

УДК 666.973.2

DOI 10.52928/2070-1683-2023-34-2-10-22

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОРЫ ЭВКАЛИПТА В КАЧЕСТВЕ СТРУКТУРООБРАЗУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

*канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ,  
канд. техн. наук, доц. Н.В. БАКАТОВИЧ, Р.Л. ОБРОМПАЛЬСКИЙ  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)  
PhD, проф. Ф. ГАСПАР  
(Политехнический институт г. Лейрии, Португалия)*

*Результаты исследования волокон коры эвкалипта в качестве структурообразующего материала подтверждают возможность использования такого сырья для производства тепловой изоляции. С помощью электронного микроскопа изучена микроструктура коры и волокон коры, что позволяет объяснить механизмы, обеспечивающие теплоизоляционные свойства волокон. В зависимости от технологических операций на стадии подготовки волокон (механическое измельчение, варка в растворе золы, карбонизация) и использования вяжущего коэффициент теплопроводности тепловой изоляции изменяется в пределах 0,036–0,059 Вт/(м·°С) при плотности 80–220 кг/м<sup>3</sup>. Образцы на основе волокон коры эвкалипта демонстрируют достаточно низкую сорбционную влажность для материалов на растительном сырье. При относительной влажности воздуха 60% сорбция составляет 9,4–14,5%, а при относительной влажности воздуха 97% достигает 21,6–38,5%. Также образцы обеспечивают высокую стойкость к появлению грибка на волокнах коры эвкалипта во влажном состоянии, что свидетельствует о долговечности структурообразующего материала в процессе эксплуатации тепловой изоляции.*

**Ключевые слова:** коэффициент теплопроводности, плотность, сорбционная влажность, волокно коры эвкалипта, жидкое стекло, карбонизация.

**1. Введение.** Тепловой изоляции зданий в настоящее время уделяется повышенное внимание, включая экологический аспект самих утеплителей. Широко применяемые материалы на основе полимеров и минеральной ваты не обеспечивают экологической безопасности для окружающей среды и человека. В этой связи значительный интерес вызывает разработка утеплителей на основе растительного сырья, в том числе использование коры различных пород древесины в качестве структурообразующего материала для производства тепловой изоляции. Ряд исследований посвящен получению тепловой изоляции на основе измельченной фракционированной сосновой коры. Разновидности сосны распространены по всему миру и таким образом сосновая кора является многотоннажным легкодоступным отходом лесопереработки.

Возможность получения изоляционных плит на основе коры сосны исследовалась в работе [1]. Для изготовления плит использовали фракции коры с размерами частиц 8–30 мм. В качестве вяжущего компонента применяли мочевиноформальдегидную смолу, вводимую в количестве 8–12%. Коэффициент теплопроводности плит варьировался в пределах 0,059–0,089 Вт/(м·°С) при плотности от 200 до 550 кг/м<sup>3</sup>.

В исследованиях [2] сосновую кору предварительно смешивали с тонкомолотыми частицами базальта и использовали в качестве засыпной теплоизоляции. Коэффициент теплопроводности для модифицированной коры различных фракций изменялся в диапазоне от 0,047 до 0,058 Вт/(м·°С). Присутствие частиц базальта улучшало акустические свойства и снижало горючесть коры.

Научная лаборатория «Greenconstruction» Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой проводила испытания плитного теплоизоляционного материала на основе измельченной коры сосны с использованием двух видов вяжущего: модифицированное натриевое жидкое стекло и канифоль из смолы сосны. При использовании жидкого стекла получали жесткие плиты с коэффициентом теплопроводности 0,057–0,068 Вт/(м·°С) при плотности 420–470 кг/м<sup>3</sup>. Применение порошка канифоли позволило формировать жесткие плиты со средней плотностью 277–330 кг/м<sup>3</sup> при коэффициенте теплопроводности 0,051–0,059 Вт/(м·°С) [3].

Изучение влияния вида заполнителя на коэффициент теплопроводности спрессованных плит на основе коры хвойных и лиственных пород древесины рассматривалось в работе [4]. Результаты опытов показали, что кора, полученная из лиственных пород, обладала пониженными показателями теплопроводности в сравнении с хвойными. Самый низкий коэффициент теплопроводности, равный 0,061 Вт/(м·°С), зафиксирован на коре белой акации.

В лаборатории университета Уцуномия (Япония) исследовалась возможность получения теплоизоляционного материала из обработанной коры суги (криптомерии японской). Кора высушивалась, после чего механически измельчалась до волокнообразного состояния. Коэффициент теплопроводности экспериментальных плит составил 0,073–0,076 Вт/(м·°С) при плотности 163,2–193,5 кг/м<sup>3</sup> [5].

На основе агломерата коры пробкового дуба выпускаются изоляционные панели и плиты. Изоляционные плиты из агломерата имеют следующие технологические характеристики: средняя плотность – 150 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности равен 0,038 Вт/(м·°С). Основным недостатком данного материала является высокая рыночная стоимость<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Барболина Н.Н., Кокшарова Е.А., Туева Т.В. Многофункциональная пробковая теплоизоляция // Череповецкие научные чтения – 2012: материалы Всероссийской науч.-практ. конф., Череповец, 01–02 нояб. 2012 г. / Череповецкий гос. ун-т; под ред. Н.П. Павлова. – Череповец, 2013. – С. 19–21.

У международной команды исследователей из научной лаборатории «Greenconstruction» значительный интерес вызвала кора эвкалипта как исходное сырье для получения структурообразующего материала тепловой изоляции. Посадки эвкалипта занимают около 20 миллионов гектаров в более чем 90 странах мира с основными центрами в Бразилии (5,7 млн га), Индии (3,9 млн га) и Китае (4,5 млн га). Высокое качество древесины и быстрота роста обуславливают выращивание эвкалиптовых плантаций в коммерческих целях для получения промышленной продукции (целлюлозно-бумажная промышленность, древесный уголь, пиломатериалы, ткани, сорбенты, противовоспалительные препараты), а также на небольших лесных участках для производства дров и древесного угля для бытовых нужд<sup>2</sup> [6].

Известен опыт учёных из университета Консепсьон в Чили, проводивших исследования по использованию коры эвкалипта в качестве наполнителя для изоляции. Исходным сырьем для изоляционных плит служили механически измельченные волокна коры эвкалипта длиной, не превышающей 20 мм. В качестве вяжущего вещества использовали фенолформальдегидную смолу. Теплопроводность изоляционного материала варьировалась в пределах 0,052–0,07 Вт/(м·°С) при плотности от 80 до 250 кг/м<sup>3</sup>, толщина плит составляла 50 мм<sup>3</sup>. В исследованиях отмечается, что полученные составы имеют низкую стойкость к появлению плесени и являются горючими. Кроме того, использование связующего на основе фенолформальдегида негативно сказывается на здоровье человека и окружающей среде. Полученные результаты по коэффициенту теплопроводности не в полной мере отражают потенциал коры эвкалипта как эффективной тепловой изоляции. В приведенных ниже исследованиях ставилась задача получения эффективной тепловой изоляции на основе волокон коры эвкалипта, обеспечивающей экологическую безопасность.

