьевой смеси, существенно уменьшает энергоемкость технологии и позволяет исключить термодеструкцию полимера за счет нагрева только на последней стадии производства при температуре намного ниже начала деструкции (около 180-220 °С) [19, 20]. Для снижения расхода растворителя при практическом использовании

данной сырьевой смеси предполагается конденсация паров растворителя для многократного использования [20].

Перед использованием отходы отдельно высушивали до постоянной массы и измельчали, отбирая фракцию до 2 мм для древесных и до 0,63 мм для полимерных отходов. Затем полимерные отходы растворяли в метиленхлориде при соотношении полимер: растворитель = 1: 1,6, которое было экспериментально установлено ранее [17], до получения гомогенного раствора. После этого перемешивали наполнитель и раствор до однородной сырьевой смеси, из которой при давлении 8 МПа получали образцы с последующими термообработкой при 45-50 °С в течение 45 мин для удаления растворителя и кондиционированием в течение 24 ч.

У образцов определяли кажущуюся (среднюю) плотность (ρ , кг/м³), прочность на изгиб ($\sigma_{изг}$, МПа), водопоглощение (B , %) и набухание по толщине (H_T , %) по ГОСТ 10633-2018, прочность на сжатие ($\sigma_{сж}$, МПа), коэффициент водостойкости (K_B) и морозостойкость (M , циклы) по ГОСТ 12801-98, открытую, закрытую и общую пористость (Π , %) по ГОСТ 12730.4-2020, теплопроводность (λ , Вт/(м·°С)) по ГОСТ 30256-94.

Результаты и обсуждение

В результате выполненных исследований выявили, что повышение содержания наполнителя в составе материала способствует повышению общей и открытой пористости, причем этот эффект становится более выраженным при степени наполнения более 55 мас. % (см. рис. 1). Это связано с волокнистой структурой древесных частиц, обладающих собственной пористостью, и образованием пор на неровностях поверхности частиц, в которые связующее не может проникнуть из-за вязкости. Рост открытой пористости связан с уменьшением количества связующего, что повышает долю свободного объема и нарушает сплошность слоев связующего в объеме материала, формируя развитую пористую структуру.

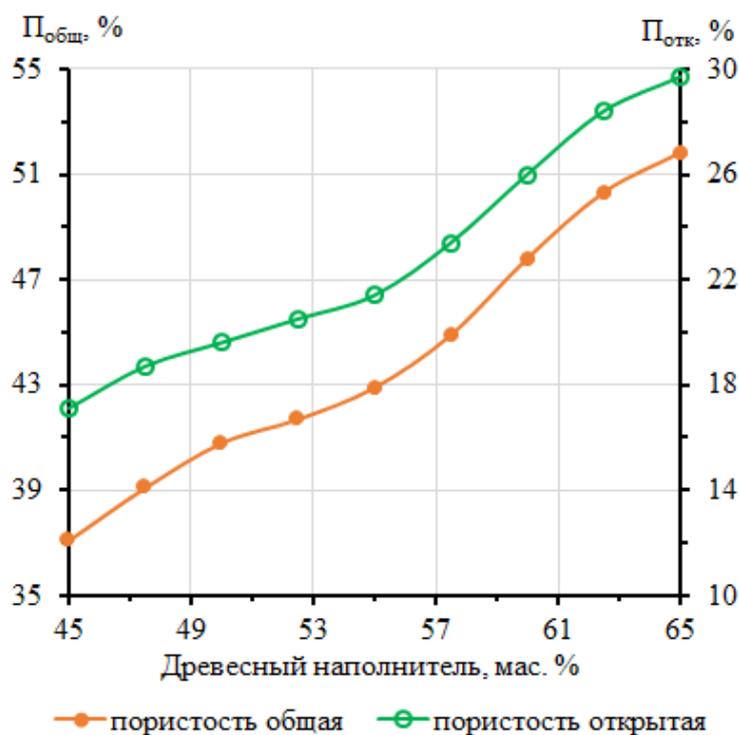


Рис. 1. Зависимость пористости от соотношения наполнителя и связующего в материале

Повышение пористости в свою очередь приводит к уменьшению плотности и теплопроводности исследуемого материала (см. рис. 2), что является преимуществом для его применения при теплоизоляции. Вместе с тем повышение пористости и увеличение содержания наполнителя понижает прочностные характеристики (см. рис. 3). Это связано не только с тем, что поры являются концентраторами напряжений, приводящими к разрушению при нагрузках, но и с тем, что уменьшается количество связующего. Сокращение доли полимерной матрицы понижает площадь соприкосновения между связующим и наполнителем, а также толщину полимерных прослоек между частицами наполнителя, что уменьшает площадь каркаса композиционного материала. Более высокая прочность на изгиб исследуемого материала объясняется формой и размером частиц древесного наполнителя, которые лучше воспринимают изгибающие нагрузки.

