

## ВЛИЯНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА И СРЕДНЕЙ ПЛОТНОСТИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПЕРЕРАБОТАННОЙ КОРЫ ОСИНЫ

**Р.Л. ОБРОМПАЛЬСКИЙ, канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ**  
(*Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой*)

*В статье проведены исследования гранулометрического состава коры осины, измельчённой в сухом и увлажнённом состоянии, определено процентное содержание волокон луба и частиц корки по фракциям. Изучено влияние фракционного состава и средней плотности структурообразующих материалов из коры осины, включая частицы корки и волокна луба, на коэффициент теплопроводности полученных составов. Установлено, что наибольший теплоизолирующий эффект достигается на тонких волокнах длиной 0,5–2,5 мм фракции 0,16–0,63 мм и 0,63–1,25 мм лубяного слоя коры. При плотности волокон луба коры осины 125–175 кг/м<sup>3</sup> теплоизоляционные составы обеспечивают коэффициент теплопроводности на уровне 0,044–0,046 Вт/(м·°C).*

**Ключевые слова:** коэффициент теплопроводности, плотность, кора осины, луб, корка.

**Введение.** Современным направлением развития строительной отрасли Республики Беларусь является разработка и внедрение новых экологически безопасных строительных материалов, минимизирующих вред для здоровья человека и окружающей среды на всех стадиях жизненного цикла – от производства и эксплуатации до утилизации. Ряд научных и практических публикаций [1–3] подчёркивает важность развития «зелёного строительства» в стране, а также повышения энергоэффективности зданий и использования возобновляемых природных ресурсов.

Эффективное теплосбережение при минимальном воздействии на окружающую среду возможно обеспечить путём использования отходов биомассы в качестве возобновляемых и экологически чистых теплоизоляционных материалов для строительства [4]. Традиционные теплоизоляционные материалы (минеральная вата, пенополистирол, пенополиуретан) обладают высокими эксплуатационными характеристиками, но их производство сопровождается значительными энергозатратами, выделением вредных веществ и создает проблемы при утилизации по окончании срока службы [5].

Альтернативой выше указанным материалам может рассматриваться древесная кора как структурообразующий материал для тепловой изоляции. Кора представляет собой низкоплотную пористую биоструктуру, содержащую значительное количество воздушных включений и обладающую низкой теплопроводностью. Исследования последних лет подтверждают потенциал древесной коры для производства эффективных теплоизоляционных изделий [4–10].

Для производства легких теплоизоляционных панелей возможно использование измельчённой коры сосны как структурообразующего материала, а также мочевиноформальдегидной смолы в качестве связующего [11]. Панели формуются с использованием пресса. Коэффициент теплопроводности панелей составил 0,06–0,09 Вт/(м·°C), при средней плотности 350–500 кг/м<sup>3</sup>.

Командой ученых из Technical University in Zvolen (Словакия) исследовалась возможность получения композитных плит из коры лиственницы методом горячего прессования [12]. Связующим компонентом являлся мочевиноформальдегидный клей. К недостаткам данной разработки можно отнести высокое значение коэффициента теплопроводности от 0,065 до 0,107 Вт/(м·°C) при средней плотности 362–688 кг/м<sup>3</sup>. Необходимо отметить, что при производстве и эксплуатации изделий, содержащих мочевиноформальдегидные смолы, выделяется формальдегид – токсичный канцероген, способный вызывать раздражение слизистых, аллергические реакции, головные боли, а при длительном воздействии повышает риск развития онкозаболеваний [13; 14].

Возможность получения плитной тепловой изоляции без добавления синтетического связующего изучена командой ученых из Австрии и Румынии [15]. В качестве структурообразующего материала использованы волокна коры ели. Самосцепление волокон в процессе влажного формирования плит с последующей сушкой, обеспечивало цельность готового материала. Значение коэффициента теплопроводности находится в пределах 0,044–0,063 Вт/(м·°C) при средней плотности плит 164–276 кг/м<sup>3</sup>. К недостаткам полученных плит можно отнести сравнительно низкую прочность материала в среднем 0,07 Н/мм<sup>2</sup>, а также высокое водопоглощение материала, достигающее 380%.