**2. Материалы и методы испытаний.** В качестве структурообразующего материала для тепловой изоляции использовали кору эвкалипта (лат. *Eucalyptus*), собранную в эвкалиптовых рощах, расположенных вблизи города Лейрия (Португалия).

При производстве целлюлозы из эвкалипта образуются большие объемы отходов в виде листьев, ветвей, корней, коры и древесной щепы. При этом на кору приходится 10–12% от общей массы отходов. Следовательно, на 100 тонн целлюлозы приходится 10–12 тонн коры [7–9]. Ежегодный естественный сброс коры эвкалипта дополняет объем материала, доступного для переработки и использования как структурообразующего сырья для производства тепловой изоляции [10]. Таким образом, кора эвкалипта представляет интерес в качестве доступного много-тоннажного сырья для производства теплоизоляционных материалов.

Для получения волокон кору механически перерабатывали с помощью измельчителя «Эликор 1». Размер частиц на выходе контролировали установленным в измельчителе ситом с диаметром ячеек 5 мм. После измельчения волокнистая масса подвергалась фракционированию через сита с ячейками диаметром 0,16–5 мм.

В отдельной серии образцов структурообразующий материал представлял собой смесь волокон коры и пшеничной соломы. Предварительно пшеничная солома перерабатывалась на измельчителе «Эликор 1». В исследованиях использовали фракцию частиц соломы в виде пластинок длиной 5–8 мм, шириной 1–1,5 мм и толщиной менее 1 мм.

В качестве связующего при формировании экспериментальных теплоизоляционных плит использовали натриевое жидкое стекло производства ОАО «Домановский промышленно-торговый комбинат». Натриевое жидкое стекло выпускается по требованиям ГОСТ 13078. Для обеспечения водостойкости жидкое стекло модифицировали известью и гипсом в количестве 5% от массы твердого вещества вяжущего.

Для определения основных параметров микроструктуры коры, оказывающих влияние на теплоизоляционные свойства материала, использовали метод электронной микроскопии. С этой целью образцы коры эвкалипта исследовали на электронном микроскопе JSM-5610 LV.

Основные физические показатели теплоизоляционных плит – плотность и влажность – измеряли в соответствии с ГОСТ 17177. Коэффициент теплопроводности экспериментальных составов определяли по стандарту EN 12667 на образцах размером 250×250×30 мм. В каждой серии испытывали 5 образцов.

<sup>2</sup> Adams M., Rennenberg H., Kruse J. Resilience of primary metabolism of eucalypts to variable water and nutrients // *Eucalyptus 2018: Managing Eucalyptus Plantations under Global Changes*, 17–21 September 2018. – France, 2018. – P. 100–104.

Исследование устойчивости к старению целлюлозы из древесины эвкалипта / О.Т. Чебанова, Е.С. Быстрова, Е.М. Лоцманова и др. // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. молодых учёных и специалистов ЦБП, Санкт-Петербург, 23 нояб. 2020 г. / ВШТЭ СПбГУПТД; редкол.: О.В. Фёдорова, А.Г. Кузнецов. – СПб., 2020. – Т. 1. – С. 114–117.

Арсеньева Е.П., Гусева М.А., Андреева Е.Г. Нанотехнологии в легкой промышленности // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2020): сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 12 нояб. 2020 г. / Российский гос. ун-т им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство); редкол.: В.С. Белгородский и др. – М., 2020. – Ч. 1. – С. 211–215.

Противовоспалительная композиция пролонгированного действия для лечения дыхательных путей: пат. RU 2608126 С / П.Г. Мизина, Н.И. Сидельников, И.Н. Зилфикаров, А.В. Леонтьев, С.Н. Суслина, П.М. Массе. – Опубл. 13.01.2017.

<sup>3</sup> A new biobased composite material using bark fibres eucalyptus / C. Fuentealba, J. Salazar, J. Vega-Lara et al. // The 13th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium "Bio-based composites for a sustainable future", Concepcion, 13–15 November 2016 / University of Concepcion. – Chile, 2016. – P. 46–50.

На первом этапе исследований коэффициент теплопроводности измеряли для волокон коры различных фракций в насыпном состоянии без вяжущего компонента. Необходимый объем волокон коры засыпали и равномерно распределяли в измерительной камере прибора «ИТП–МГ4» между теплой плитой (40 °С) и холодной плитой (10 °С) для определения коэффициента теплопроводности ( $\lambda_{25}$ ).

Во второй серии образцов использовали двухкомпонентный структурообразующий материал в качестве тепловой изоляции на основе фракционированных волокон коры эвкалипта и измельченной соломы. Определение плотности и коэффициента теплопроводности проводили аналогично первому этапу.

На третьей серии образцов изучали возможность получения теплоизоляционных плит без вяжущего компонента, используя метод варки коры в щелоке. Вначале производилась подготовка и дозировка компонентов. Древесная зола просеивалась через сито с диаметром ячеек 0,16 мм, после чего готовился водный раствор щелока. Для этого в металлический цилиндр объемом 6 литров заливали 5 литров воды и 0,5–0,6 литров фракционированной древесной золы и устанавливали цилиндр на песчаную баню. Полученную смесь нагревали до 100 °С и кипятили до получения однородной смеси, мыльной на ощупь. В полученный раствор погружали необходимое количество коры и продолжали варить в течение 4–6 часов до размягчения, затем жидкий раствор сливали, а кору промывали от остатков золы.

Для формовки сырьевой смеси использовали следующие технологические решения.

1. Полученные пластинки коры послойно укладывали в форму в горизонтальной плоскости, формируя слои с минимальными зазорами между пластинками. При этом каждый последующий слой укладывали перпендикулярно предыдущему слою.

2. Пластинки коры разделяли на узкие полосы шириной 3–4 мм, после чего смесь из полос укладывали в форму и равномерно распределяли.

3. Кору разбивали на отдельные волокна при помощи строительного миксера для получения однородной массы. Полученную смесь равномерно укладывали в форму.

Уложенную в форму смесь закрывали крышкой и прессовали. Образцы-плиты выдерживали в форме 24 часа при температуре  $20 \pm 2$  °С и высушивали до постоянной массы в течение 48 часов в сушильном шкафу при температуре 45–50 °С. Затем определяли среднюю плотность и коэффициент теплопроводности плит.

На четвертом этапе исследований определяли коэффициент теплопроводности для карбонизированных волокон коры эвкалипта без вяжущего компонента. Процесс карбонизации проходил в сушильном шкафу SNOL 60/300 LFN при температуре 300 °С. Волокна коры эвкалипта ультрамелкой фракции засыпали в металлический цилиндр (объем 3 л) без уплотнения и закрывали металлической крышкой для предотвращения проникновения воздуха в емкость. Закрытый цилиндр помещали в сушильный шкаф. Дверь шкафа плотно закрывали и включали нагрев. За 30 минут температура достигала 300 °С, после чего начиналось постепенное дымовыделение из вентиляционного отверстия камеры. Далее с интервалом в 30 минут фиксировали выделение или отсутствие дыма. После прекращения выделения дыма выжидали контрольный интервал в 30 минут, если дым отсутствовал, то процесс карбонизации считали законченным. Время карбонизации составляло 3 часа.