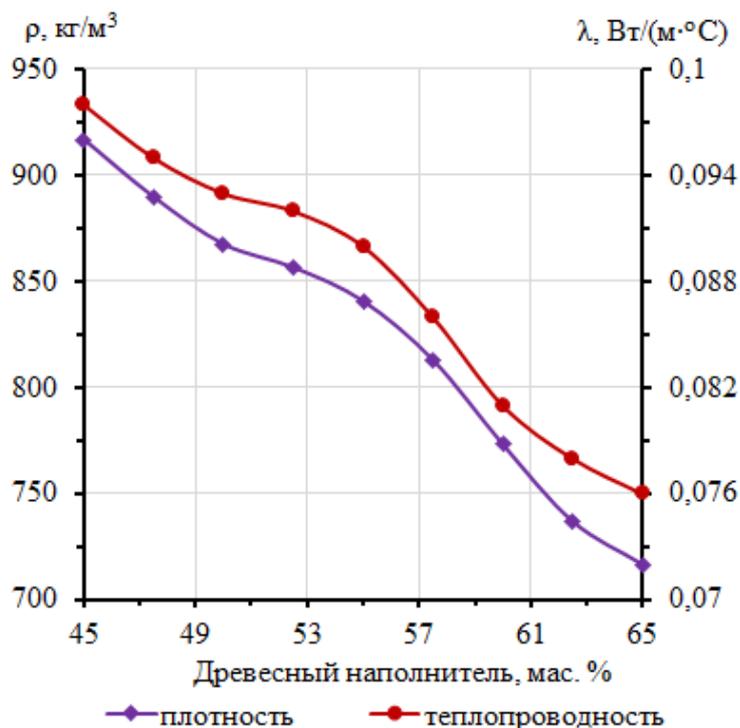


Рис. 2. Зависимость плотности и теплопроводности от соотношения наполнителя и связующего в материале

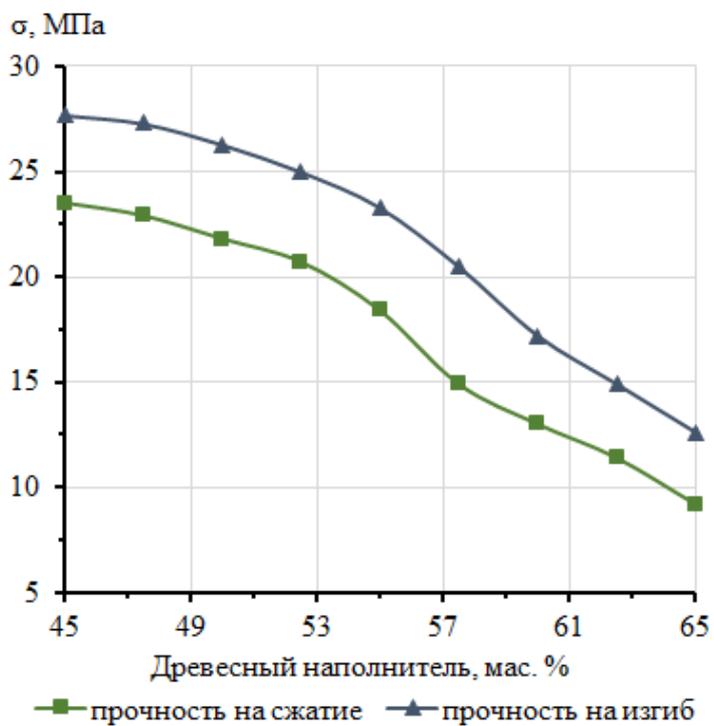


Рис. 3. Зависимость прочности от соотношения наполнителя и связующего в материале

Рост открытой пористости повышает водопоглощение, что, в свою очередь, понижает морозостойкость материала (см. рис. 4).