Использование частиц еловой коры в качестве наполнителя для теплоизоляции деревянной каркасной стены предложено в работе [16]. После сушки кору измельчали и фракционировали, получая частицы размером 8–30 мм. Коэффициент теплопроводности засыпного утеплителя в экспериментальной стене составил 0,056–0,062 Вт/(м·°C) при средней плотности 212–276 кг/м<sup>3</sup>.

Венгерскими учёными изучались прессованные изоляционные панели из термически модифицированной коры тополя [17]. Для плит, полученных методом горячего прессования, коэффициент теплопроводности находился в пределах 0,064–0,067 Вт/(м·°C) при средней плотности 336–352 кг/м<sup>3</sup>. Отмечается, что предварительная термическая обработка коры снижает водопоглощение и набухание готовых плит.

В University of Natural Resources and Life Sciences (Австрия) предложено использовать измельчённую кору ели в качестве структурообразующего материала для тепловой изоляции [18]. Процесс изготовления плит заключался в механическом вспенивании компонентов в планетарном смесителе: частиц коры, древесного клея, поверхностно-активного вещества и воды. Значения коэффициента теплопроводности колеблются от 0,075 до 0,125 Вт/(м·°C), а средняя плотность находится в пределах 100–650 кг/м<sup>3</sup>. Процент водопоглощения достигает 450%, что указывает о необходимости гидрофобизации с целью защиты материала при долговременной эксплуатации.

Теплоизоляционный материал на основе коры эвкалипта разработан учёными из University of Concepcion в Чили [19]. В качестве связующего компонента использовалась фенолформальдегидная смола. Плиты формовались методом горячего прессования при температуре 110 °C. Коэффициент теплопроводности изоляции варьировался в пределах 0,064–0,077 Вт/(м·°C) при средней плотности от 80 до 300 кг/м<sup>3</sup>, толщина плит составляла 50 мм.

Сотрудники лаборатории «Green constructions» Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой исследовали возможность получения тепловой изоляции, содержащей измельчённую бересту в качестве структурообразующего материала и жидкого стекла как связующего компонента [20; 21]. Полученные теплоизоляционные плиты обеспечивают коэффициент теплопроводности 0,044–0,052 Вт/(м·°C) при плотности 145–180 кг/м<sup>3</sup>.

Целью настоящего исследования является обоснование возможности применения коры осины в качестве сырья для производства экологически чистых теплоизоляционных материалов, включая изучение основных физических свойств. Кора осины отличается развитой пористостью, низкой плотностью и доступностью на территории Беларуси, что делает её перспективным сырьём для получения экологически чистых теплоизоляционных материалов без применения синтетических связующих веществ.

**Материалы и методы испытаний.** В качестве исходного структурообразующего материала для экспериментальной тепловой изоляции использовали кору осины, полученную при переработке древесины на предприятиях Полоцкого района.

Кора осины включает в себя две области – наружная (корка) и внутренняя (луб). Согласно исследованию [22] массовая доля коры по отношению к массе ствола составляет от 13,3 до 16,9% в зависимости от возраста дерева. В коре осины в среднем содержится: целлюлозы (14,8–22,7%); гемицеллюлозы (26,6–28,4%); лигнина (21,8–27,7%); экстрактивных веществ (16,2–23,9%) [23]. Экстрактивные вещества коры осины могут использоваться в качестве природного источника антиоксидантов. Экстракт горячей воды коры обладает большей антиоксидантной способностью, чем синтетический антиоксидант бутилированный гидрокситолуол (BHT).

Корковый слой состоит из пробки и других покровных слоёв, отличается зеленовато-серым цветом, гладкой текстурой поверхности, а также сравнительно небольшой толщиной. Лубяной слой коры представлен сито-видными трубками (лубянные волокна), часто желтоватого или зеленоватого цвета, более эластичный.

При получении структурообразующего материала из коры для теплоизоляции применяли два метода переработки сырья: ручной (с использованием секатора) и механизированный (с применением измельчителя «Эликор 1»). Размер частиц на выходе зависел от диаметра отверстий в ситах, установленных в измельчителе. После измельчения сырьевая масса подвергалась фракционированию через сита с ячейками диаметром 0,16–5 мм.