Для получения образцов-плит пятой серии волокна коры перемешивали с жидким стеклом. Предварительно все компоненты взвешивали. Сначала производили увлажнение волокон при помощи пульверизатора и перемешивали. В увлажненную смесь с помощью пульверизатора вводили жидкое стекло, предварительно разведенное водой до концентрации 25% раствора. После равномерного распределения жидкого стекла и перемешивания до однородной массы производили формовку плиты. Далее форму накрывали крышкой и устанавливали под пресс. Крышку опускали до требуемой высоты плиты и фиксировали в нагруженном состоянии при давлении 0,01 МПа на 6 часов. Затем высушивали в течение 10 часов в сушильном шкафу при температуре 45–50 °С до постоянной массы. Плотность и коэффициент теплопроводности плит определяли после остывания до температуры  $20 \pm 2$  °С.

Сорбционную влажность образцов стенового материала определяли по стандарту STBEN 12088 с использованием эксикаторов.

### 3. Результаты лабораторных исследований.

**3.1. Электронная микроскопия.** Микроструктуру коры и волокон коры эвкалипта изучали по полученным изображениям с помощью электронного микроскопа (рисунки 1–4). В поперечном сечении кора эвкалипта представляет собой пористую структуру, сформированную из полых трубок, – сосудов размером 15–50 мкм (см. рисунки 1, 2). В торцевом сечении трубки имеют разную форму: от круглой до округлой неправильной. Толщина стенок трубок составляет 0,5–1 мкм. Трубки по длине разделены поперечными перегородками толщиной 0,5–1 мкм через 100–200 мкм.

При измельчении коры получали волокна разной толщины. Исследование полученных волокон позволило установить, что толщина волокон зависит от количества трубок-сосудов в сформированном пучке после измельчения коры. При этом волокно может состоять из одной трубки-сосуда, как на рисунке 3, и иметь толщину 25 мкм или состоять из пучка трубок-сосудов шириной 80–250 мкм (см. рисунок 4). Волокна имеют ярко выраженную шероховатую поверхность, получаемую в процессе измельчения коры при деформации и разрушении микроструктуры.

Сопоставление экспериментальных данных по определению параметров микроструктуры коры и волокон с полученными ранее авторами исследования результатами микроскопии по растительному сырью (ржаная, пшеничная солома, костра и волокна льна, тростник) [11–14] подтверждают возможность использования коры эвкалипта в качестве структурообразующего материала для изоляции.

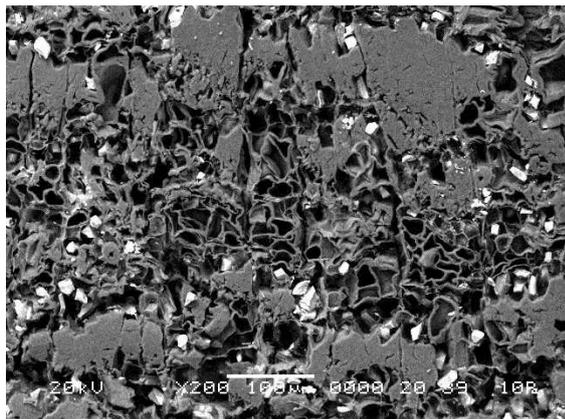


Рисунок 1. – Поперечный срез коры эвкалипта (фрагмент, 200-кратное увеличение)

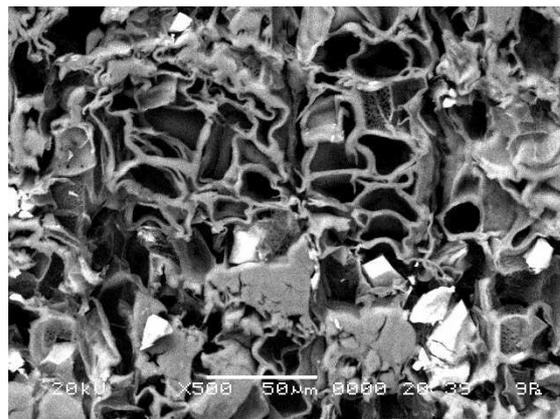


Рисунок 2. – Поперечный срез коры эвкалипта (фрагмент, 500-кратное увеличение)



Рисунок 3. – Волокна после измельчения коры эвкалипта (500-кратное увеличение)



Рисунок 4. – Волокна после измельчения коры эвкалипта (50-кратное увеличение)

**3.2. Определение гранулометрического состава волокон коры эвкалипта.** Основной задачей исследований являлось определение влияния фракции и плотности измельченной коры на теплопроводность волокнистой массы, не содержащей вяжущее вещество.

В процессе измельчения коры с естественной влажностью 5–6% наблюдалась сильная запылённость с образованием пыли в количестве до 28,1% от общей массы материала. Для устранения данной проблемы кору предварительно смачивали до влажности 20–30%. После чего интенсивность запыления уменьшилась до 18,1% и визуально отмечалось увеличение количества тонких волокон средних размеров.

После измельчения волокнистая масса подвергалась фракционированию через сита с размерами ячеек в диаметре 0,16–5 мм. Измельченную кору с размером частиц 0,16–5 мм разделяли на четыре фракции по размеру поперечного сечения (ширине) волокна: крупную (2,5–5 мм), среднюю (1,25–2,5 мм), мелкую (0,63–1,25 мм) и ультрамелкую (0,16–0,63 мм) (рисунок 5).



*a* – крупная; *б* – средняя

Рисунок 5. – Волокна коры эвкалипта разных фракций (начало)



б – мелкая; з – ультрамелкая

Рисунок 5. – Волокна коры эвкалипта разных фракций (окончание)

Кроме размеров в поперечном сечении волокна отличались и по длине. Длина волокон крупной фракции соответствует 15–40 мм, средней – 8–15 мм, мелкой – 5–8 мм и ультрамелкой 2–5 мм. Результаты гранулометрического анализа смеси измельченных волокон приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Гранулометрический состав коры после измельчения

Влажность коры, %	Содержание фракции, %				
	2,5–5 мм	1,25–2,5 мм	0,63–1,25 мм	0,16–0,63 мм	пылевидный отсев
5–6	15,4	16,8	14,9	24,9	28,1
20–30	16,4	17,9	15,9	31,6	18,1

По результатам гранулометрического анализа установлено, что при измельчении увлажненной коры существенно сокращается образование пылевидных частиц в 1,54 раза относительно массы пылевидного отсева коры без увлажнения. Для фракций 0,63–5 мм увеличение содержания измельченных волокон коры отличается незначительно и находится в пределах 6,5–7,4%. Существенное различие в сторону увеличения по процентному содержанию – на 26,9% – отмечается для измельченных волокон коры фракции 0,16–0,63 мм.

Полученные данные свидетельствуют о том, что предварительное увлажнение коры позволяет уменьшить образование пылевидных частиц на 35,4%, увеличить общую массу получаемых волокон при измельчении на 13,8% и в частности повысить содержание ультрамелких волокон до 31,6%.