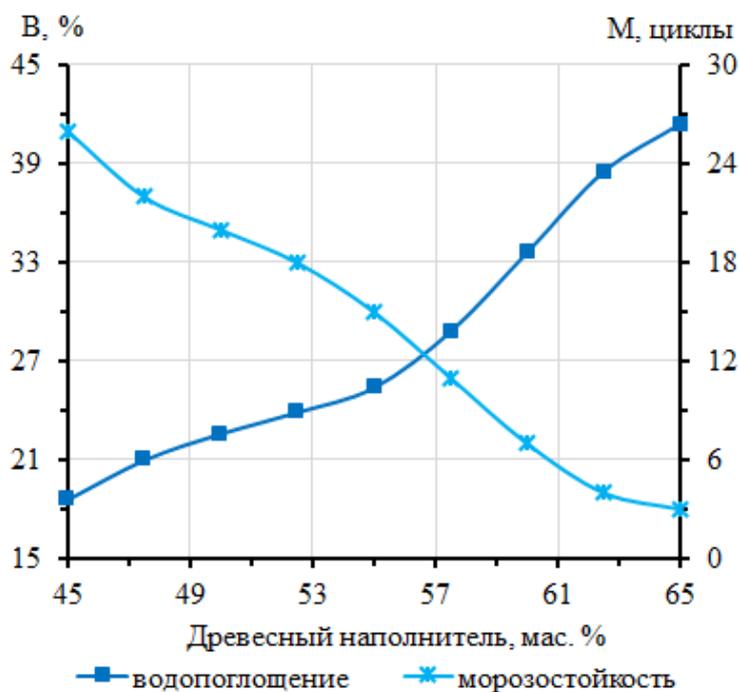


Рис. 4. Зависимость водопоглощения и морозостойкости от соотношения наполнителя и связующего в материале

Кроме влияния доли открытых пор, такой характер зависимостей объясняется тем, что повышение количества наполнителя, как упоминалось ранее, уменьшает площадь контакта связующего и наполнителя, а связующее изолирует частицы наполнителя от контакта с влагой. При прямом контакте древесные частицы достаточно интенсивно насыщаются влагой. В случае перехода к отрицательным температурам вода при замерзании расширяется и создает внутренние напряжения, поэтому, чем выше водопоглощение, тем ниже морозостойкость, что и подтверждается экспериментальными данными.

Контакт наполнителя с водой и его переход в водонасыщенное состояние вызывает набухание, сопровождающееся внутренними напряжениями, которые приводят к нарушению правильности формы

образца, трещинообразованию, разрывам в сплошности каркаса внутри материала и понижению адгезионных сил взаимодействия между наполнителем и связующим. Это приводит к уменьшению прочностных характеристик материала в результате поглощения влаги. Как следствие, повышение количества наполнителя, относящегося к гидрофильным материалам, понижает коэффициент водостойкости и повышает набухание по толщине (см. рис. 5), причем изменение свойств становится более выраженным при степени наполнения более 55 мас. %.