Основные физические показатели сырьевых материалов – 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. Показатель измеряли для коры, корки и луба осины различных фракций в насыщенном и уплотнённом состоянии без вяжущего компонента. Для определения коэффициента теплопроводности необходимый объём фракционированного сырья засыпали и равномерно распределяли в измерительной камере прибора «ИТП–МГ4» между теплой плитой (40 °C) и холодной плитой (10 °C).

### Результаты лабораторных исследований.

#### *Определение плотности и коэффициента теплопроводности коры осины, измельчённой вручную.*

На начальном этапе исследования определение коэффициента теплопроводности выполнялось для образцов, полученных путем послойной укладки полос коры с горизонтальным чередованием направления волокон, что обеспечивало моделирование структуры, максимально близкой к природному материалу. Размеры пластин составляли по ширине 30–40 мм, длине 100–250 мм и толщине 2–5 мм (рисунок 1). Далее образцы подвергались ручному измельчению с использованием секатора, в результате получали прямоугольные пластинки меньших размеров (рисунки 2–4).

Результаты определения коэффициента теплопроводности для образцов коры осины, измельчённой вручную, а также зависимости данного показателя от средней плотности материала показаны на рисунке 5.



Рисунок 1. – Кора в виде пластин  
(фракция 30–40 мм)



Рисунок 2. – Кора в виде пластин  
(фракция 20–30 мм)



Рисунок 3. – Кора в виде пластин  
(фракция 10–20 мм)



Рисунок 4. – Кора в виде пластин  
(фракция 5–10 мм)

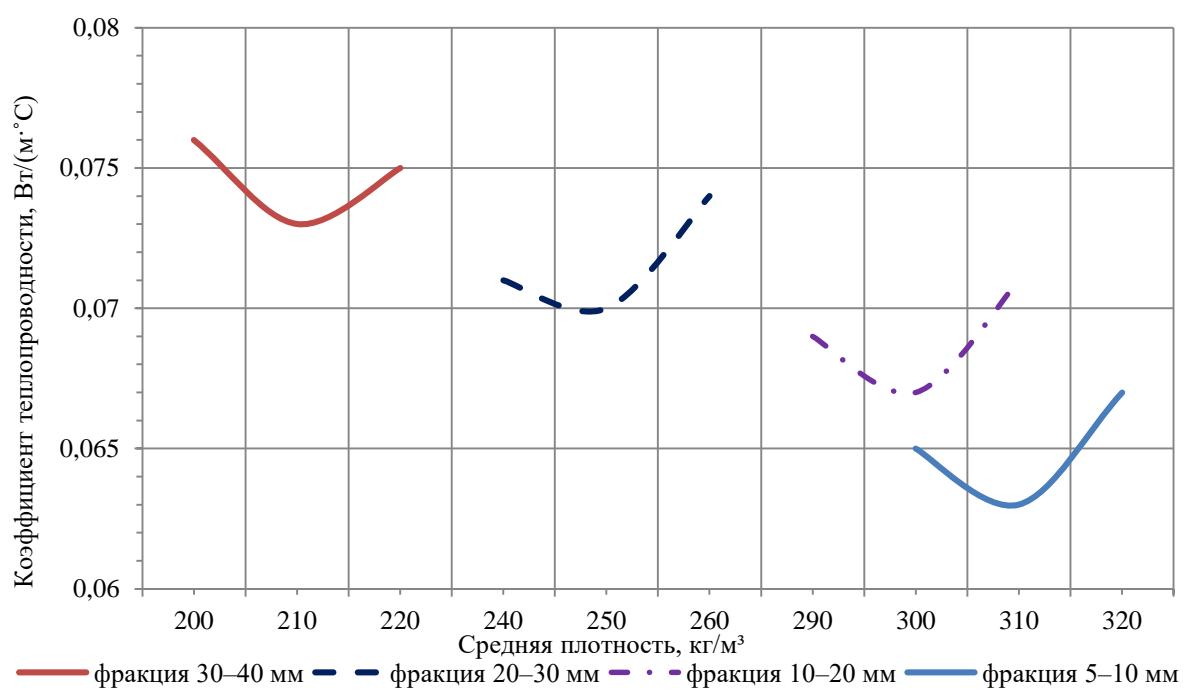


Рисунок 5. – Изменение коэффициента теплопроводности  
в зависимости от средней плотности фракционированной коры осины

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить закономерности изменения коэффициента теплопроводности коры осины в зависимости от фракционного состава и средней плотности смеси. Отмечается, что для фракции 30–40 мм при увеличении средней плотности смеси с 200 до 210 кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности демонстрирует тенденцию к снижению, достигая минимального значения 0,073 Вт/(м·°C). Дальнейшее уплотнение материала приводит к повышению коэффициента теплопроводности. Так, при плотности 220 кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности равен 0,075 Вт/(м·°C).