**3.3. Определение плотности и коэффициента теплопроводности волокон коры эвкалипта.** Для изучения плотности и коэффициента теплопроводности фракционированные волокна засыпали в камеру прибора «ИТП–МГ4», фиксировали крышкой и производили измерение. Необходимо отметить, что волокна обладают высокой способностью к сцеплению между собой с образованием связанной структуры, сохраняющей форму.

В результате получены зависимости изменения коэффициента теплопроводности от средней плотности волокон по фракциям (рисунок 6). При варьировании плотности 50–220 кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности изменяется в диапазоне от 0,042 до 0,062 Вт/(м·°С).

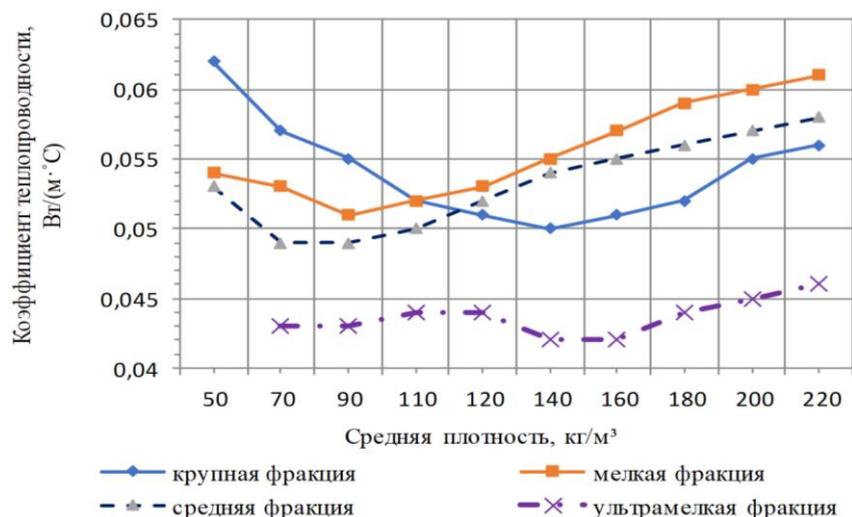


Рисунок 6. – Зависимость коэффициента теплопроводности от плотности волокон коры эвкалипта различных фракций

Для крупной фракции волокон эвкалипта при плотности  $50 \text{ кг/м}^3$  коэффициент теплопроводности равен  $0,062 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ . При постепенном увеличении средней плотности и достижении  $140 \text{ кг/м}^3$  происходит снижение коэффициента теплопроводности на  $19,4\%$  до  $0,05 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ . Повышение коэффициента теплопроводности на  $12\%$  до  $0,056 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  наблюдается при наибольшей плотности  $220 \text{ кг/м}^3$ .

При изучении показателей средней фракции волокон установлено, что для минимальной плотности  $50 \text{ кг/м}^3$  коэффициент теплопроводности соответствует  $0,053 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ . Уменьшение коэффициента теплопроводности до  $0,049 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  зафиксировано при плотности  $70 \text{ кг/м}^3$ . Данный показатель теплопроводности сохраняется и для структуры с плотностью  $90 \text{ кг/м}^3$ . Для максимальной средней плотности  $220 \text{ кг/м}^3$  прирост коэффициента теплопроводности составил  $20,4\%$  и достиг значения  $0,058 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ .

Коэффициент теплопроводности волокон эвкалипта мелкой фракции плотностью  $50 \text{ кг/м}^3$  равен  $0,054 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ . Минимальный показатель теплопроводности соответствует  $0,051 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  при плотности  $90 \text{ кг/м}^3$ . Последующее постепенное возрастание плотности волокнистой структуры способствует повышению коэффициента теплопроводности. Так, при плотности  $220 \text{ кг/м}^3$  коэффициент теплопроводности волокон эвкалипта равен  $0,061 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ , то есть на  $19,6\%$  превышает минимальный показатель.

Наилучшие показатели коэффициента теплопроводности зафиксированы на волокнах ультрамелкой фракции. Так, при плотности  $70\text{--}90 \text{ кг/м}^3$  коэффициент теплопроводности составил  $0,043 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ . При увеличении плотности до  $120 \text{ кг/м}^3$  коэффициент теплопроводности практически не изменяется и равен  $0,044 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ . Наименьшее значение коэффициента теплопроводности зафиксировано при плотности  $140\text{--}160 \text{ кг/м}^3$  и соответствует  $0,042 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ . Дальнейшее увеличение средней плотности приводит к постепенному росту коэффициента теплопроводности на  $9,5\%$  и достигает  $0,046 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  при плотности  $220 \text{ кг/м}^3$ .

Основываясь на полученных результатах, далее исследовали двухкомпонентный структурообразующий материал, состоящий из волокон коры эвкалипта различных фракций и измельченной соломы. Показатель коэффициента теплопроводности соломы составил  $0,046 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  при плотности  $80 \text{ кг/м}^3$ . Измельченная солома в процентном соотношении по массе смешивалась с волокнами коры эвкалипта для определения теплопроводности смеси. Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Введение  $15\%$  измельченной соломы взамен коры эвкалипта понижает коэффициент теплопроводности на  $6,2\text{--}30,2\%$  в зависимости от средней плотности смеси. Наименьшее значение коэффициента теплопроводности, равное  $0,046 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ , зафиксировано при плотности  $110 \text{ кг/м}^3$  и  $200 \text{ кг/м}^3$ , что ниже показателя волокон мелкой фракции без добавления соломы на  $11,5$  и  $13,3\%$  соответственно. При увеличении содержания соломы до  $25\%$  минимальное значение коэффициента теплопроводности зафиксировано при плотностях  $180$  и  $200 \text{ кг/м}^3$  и также равняется  $0,046 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ .

Таблица 2. – Коэффициент теплопроводности смеси волокон коры эвкалипта и измельченной соломы

Содержание измельченной соломы в смеси по массе, %	Коэффициент теплопроводности смеси, Вт/(м·°C), при средней плотности, кг/м <sup>3</sup>									
	50	70	90	110	120	140	160	180	200	220
Мелкая фракция волокон коры эвкалипта										
0	0,054	0,053	0,051	0,052	0,053	0,055	0,057	0,059	0,06	0,061
15	-	0,047	0,048	0,046	0,049	0,048	0,048	0,051	0,046	0,052
25	-	0,05	0,048	0,051	0,048	0,052	0,047	0,046	0,046	0,051
Средняя фракция волокон коры эвкалипта										
0	0,053	0,049	0,049	0,05	0,052	0,054	0,055	0,056	0,057	0,058
15	0,053	0,049	0,048	0,05	0,048	0,049	0,05	0,045	0,047	0,05
25	-	0,049	0,049	0,05	0,05	0,049	0,051	0,047	0,049	0,052
Крупная фракция волокон коры эвкалипта										
0	0,062	0,057	0,055	0,052	0,051	0,05	0,051	0,052	0,055	0,056
15	0,062	0,054	0,053	0,056	0,051	0,05	0,05	0,051	0,053	0,055

Наилучший показатель коэффициента теплопроводности для волокон средней фракции коры получен на плотности  $180 \text{ кг/м}^3$  при добавлении  $15\%$  измельченной соломы и составляет  $0,045 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ , что на  $20\%$  ниже значения коэффициента теплопроводности волокон коры без соломы. Снижение коэффициента теплопроводности относительно минимального значения волокон коры без добавления соломы при плотностях  $70$  и  $90 \text{ кг/м}^3$  составляет  $8,2\%$ . При увеличении процентного содержания измельченной соломы до  $25\%$  дальнейшего уменьшения коэффициента теплопроводности не наблюдается, а минимальный коэффициент теплопроводности повышается до  $0,047 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ .