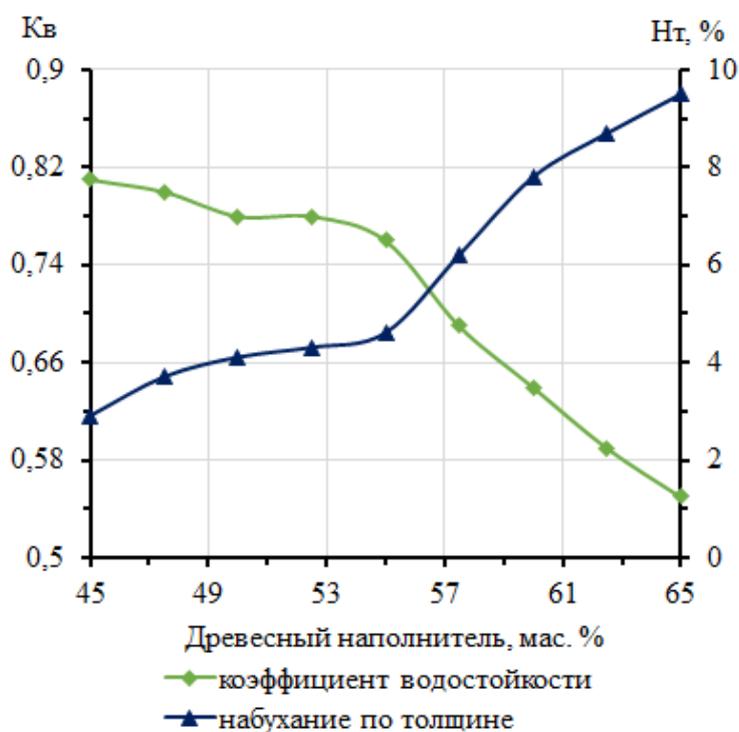


Рис. 5. Зависимость водостойкости и набухания по толщине от соотношения наполнителя и связующего в материале

Исходя из полученных в данной работе результатов, степень наполнения получаемого композиционного материала решили ограничить 55 мас. %. Это позволяет значительно снизить плотность и теплопроводность при сравнительно небольших потерях в прочности и водостойкости.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что композиционный материал для строительной теплоизоляции со степенью наполнения 55 мас. % может быть получен на основе сырьевой смеси, включающей 32 мас. % древесных отходов, 26,2 мас. % отходов изделий из непластифицированного поливинилхлорида и 41,8 мас. % метилхлорида.

Древесный наполнитель за счет формы и структуры частиц повышает пористость изделий, что позволяет уменьшить значения пористости и теплопроводности. Однако, при степени наполнения более 55 мас. %, существенно интенсифицируются процессы роста водопоглощения, падения прочности и водостойкости, что может быть связано с недостатком связующего в объеме материала. В то же время степень наполнения 55 мас. % позволяет получить композиционный материал с достаточно низкой плотностью ($\rho = 840,7 \text{ кг/м}^3$) и хорошими теплоизоляционными характеристиками ($\lambda = 0,09 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$).

Полученный материал может быть использован для теплоизоляции внутри помещений с достаточно сухим климатом. В иных случаях для его эффективной эксплуатации необходимо наличие гидроизоляции. Практическое применение позволит производить теплоизоляционный материал низкой стоимости за счет переработки маловостребованных в других технологиях утилизации отходов из низкосортной древесины и отходов потребления на основе нетермостабильного полимера.

Литература

1. Димитрюк Ю.С., Присс О.Г. Повышение энергоэффективности промышленных и гражданских зданий в Ставропольском крае // Инженерный вестник Дона. 2022. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8016

2. Торлова А.С., Виткалова И.А., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Разработка энергоэффективной облицовочной керамики на основе местного

сырья и стекольного боя // Экология промышленного производства. 2019. № 3. С. 22-26.

3. Feng C., Wang M., Zhang Y., Liu G.-C. Decomposition of energy efficiency and energy-saving potential in China: A three-hierarchy meta-frontier approach // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 176. P. 1054-1064.

4. Колосов М.В., Липовка Ю.Л., Шишкова Е.Е. Анализ систем управления теплотреблением зданий // Строительство и техногенная безопасность. 2023. № 29. С. 97-106.

5. Некрасов А.С., Синяк Ю.В., Воронина С.А., Семикашев В.В. Современное состояние теплоснабжения России // Проблемы прогнозирования. 2011. № 1 (124). С. 30-43.

6. Mi P., Zhang J., Han Y., Guo X. Study on energy efficiency and economic performance of district heating system of energy saving reconstruction with photovoltaic thermal heat pump // Energy Conversion and Management. 2021. Vol. 247. Article 114677.

7. Тарасенко В.Н., Денисова Ю.В. Проблема энергосбережения в России // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 63-68.

8. Зайцева А.А., Зайцева Е.И., Коровяков В.Ф. Повышение энергоэффективности за счет тепловой изоляции трубопроводов // Строительные материалы. 2015. № 6. С. 42-44.

9. Peng L., Chao L., Xu Z., Yang H., Zheng D., Wei B., Sun C., Cui H. High-efficiency energy-saving buildings utilizing potassium tungsten bronze heat-insulating glass and polyethylene glycol/expanded energy storage blanket // Energy. 2022. Vol. 255. Article 124585.

10. Колосова А.С., Пикалов Е.С. Современные эффективные теплоизоляционные материалы на органической основе // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 4. С. 74-85.