Аналогичный характер изменения наблюдается у коры фракции 20–30 мм. В диапазоне плотностей 240–250 кг/м<sup>3</sup> происходит незначительное снижение коэффициента теплопроводности до 0,07 Вт/(м·°C). Однако дальнейшее увеличение плотности (260 кг/м<sup>3</sup>) демонстрирует обратную тенденцию – прирост показателя на 5,7%, соответствующего 0,073 Вт/(м·°C).

В случае фракции 10–20 мм минимальное значение коэффициента теплопроводности равное 0,067 Вт/(м·°C) зафиксировано при плотности коры 300 кг/м<sup>3</sup>. Повышение средней плотности материала до 310 кг/м<sup>3</sup> приводит к увеличению коэффициента теплопроводности на 6%, и показатель достигает значения 0,071 Вт/(м·°C).

Для фракции 5–10 мм при насыпной плотности 300 кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности равен 0,065 Вт/(м·°C). При плотности 310 кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности снижается до 0,063 Вт/(м·°C). При дальнейшем росте плотности (320 кг/м<sup>3</sup>) коэффициент теплопроводности повышается на 6,3% и равен 0,067 Вт/(м·°C).

Сопоставительный анализ минимальных значений коэффициента теплопроводности между различными фракциями показал отчётливую зависимость. При переходе от фракции 30–40 мм к фракции 20–30 мм коэффициент теплопроводности снижается на 4,1% с 0,073 Вт/(м·°C) до 0,07 Вт/(м·°C). Уменьшение фракции до 10–20 мм приводит к дальнейшему понижению на 4,3%, а при сокращении размера частиц до 5–10 мм – ещё на 6%. Таким образом, общее снижение коэффициента теплопроводности с 0,073 Вт/(м·°C) до 0,063 Вт/(м·°C) при переходе от крупной к мелкой фракции составляет 13,7%.

Анализ полученных данных показывает, что уменьшение размера частиц способствует более плотному контакту между ними и сокращению общего объёма и размеров воздушных пустот, за счёт чего повышаются теплоизоляционные свойства материала. Наиболее низкие значения коэффициента теплопроводности равного 0,063 Вт/(м·°C) достигает фракция 5–10 мм при средней плотности 310 кг/м<sup>3</sup>.

**Определение гранулометрического состава механически измельчённой коры осины.** В рамках экспериментальных работ проведена подготовка образцов коры осины, включающая предварительное измельчение и последующее фракционирование материала. Гранулометрическое исследование позволило выделить отдельные фракции, отличающиеся не только размером, но и формой частиц.

Для исследования влияния влажности материала на процесс разрушения коры и получения частиц разного размера, кора измельчалась в двух состояниях: высушенной до естественной влажности 5–6% и при влажности 20–30%. Гранулометрический состав по фракциям приведен в таблице 1.

Таблица 1. – Гранулометрический состав коры осины после механического измельчения

Влажность коры, %	Содержание фракции, %					
	5–10 мм	2,5–5 мм	1,25–2,5 мм	0,63–1,25 мм	0,16–0,63 мм	пылевидный отсев
5–6	14,1	32,8	11,5	15,1	20,5	6
20–30	12,8	31,8	13,9	17,7	20,7	3

Из дроблённой в сухом состоянии коры максимальное количество 32,8% приходится на фракцию 2,5–5 мм. Пятая часть полученной массы приходится на фракцию 0,16–0,63 мм, а пылевидный отсев составляет 6%. Таким образом, можно отметить, что кора в сухом состоянии разрушается, как твердый хрупкий материал. На крупные фракции 2,5–10 мм приходится 46,9%, на мелкие 0,16–1,25 мм – 35,6% при разнице в 11,4%. Причём количество наиболее мелкой фракции 0,16–0,63 мм составляет 20,5%.