При введении  $15\%$  измельченной соломы в крупную фракцию коры эвкалипта изменений коэффициента теплопроводности не отмечается по сравнению с бездобавочным составом. Увеличение содержания в смеси измельченной соломы более  $15\%$  приводит к осыпанию частиц соломы в низ структурообразующего массива из волокон и не позволяет получить однородную смесь.

Изучение коэффициента теплопроводности смеси измельчённой соломы и ультрамелкой фракции волокон коры не проводились, так как коэффициент теплопроводности соломы превышает показатель волокон коры.

В результате испытаний установлено, что введение измельчённой соломы в количестве 15% от общей массы смеси обеспечивает снижение коэффициента теплопроводности структурообразующего массива. Однако в отличие от однокомпонентной смеси из волокон коры визуально отмечается уменьшение связности волокон в двухкомпонентной смеси по причине замены части волокон на измельченную солому.

**3.4. Теплоизоляционные плиты на основе коры эвкалипта без вяжущего компонента.** После варки в водном растворе древесной золы подготовку структурообразующего материала из коры эвкалипта и формовку плит проводили по трем вариантам, приведенным в пункте 2. Внешний вид полученных экспериментальных плит показан на рисунках 7–9.



Рисунок 7. – Плита из горизонтально уложенных полос коры (1 вариант)



Рисунок 8. – Плита из узких разнонаправленных полосок коры (2 вариант)



Рисунок 9. – Плита из волокон коры, разбитых строительным миксером (3 вариант)

Наименьший коэффициент теплопроводности  $0,055 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$  при плотности  $200 \text{ кг}/\text{м}^3$  получен на плитах, отформованных из узких разнонаправленных полос коры (см. рисунок 8). Плиты обладают низкой жесткостью, но при этом не разрушаются по причине сформированной связной структуры разнонаправленными узкими полосами коры.

Для плит с горизонтально уложенными послойно пластинками коры (см. рисунок 7) при плотности  $250 \text{ кг}/\text{м}^3$  коэффициент теплопроводности достиг  $0,059 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ . Отмечается, что плиты обладают низкой связностью слоев коры между собой в объеме плиты, так как пластинки коры и, соответственно, волокна ориентированы только в горизонтальной плоскости в рамках каждого слоя коры.

Также аналогичный показатель, равный  $0,059 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ , зафиксирован на плитах из волокон коры, разбитых строительным миксером, при плотности  $230 \text{ кг}/\text{м}^3$ . При этом плиты обладают связной структурой и жесткостью (см. рисунок 9).

Полученные экспериментальные образцы плит подтверждают возможность производства теплоизоляционного материала в виде плит без вяжущего путем предварительной варки коры эвкалипта в растворе древесной золы. Кроме того, можно предположить, что плиты варианта 2 и 3 также эффективно могут использоваться для звукоизоляции, так как имеют достаточно высокую плотность и волокнистую структуру.

**3.5. Влияние вяжущего компонента на коэффициент теплопроводности плит из волокон коры эвкалипта.** Дальнейшие исследования проводили на средней, мелкой и ультрамелкой фракциях. Расход жидкого стекла и объём волокон коры в насыпном состоянии значительно влияют на формирование структуры и плотность образцов. Предварительные исследования по выбору оптимального расхода структурообразующего материала показали, что для формирования плотной структуры плит с минимальным количеством пустот требуемая средняя плотность волокна без вяжущего компонента составляет: для средней и мелкой фракции волокон –  $250 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; для ультрамелкой фракции волокон –  $150 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Уменьшение средней плотности структурообразующего материала приводит к недостаточной жесткости отформованных плит.

Перед введением жидкого стекла волокна коры предварительно смачивали водой с помощью распылителя, так как по причине высокого водопоглощения сухих волокон коры жидкое стекло не может равномерно распределиться по всему объёму структурообразующего материала при перемешивании смеси. Вода из раствора жидкого стекла быстро впитывается в структуру волокон коры. Твёрдая фаза жидкого стекла остается на поверхности волокон и ускоренно переходит из вязкого состояния в рыхлое с последующим быстрым образованием твердой аморфной структуры, теряя адгезионные свойства и способность равномерно покрывать поверхность всех волокон коры.

Предварительное смачивание водой значительно замедляет поглощение воды из жидкого стекла пористой поверхностью волокон коры. Установлено, что количество воды, необходимое для смачивания поверхности, зависит от размера волокон структурообразующего материала. Для формовки экспериментальных плит из средней фракции волокон при смачивании расход воды снижается на 60 г, что объясняется тем, что общая суммарная геометрическая площадь поверхности средних волокон меньше, чем у волокон мелкой и ультрамелкой фракции.

Для формовки плит принимали расход средней и мелкой фракции волокон коры – 480 г, для ультрамелкой фракции – 240 г. Количество жидкого стекла по сухому веществу на образец принято 40–80 г. Расход воды составлял 510–570 г на плиту.

Результаты исследований образцов-плит из смеси волокон и жидкого стекла представлены в таблице 3. Наименьший коэффициент теплопроводности равный 0,054 Вт/(м·°С) показали плиты на ультрамелкой фракции волокон коры, с расходом жидкого стекла 40 г (состав 7). Анализируя влияние жидкого стекла на коэффициент теплопроводности теплоизоляционных плит, установлено, что повышение расхода вяжущего от 40 г до 80 г влечет за собой рост показателя на 14%.

Максимальные значения коэффициента теплопроводности получены на структурообразующем материале из мелкой фракции волокон коры. В сравнении с составами 7–9 коэффициент теплопроводности плит на мелкой фракции (составы 4–6) возрастает в среднем на 10%.

Таблица 3. – Составы и свойства плит из волокон коры эвкалипта на жидком стекле

№ состава	Масса образца, г	Фракция волокон коры, мм	Расход на образец-плиту			Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Состояние плиты
			волокна коры, г	жидкое стекло, г	вода, г			
1	520	1,25–2,5 (средняя)	480	40	510	277,3	0,057	1*
2	540		480	60	510	288,0	0,059	2*
3	560		480	80	510	298,7	0,063	2
4	520	0,63–1,25 (мелкая)	480	40	570	277,3	0,06	1
5	540		480	60	570	288,0	0,064	2
6	560		480	80	570	298,7	0,068	2
7	280	0,16–0,63 (ультра- мелкая)	240	40	570	149,3	0,054	1
8	300		240	60	570	160,0	0,058	2
9	320		240	80	570	170,7	0,062	2

Примечание. 1\* – слабосвязанная структура; 2\* – жесткая структура.