11. Павлычева Е.А. Исследование физико-механических свойств полимерного теплоизоляционного покрытия пониженной плотности // Инженерный вестник Дона. 2020. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2020/6427

12. Feng T., Rai A., Hun D., Shrestha S.S. Molecular dynamics simulations of energy accommodation between gases and polymers for ultra-low thermal conductivity insulation // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 164. Article 120459.

13. Бабашов В.Г., Варрик Н.М., Карасева Т.А. Применение аэрогелей для создания теплоизоляционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 6. С. 32-42.

14. Schmid E.D., Salem D.R. Fabrication technique and thermal insulation properties of micro- and nano-channeled polymer composites // Acta Astronautica. 2015. Vol. 116. P. 68-73.

15. Мохирев А.П., Безруких Ю.А., Медведев С.О. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса, как фактор устойчивого природопользования // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2-2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3011

16. Романенко И.И., Романенко М.И. Эффективное использование природного потенциала деревообрабатывающими предприятиями строительной индустрии // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4647

17. Филиппова Л.С., Акимова А.С., Пикалов Е.С. Совместная утилизация полимерных и кирпичных отходов для получения облицовочного композиционного материала // Инженерный вестник Дона. 2023. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8534

18. Волкова К.В., Носенко Т.Н., Успенская М.В., Белухичев Е.В., Сивцов Е.В. Исследование термических характеристик полимерных

композитов на основе поливинилхлорида // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2017. № 40. С. 55-60.

19. Торлова А.С., Виткалова И.А., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Утилизация керамических и полимерных отходов в производстве облицовочных композиционных материалов // Экология и промышленность России. 2019. №7. С. 36-41.

20. Колосова А.С., Сокольская М.К., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. Современные методы получения полимерных композиционных материалов и изделий из них // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 8. С. 123-129.

References

1. Dimitryuk Yu.S., Priss O.G. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8016

2. Torlova A.S., Vitkalova I.A., Pikalov E.S., Selivanov O.G. Ekologiya promyshlennogo proizvodstva. 2019. № 3. pp. 22-26.

3. Feng C., Wang M., Zhang Y., Liu G.-C. Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 176. pp. 1054-1064.

4. Kolosov M.V., Lipovka Yu.L., Shishkova E.E. Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. 2023. № 29. pp. 97-106.

5. Nekrasov A.S., Sinyak Yu.V., Voronina S.A., Semikashev V.V. Problemy prognozirovaniya. 2011. № 1 (124). pp. 30-43.

6. Mi P., Zhang J., Han Y., Guo X. Energy Conversion and Management. 2021. Vol. 247. Article 114677.

7. Tarasenko V.N., Denisova Yu.V. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova. 2016. № 11. pp. 63-68.

8. Zajceva A.A., Zajceva E.I., Korovyakov V.F. Stroitel'nye materialy. 2015. № 6. pp. 42-44.



9. Peng L., Chao L., Xu Z., Yang H., Zheng D., Wei B., Sun C., Cui H. Energy. 2022. Vol. 255. Article 124585.
10. Kolosova A.S., Pikalov E.S. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. 2021. № 4. pp. 74-85.
11. Pavlycheva E.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2020/6427
12. Feng T., Rai A., Hun D., Shrestha S.S. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 164. Article 120459.
13. Babashov V.G., Varrik N.M., Karaseva T.A. Trudy VIAM. 2019. № 6. pp. 32-42.
14. Schmid E.D., Salem D.R. Acta Astronautica. 2015. Vol. 116. pp. 68-73.
15. Mohirev A.P., Bezrukih Yu.A., Medvedev S.O. Inzhenernyj vestnik Dona. 2015. № 2-2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3011.
16. Romanenko I.I., Romanenko M.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4647.
17. Filippova L.S., Akimova A.S., Pikalov E.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8534.
18. Volkova K.V., Nosenko T.N., Uspenskaya M.V., Beluhichev E.V., Sivcov E.V. Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta). 2017. № 40. pp. 55-60.
19. Torlova A.S., Vitkalova I.A., Pikalov E.S., Selivanov O.G. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2019. №7. pp. 36-41.
20. Kolosova A.S., Sokol'skaya M.K., Vitkalova I.A., Torlova A.S., Pikalov E.S. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. 2018. № 8. pp. 123-129.

Дата поступления: 2.07.2024 Дата публикации: 8.08.2024