При повышении влажности до 20–30% фиксируется уменьшение содержания частиц фракции 2,5–10 мм. Доля фракции 2,5–5 мм несущественно понижается, а содержание средних частиц фракции 1,25–2,5 мм возрастает на 20,9%. Количество частиц фракции 0,63–1,25 мм увеличивается на 17,2%. Процентное содержание фракции 0,16–0,63 мм незначительно увеличивается, а содержание пылевидного отсева снижается в 2 раза.

Таким образом, при увеличении влажности кора разрушается с уменьшением содержания крупных фракций 2,5–10 мм и увеличением количества средних и мелких фракций. Кроме того, существенно сокращается образование пыли. Разница между количеством крупных и мелких фракций сокращается почти в 2 раза до 6,2%.

В процессе измельчения коры осины формируется неоднородная смесь отличающихся по форме частиц – фрагменты коркового слоя различной фракции и волокна луба, длиною 0,5–25 мм. Корковый слой характеризуется зернистой структурой и твердостью частиц, тогда как луб представлен волокнами, обладающими меньшей плотностью и большей гибкостью. Различие в форме и массе частиц обуславливает разное поведение компонентов при механическом воздействии и фракционировании.

После первичного рассева на фракции полученные навески представляли собой смесь зерновидных частиц корки и волокон луба. Для более точного определения соотношения этих компонентов в каждой фракции, проводился вторичный рассев для каждой фракции. При этом движение сита осуществлялось в горизонтальной плоскости. Частицы коркового слоя в виде зёрен свободно проходили через ячейки, в то время как волокна лубяного слоя оставались на поверхности сита. В результате определено процентное содержание волокон луба и зерен корки в каждой фракции, а также содержание корки и луба в пределах одной фракции (таблица 2).

Таблица 2. – Гранулометрический состав коры осины после разделения на корку и луб

Слои коры	Содержание фракции, %				
	5–10 мм	2,5–5 мм	1,25–2,5 мм	0,63–1,25 мм	0,16–0,63 мм
корка	14,3*/82,4**	33,4/77,1	12,8/68	16,6/68,3	22,9/84,1
луб	9,9/17,6	32/22,9	19,4/32	24,8/31,7	13,9/15,9

Примечание: \* – доля фракции в пределах соответствующего компонента (луб или корка);

\*\* – содержание корки или луба в данной фракции.

В составе корки фракция 2,5–5 мм является наибольшей по количеству – 33,4%, также значительное содержание 22,9% имеют частицы корки фракции 0,16–0,63 мм. На крупные фракции 2,5–10 мм приходится 47,7% частиц корки, а на мелкие фракции 0,16–1,25 мм – 39,5%.

Для волокон луба основная масса 32% и 24,8% приходится на фракции 2,5–5 мм и 0,63–1,25 мм. Наименьшее содержание 9,9% и 13,9% приходится на волокна крупной фракции 5–10 мм и мелкой фракции 0,16–0,63 мм.

Анализируя процентное содержания корки и луба, отмечается преобладание частиц корки в пределах 68–84,1% во всем исследуемом диапазоне фракций. Для фракций 1,25–2,5 мм и 0,63–1,25 мм характерно максимальное содержание волокон луба 32% и 31,7% соответственно. В мелких фракциях на волокна луба приходится от 15,9% до 31,7% от общей массы коры.

#### **Определение плотности и коэффициента теплопроводности коры осины, измельчённой механически.**

Для каждой полученной фракции коры осины определяли значения насыпной плотности структурообразующего материала, а также коэффициента теплопроводности.

Результаты экспериментальных исследований позволили установить зависимости между размером частиц, плотностью структурообразующего материала и коэффициентом теплопроводности механически измельчённой коры осины (рисунок 6).