В процессе подбора оптимальных составов учитывался не только коэффициент теплопроводности, но и состояние плит после сушки. После введения жидкого стекла в количестве 40 г на поверхности плит наблюдалось шелушение волокон или фиксировалась слабосвязанная структура, не обеспечивающая жесткость и геометрию тепловой изоляции. Жесткие плиты без шелушения поверхности получены при расходе жидкого стекла в пределах 60–80 г на образец-плиту. С учетом обеспечения жесткости плит минимальный показатель коэффициента теплопроводности 0,059 Вт/(м·°С) на средней фракции и 0,058 Вт/(м·°С) на ультрамелкой фракции обеспечивают плиты составов 2 и 8 (рисунок 10). Полученные значения коэффициентов теплопроводности ниже наименьших показателей плит на мелкой фракции (состав 5) на 8–10%.

Относительно низкие коэффициенты теплопроводности плитной теплоизоляции указывают на необходимость поиска технологических решений, обеспечивающих снижение данных показателей. Одним из возможных вариантов осуществления поставленной задачи может являться карбонизация волокон коры эвкалипта. Карбонизацию проводили на волокнах ультрамелкой фракции, имеющей наименьший коэффициент теплопроводности из исследуемых фракций.

После карбонизации отмечена потеря по массе на 49% и уменьшение в объёме на 50% полученной смеси карбонизированных волокон от исходных показателей. На первом этапе определили коэффициент теплопроводности карбонизированных волокон при плотности 80–165 кг/м<sup>3</sup>. Коэффициент теплопроводности карбонизированных волокон достиг 0,036–0,044 Вт/(м·°С), что на 14,3% ниже показателей некарбонизированных волокон.

Экспериментально установлено, что жесткие плиты на карбонизированных волокнах при средней плотности 269–280 кг/м<sup>3</sup> обеспечивают коэффициент теплопроводности на уровне 0,05–0,054 Вт/(м·°С). В ходе экспериментов получены жесткие плиты (рисунок 11) со следующими расходами компонентами на образец: карбонизированная кора – 445 г; жидкое стекло по сухому веществу – 60–80 г; вода – 925 г.

Для получения жестких плит на основе волокон коры требуется большое количество материала, что, соответственно, влияет на повышение расхода жидкого стекла, плотности и коэффициента теплопроводности. Несмотря на то, что образцы имеют достаточно низкий коэффициент теплопроводности  $0,05\text{--}0,054\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ , плиты на карбонизированном волокне также дополнительно должны обеспечивать ряд положительных свойств. Предположительно во влагонасыщенном состоянии показатели сорбции плит не должны достигать высоких значений, а карбонизированные волокна – подвергаться гниению. Присутствие жидкого стекла позволит существенно снизить горючесть плит. Таким образом, можно предположить высокую долговечность плит на карбонизированных волокнах в условиях эксплуатации.



Рисунок 10. – Плита на основе волокон коры эвкалипта (средняя фракция) и жидкого стекла (состав 2)



Рисунок 11. – Плита из карбонизированных волокон коры эвкалипта ультрамелкой фракции

**3.6. Определение сорбционной влажности волокон коры эвкалипта и теплоизоляционных плит.** Важной характеристикой, влияющей на эффективную работу тепловой изоляции в условиях эксплуатации, является сорбционная влажность. Показатели сорбционной влажности определяли на образцах, взятых из экспериментальной засыпной изоляции и исследуемых плит на основе коры эвкалипта после испытаний по определению коэффициента теплопроводности.

Следует отметить основные тенденции для экспериментальных составов, приведенных в таблице 4. С уменьшением размера некарбонизированных волокон от 5 мм до 0,63 мм (составы 1–3) происходит повышение показателей сорбционной влажности. При относительной влажности воздуха 60% сорбционная влажность увеличивается на 18,8% (с 10,1% до 12%). Для фракции 0,63–1,25 мм при относительной влажности воздуха 97% прирост сорбции составляет 12,4% относительно состава 1 и достигает 30,9%. При изменении относительной влажности воздуха от 40 до 97% сорбционная влажность повышается в 3,7–4,3 раза.

Таблица 4. – Сорбционная влажность экспериментальных составов

№ состава	Состав	Сорбционная влажность, %, при относительной влажности воздуха				
		40%	60%	80%	90%	97%
1	Фракция волокон коры 2,5–5 мм (крупная)	6,4	10,1	14	18,5	27,5
2	Фракция волокон коры 1,25–2,5 мм, (средняя)	7,9	11,8	16,4	20,9	29,2
3	Фракция волокон коры 0,63–1,25 мм, (мелкая)	7,9	12	17,1	21	30,9
4	Фракция волокон коры 0,16–0,63 мм, (ультрамелкая)	10,4	10,8	16	18,6	21,6
5	Фракция карбонизированных волокон коры 0,16–0,63 мм, (ультрамелкая)	9,3	9,4	14,3	16,8	21,6
6	Плита из волокон коры 0,16–0,63 мм с содержанием жидкого стекла 60 г	11,2	13,2	19,8	24,9	32,8
7	Плита из волокон коры 0,16–0,63 мм с содержанием жидкого стекла 80 г	12,2	14,5	25,2	33	38,5
8	Плита из карбонизированных волокон коры 0,16–0,63 мм с содержанием жидкого стекла 60 г	9,9	11,6	20	27	34

Существенное отличие по показателю сорбционной влажности в сторону значительного снижения на 30% для фракции 0,16–0,63 мм при относительной влажности воздуха 97% объясняется формированием мелкими волокнами достаточно плотной структуры, препятствующей проникновению и замедляющей прохождение водяных паров во внутреннюю область образцов. С увеличением относительной влажности воздуха показатель сорбции фракции 0,16–0,63 мм изменяется в 2,1 раза, что значительно меньше в сравнении с фракциями волокон 0,63–5 мм.

При введении жидкого стекла зафиксировано значительное повышение сорбционной влажности образцов (составы 6–8) в сравнении с образцами из волокон без вяжущего (составы 4, 5). Для образцов на жидком стекле (состав 7) при относительной влажности воздуха 60% произошло увеличение сорбции на 34,3% по сравнению с показателем состава 4, а при относительной влажности воздуха 97% соответственно в 1,8 раза.

На карбонизированных волокнах с жидким стеклом изменения не настолько существенны и при относительной влажности воздуха 60% сорбционная влажность отличается незначительно для составов 5 и 8, а при относительной влажности воздуха 97% для состава 8 показатель возрастает в 1,6 раза. Увеличение расхода жидкого стекла с 60 г до 80 г влечет за собой повышение сорбции на 17,4% при относительной влажности воздуха 97%.

Проведенные ранее эксперименты по определению сорбционной влажности образцов-плит на основе смесей растительного сырья и жидкого стекла [13–16] при сравнении указывают на достаточно низкие показатели плит на основе волокон коры эвкалипта, что должно обеспечить эффективную работу материала в условиях эксплуатации.

После испытаний на сорбционную влажность образцы оставляли в бьюксах и не извлекали из эксикаторов с целью изучения стойкости к биоповреждениям плесневыми грибами. Периодически проводили наблюдение за состоянием образцов. На 80 сутки испытаний зафиксировано появление плесневелых грибов на образцах из некарбонизированных волокон при влажности 90 и 97% (рисунок 12).