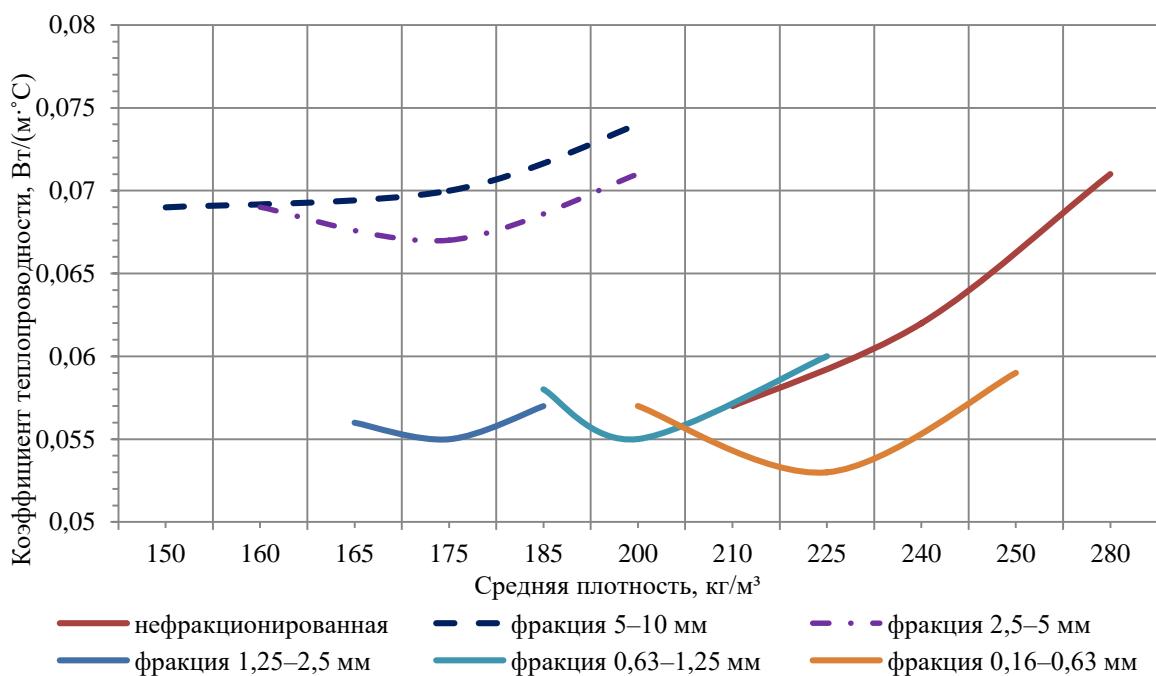


Рисунок 6. – Изменение коэффициента теплопроводности в зависимости от средней плотности механически измельчённой фракционированной коры осины

В отличие от предыдущей серии испытаний, кору предварительно подвергали механическому измельчению и последующему фракционированию, что позволило получить экспериментальные составы со значительно меньшими размерами частиц.

Для нефракционированного состава наблюдается постепенное увеличение коэффициента теплопроводности при росте плотности: от 0,057 Вт/(м·°C) при 210 кг/m<sup>3</sup> до 0,071 Вт/(м·°C) при 280 кг/m<sup>3</sup>. Повышение плотности на 33% сопровождается увеличением коэффициента теплопроводности на 24,6%, что указывает на снижение общего объема замкнутой пустотности в структуре материала. Таким образом, наименьший коэффициент теплопроводности достигается при плотности 210 кг/m<sup>3</sup>.

При изменении плотности со 150 до 175 кг/m<sup>3</sup> фракция 5–10 мм демонстрирует практически идентичные показатели коэффициента теплопроводности, при дальнейшем увеличении плотности до 200 кг/m<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности равен 0,074 Вт/(м·°C), что соответствует приросту на 7,2%. Из чего следует, что более плотная укладка крупных частиц вызывает увеличение площади соприкосновения частиц в контактных точках.

Для фракции 2,5–5 мм при плотности 160 кг/m<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности составляет 0,069 Вт/(м·°C). Незначительное снижение коэффициента теплопроводности до 0,067 Вт/(м·°C) фиксируется при плотности 175 кг/m<sup>3</sup>. Дальнейшее повышение плотности до 200 кг/m<sup>3</sup> влечёт увеличение коэффициента теплопроводности на 6% относительно минимального значения и достигает 0,071 Вт/(м·°C).

Коэффициент теплопроводности для фракции 1,25–2,5 мм находится в пределах 0,056–0,057 Вт/(м·°C) в граничных значениях плотностей 165–200 кг/m<sup>3</sup>. Минимальное значение коэффициента теплопроводности 0,055 Вт/(м·°C) соответствует плотности 175 кг/m<sup>3</sup>. По полученным данным видно, что для фракции 1,25–2,5 мм в сравнении с фракцией 2,5–5 мм показатели коэффициента теплопроводности значительно уменьшились на 17,9–19,7% и находятся в пределах 0,055–0,057 Вт/(м·°C).