Рисунок 12. – Плесневелые грибы на некарбонизированных волокнах крупной фракции (2,5–5 мм)

Через 90 суток выдержки в эксикаторах плесневелые грибы обнаружены на поверхности образцов из смеси жидкого стекла и некарбонизированных волокон (составы 6, 7).

Составы 5, 8 на карбонизированных волокнах коры демонстрировали стойкость к образованию плесневелых грибов через 120 суток, после чего испытания прекратили.

**Заключение.** На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Эвкалипт относится к породам древесины, имеющим широкий ареал распространения и произрастания. Ценность коры эвкалипта как сырья заключается в том, что материал может поступать из двух независимых источников, включая деревопереработку и естественный ежегодный сброс коры деревьями. Кроме того, кора эвкалипта является экологически безопасным структурообразующим материалом для тепловой изоляции и обладает бактерицидным и фунгицидным действием, что особенно важно для обеспечения долговечной работы утеплителей на растительной основе.

2. Предварительное увлажнение коры до измельчения позволяет уменьшить образование пылевидных частиц на 35,4% и таким образом снизить массу пыли до 18,1%. При этом наибольший прирост по массе на 26,9% фиксируется для фракции 0,16–0,63 мм (основная фракция по массе), образующийся в количестве 31,6% от общей массы измельченной коры.

3. Наилучший показатель коэффициента теплопроводности равный 0,042 Вт/(м·°С) зафиксирован на волокнах коры эвкалипта ультрамелкой фракции при плотности 140–160 кг/м<sup>3</sup>.

4. Введение измельченной соломы в количестве 15–25% от массы смеси с волокнами коры эвкалипта обеспечивает снижение коэффициента теплопроводности для средней и мелкой фракции коры на 8,2% и 9,8% соответственно, до 0,045–0,046 Вт/(м·°С), при плотности засыпной изоляции 110 кг/м<sup>3</sup>, 180 кг/м<sup>3</sup> и 200 кг/м<sup>3</sup>.

5. Получение волокнистого сырья способом варки в древесной золе с дальнейшей формовкой под давлением без связующего дает возможность получать плиты с относительно низким коэффициентом теплопроводности равным 0,059 Вт/(м·°C) при плотности 200–220 кг/м<sup>3</sup>, что на 40% превышает показатель ультра мелких волокон.

6. Использование жидкого стекла в качестве вяжущего компонента дает возможность формировать жесткие плиты на ультрамелкой и средней фракции волокон коры эвкалипта с коэффициентом теплопроводности 0,058 и 0,059 Вт/(м·°C) при плотности 160 и 288 кг/м<sup>3</sup> соответственно.

7. Использование технологии карбонизации позволило установить, что для фракции 0,16–0,63 мм при плотности 80–165 кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности засыпного утеплителя находится в пределах 0,036–0,044 Вт/(м·°C), что на 14,3% ниже показателя образцов на некарбонизированных волокнах. Введение жидкого стекла с учетом жесткости плит вызывает увеличение коэффициента теплопроводности на 38,8% до значения 0,05 Вт/(м·°C) при плотности 269 кг/м<sup>3</sup>.

8. С уменьшением фракции волокон сорбционная влажность увеличивается и при относительной влажности воздуха 97% достигает 30,9% для мелкой фракции. Однако для ультрамелкой фракции значительно снижается (на 30%) до показателя 21,6%, что обуславливается формированием плотной структуры ультрамелкими волокнами даже в насыпном состоянии.

9. Сорбционная влажность плит на жидком стекле при относительной влажности воздуха 97% возрастает в 2,7 раза в сравнении с показателем при относительной влажности воздуха 60% и достигает наибольшего значения 38,5% среди испытываемых образцов. Для карбонизированной коры ультрамелкой фракции предельное значение сорбции достигает 21,6%, что ниже показателя плит с жидким стеклом в 1,6 раза. Таким образом, присутствие жидкого стекла в составах с волокнами коры эвкалипта ведёт к повышению сорбционной влажности материала.

10. Теплоизоляционные материалы на основе волокон коры эвкалипта, включая плиты на некарбонизированных волокнах, демонстрируют высокую биостойкость к образованию плесневелых грибов. Только на 90 сутки зафиксировано появление грибов на образцах из смеси некарбонизированных волокон и жидкого стекла при относительной влажности воздуха 90% и 97%. На поверхности некарбонизированных волокон коры без связующего грибок отмечен через 80 суток испытаний. Образцы, содержащие карбонизированные волокна, не имели биоповреждений после 120 суток выдержки в эксикаторах при относительной влажности воздуха 97%.

11. Исследования показали, что волокна коры эвкалипта можно эффективно использовать в качестве структурообразующего материала для засыпной и плитной изоляции, обеспечивающей экологическую безопасность для человека и окружающей среды, а также стойкость к биоповреждениям.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Substantial bark use as insulation material / G. Kain, M.C. Barbu, A. Teischinger et al. // *Forest Products Journal*. – 2012. – Vol. 62, № 6. – P. 480–487.
2. Данилов В.Е., Айзенштадт А.М. Использование модифицированной древесной коры сосны обыкновенной в качестве засыпной теплозвукоизоляции // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2019. – № 2. – С. 111–118. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.2.111.
3. Бакатович А.А., Бакатович Н.В., Пенкрат А.Н. Фракционный состав измельченной сосновой коры и вид вяжущего компонента как основные факторы, влияющие на коэффициент теплопроводности теплоизоляционных плит // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр.-во. Прикладные науки*. – 2022. – № 8. – С. 38–45.
4. Investigation of thermal insulation capacity of tree bark / Z. Pasztory, I.R. Mohacsine, G. Gorbacheva et al. // *Forestry engineering journal*. – 2017. – Vol. 7, № 1. – P. 157–161. DOI: 10.12737/25206.
5. Sato Yu., Konishi T., Takahashi A. Development of insulation material using natural tree bark // *Transactions of the Materials Research Society of Japan*. – 2004. – Vol. 29, № 5. – P. 1937–1940.
6. Synthesis of green adhesive with tannin extracted from eucalyptus bark for potential use in wood composites / M. Amari, K. Khimeche, A. Hima et al. // *J. of Renewable Materials*. – 2021. – Т. 9, № 3. – С. 463–475. DOI: 10.32604/jrm.2021.013680.
7. Valorization of Eucalyptus nitens bark by organosolv pretreatment for the production of advanced biofuels / A. Romani, A. Larramendi, R. Yáñez et al. // *Industrial Crops and Products*. – 2019. – Vol. 132. – P. 327–335. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.02.040.
8. Above-ground biomass estimation at tree and stand level for short rotation plantations of Eucalyptus nitens (Deane & Maiden) Maiden in Northwest Spain / M. González-García, A. Hevia, J. Majada et al. // *Biomass and Bioenergy*. – 2013. – Vol. 54. – P. 147–157. DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.03.019.
9. Potential of Eucalyptus globulus industrial bark as a biorefinery feedstock: Chemical and fuel characterization / D.M. Neiva, S. Araújo, J. Gominho et al. // *Industrial Crops and Products*. – 2018. – Vol. 123, № 2. – P. 262–270. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.06.070.
10. Thompson D., Hutchinson K., Berkery B. Recent results of growing Eucalyptus in Ireland // *Irish Forestry*. – 2019. – Vol. 69. – P. 167–183.
11. Bakatovich A., Gaspar F. Composite material for thermal insulation based on moss raw material // *Constr. Build. Mater*. – 2019. – Vol. 228. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116699.
12. Romanovsky S., Bakatovich A. Application of microscopic analysis to assess the prospects for the use of flax fiber tows in the production of thermal insulation material // *Vestnik of Polotsk State University. Part F, Construction. Applied Sciences*. – 2017. – № 8. – P. 14–18.
13. Bakatovich A., Davydenko N., Gaspar F. Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste // *Energy Build.* – 2018. – Vol. 180. – P. 72–82. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.09.032.

14. Bakatovich A., Gaspar F., Boltrushevich N. Thermal insulation material based on reed and straw fibres bonded with sodium silicate and rosin // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 352. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129055.
15. Romanovsky S., Bakatovich A. Effect of Modified Liquid Glass on Absorption Humidity and Thermal Conductivity of Flax Fiber Slabs // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 660. DOI: 10.1088/1757-899X/660/1/012072 .
16. Structure-forming composition of a mixture of rice husk and wheat straw for thermal insulation / A. Bakatovich, F. Gaspar, N. Bakatovich et al. // *Sustainable and Digital Building. Proceedings of the International Conference*. – 2022. – P. 127–146. DOI: 10.1007/978-3-031-25795-7\_10.

## REFERENCES

1. Kain, G., Barbu, M.C., Teischinger, A., Musso, M. & Petutschnigg, A. (2012). Substantial bark use as insulation material. *Forest Products Journal*, 62(6), 480–487.
2. Danilov, V.E. & Aizenshtadt, A.M. (2019). Ispol'zovanie modifitsirovannoi drevesnoi kory sosny obyknovennoi v kachestve zasypnoi teplozvukoizolyatsii [The Use of Modified Scots Pine Bark as Filling Material of Heat and Sound Insulation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal (Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal))*, (2), 111–118. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.2.111.
3. Bakatovich, A.A., Bakatovich, N.V. & Penkrat, A.N. (2022). Fraktsionnyi sostav izmel'chennoi sosnovoi kory i vid vyazhushchego komponenta kak osnovnye faktory, vliyayushchie na koeffitsient teploprovodnosti teploizolyatsionnykh plit [The fractional composition of crushed pine bark and the type of binder component as the main factors affecting the thermal conductivity coefficient of thermal insulation plates]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F, Constructions. Applied Sciences]*, (8), 38–45. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Pasztory, Z., Mohacsine, I.R., Gorbacheva, G. & Sanaev, V. (2017). Investigation of thermal insulation capacity of tree bark. *Forestry engineering journal*, 7(1), 157–161. DOI: 10.12737/25206.
5. Sato, Yu., Konishi, T. & Takahashi, A. (2004). Development of insulation material using natural tree bark. *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, 29(5), 1937–1940.
6. Amari, M., Khimeche, K., Hima, A., Chebout, R. & Mezroua, A. (2021). Synthesis of green adhesive with tannin extracted from eucalyptus bark for potential use in wood composites. *J. of Renewable Materials*, 9(3), 463–475. DOI: 10.32604/jrm.2021.013680.
7. Romani, A., Larramendi, A., Yáñez, R., Cancela, Á., Sánchez, Á., Teixeira, J.A. & Domingues, L. (2019). Valorization of Eucalyptus nitens bark by organosolv pretreatment for the production of advanced biofuels. *Industrial Crops and Products*, 132, 327–335. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.02.040.
8. González-García, M., Hevia, A., Majada, J. & Barrio-Anta, M. (2013). Above-ground biomass estimation at tree and stand level for short rotation plantations of Eucalyptus nitens (Deane & Maiden) Maiden in Northwest Spain. *Biomass and Bioenergy*, 54, 147–157. DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.03.019.
9. Neiva, D.M., Araújo, S., Gominho, J., Carneiro, A. & Pereira, H. (2018). Potential of Eucalyptus globulus industrial bark as a biorefinery feedstock: Chemical and fuel characterization. *Industrial Crops and Products*, 123(2), 262–270. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.06.070.
10. Thompson, D., Hutchinson, K. & Berkery, B. (2019). Recent results of growing Eucalyptus in Ireland. *Irish Forestry*, 69, 167–183.
11. Bakatovich, A. & Gaspar, F. (2019). Composite material for thermal insulation based on moss raw material. *Constr. Build. Mater.*, 228. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116699.
12. Romanovsky, S. & Bakatovich, A. (2017). Application of microscopic analysis to assess the prospects for the use of flax fiber tows in the production of thermal insulation material. *Vestnik of Polotsk State University. Part F, Construction. Applied Sciences*, (8), 14–18.
13. Bakatovich, A., Davydenko, N. & Gaspar, F. (2018). Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste. *Energy Build*, 180, 72–82. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.09.032.
14. Bakatovich, A., Gaspar, F. & Boltrushevich, N. (2022). Thermal insulation material based on reed and straw fibres bonded with sodium silicate and rosin. *Construction and Building Materials*, 352. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129055.
15. Romanovsky, S. & Bakatovich, A. (2019). Effect of Modified Liquid Glass on Absorption Humidity and Thermal Conductivity of Flax Fiber Slabs. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 660. DOI: 10.1088/1757-899X/660/1/012072 .
16. Bakatovich, A., Gaspar, F., Bakatovich, N. & Yi, Z. (2022). Structure-forming composition of a mixture of rice husk and wheat straw for thermal insulation. *Sustainable and Digital Building. Proceedings of the International Conference*, 127–146. DOI: 10.1007/978-3-031-25795-7\_10.

Поступила 22.09.2023

**PROSPECTS FOR THE USE OF EUCALYPTUS BARK  
AS A STRUCTURE-FORMING MATERIAL FOR THERMAL INSULATION**

**A. BAKATOVICH, N. BAKATOVICH, R. OBROMPALSKY**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

**F. GASPAR**  
(*Leiria Polytechnical Institute, Portugal*)

*The results of the study of eucalyptus bark fibers as a structure-forming material confirm the possibility of using such raw materials for the production of thermal insulation. With the help of an electron microscope, the microstructure*

*of the bark and bark fibers was studied, which allows us to explain the mechanisms that ensure the thermal insulation properties of the fibers. Depending on the technological operations at the fiber preparation stage (mechanical grinding, cooking in ash solution, carbonation) and the use of a binder, the thermal conductivity coefficient of thermal insulation varies within 0,036–0,059 W/(m×°C) at a density of 80–220 kg/m<sup>3</sup>. Samples based on eucalyptus bark fibers demonstrate sufficient low sorption humidity for materials based on vegetable raw materials. At a relative humidity of 60%, sorption is 9,4–14,5%, and at a relative humidity of 97%, it reaches 21,6–38,5%. The samples also provide high resistance to the appearance of fungus on the fibers of the eucalyptus bark in a wet state, which indicates the durability of the structure-forming material during the operation of thermal insulation.*

**Keywords:** *thermal conductivity coefficient, density, sorption humidity, eucalyptus bark fiber, liquid glass, carbonation.*