Аналогичная зависимость наблюдается для фракции 0,63–1,25 мм. При увеличении плотности до 200 кг/m<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности снижается на 5,2% с 0,058 до 0,055 Вт/(м·°C). Дальнейший рост плотности до 225 кг/m<sup>3</sup> вызывает увеличение коэффициента теплопроводности до 0,06 Вт/(м·°C), то есть наблюдается прирост на 9,1% относительно минимального значения.

Значение коэффициента теплопроводности фракции 0,16–0,63 мм при плотности 225 кг/m<sup>3</sup> снижается на 7% относительно показателя равного 0,057 Вт/(м·°C) при плотности 200 кг/m<sup>3</sup>. При плотности 250 кг/m<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности повышается на 11,3% до значения 0,059 Вт/(м·°C). Таким образом, минимальное значение коэффициента теплопроводности равное 0,053 Вт/(м·°C) достигается при плотности 225 кг/m<sup>3</sup>.

Для мелких фракций 0,16–2,5 мм минимальный коэффициент теплопроводности равен 0,053–0,055 Вт/(м·°C). Однако наблюдается зависимость, что с уменьшением фракции повышается показатель плотности, соответствующий минимальному коэффициенту теплопроводности. Данная зависимость обусловлена тем, что чем мельче частицы, тем более плотная матрица формируется из структурообразующего материала, с замкнутыми пустотами минимальных размеров, а увеличение точек контактов между частицами компенсируется повышением количества замкнутых микропустот.

*Исследование коэффициента теплопроводности коркового слоя коры.* После отделения коркового слоя от коры осины для каждой фракции корки в насыпном состоянии определяли коэффициент теплопроводности (таблица 3).

Таблица 3. – Коэффициент теплопроводности фракций корки осины

№ состава	Размер фракции, мм	Насыпная плотность, кг/m <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)
1	5–10	195	0,073
2	2,5–5	255	0,069
3	1,25–2,5	305	0,071
4	0,63–1,25	345	0,076
5	0,16–0,63	385	0,079

Анализ экспериментальных данных показал, что использование корки приводит к увеличению насыпной плотности смеси и коэффициента теплопроводности в сравнении с результатами испытаний по коре (см. таблицу 3). Для фракции 5–10 мм при насыпной плотности 195 кг/m<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности составляет 0,073 Вт/(м·°C). При переходе к размеру частиц 2,5–5 мм (состав 2) насыпная плотность увеличилась на 60 кг/m<sup>3</sup>, а коэффициент теплопроводности понизился на 5,5% до 0,069 Вт/(м·°C).

Насыпная плотность частиц фракции 1,25–2,5 мм достигает 305 кг/m<sup>3</sup> и вызывает незначительное повышение коэффициента теплопроводности.

Для фракции 0,63–1,25 мм насыпная плотность равна 345 кг/m<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности 0,076 Вт/(м·°C). Увеличение коэффициента теплопроводности по сравнению с фракцией 1,25–2,5 мм составляет 7%, что подтверждает тенденцию на формирование более плотной структуры из корки с уменьшением фракции за счёт структурирования матрицы из плотных частиц корки с большим количеством контактных точек и сокращением количества мелких замкнутых пустот.

Мелкие частицы корки фракции 0,16–0,63 мм демонстрируют высокий коэффициент теплопроводности 0,079 Вт/(м·°C) при насыпной плотности 385 кг/м<sup>3</sup>, что на 14,5% выше показателей состава 2, имеющего минимальный показатель. Из результатов исследования коры и корки следует, что значительное влияние на понижение коэффициента теплопроводности оказывает лубяной слой коры осины.

*Исследование коэффициента теплопроводности лубяного слоя коры осины.* После удаления частиц коркового слоя из смеси исследовали изменение коэффициентов теплопроводности в зависимости от плотности на разных фракциях волокон луба осины. По результатам исследований построены зависимости изменения коэффициента теплопроводности от плотности для фракций волокон в диапазоне 0,16–10 мм (рисунок 7).

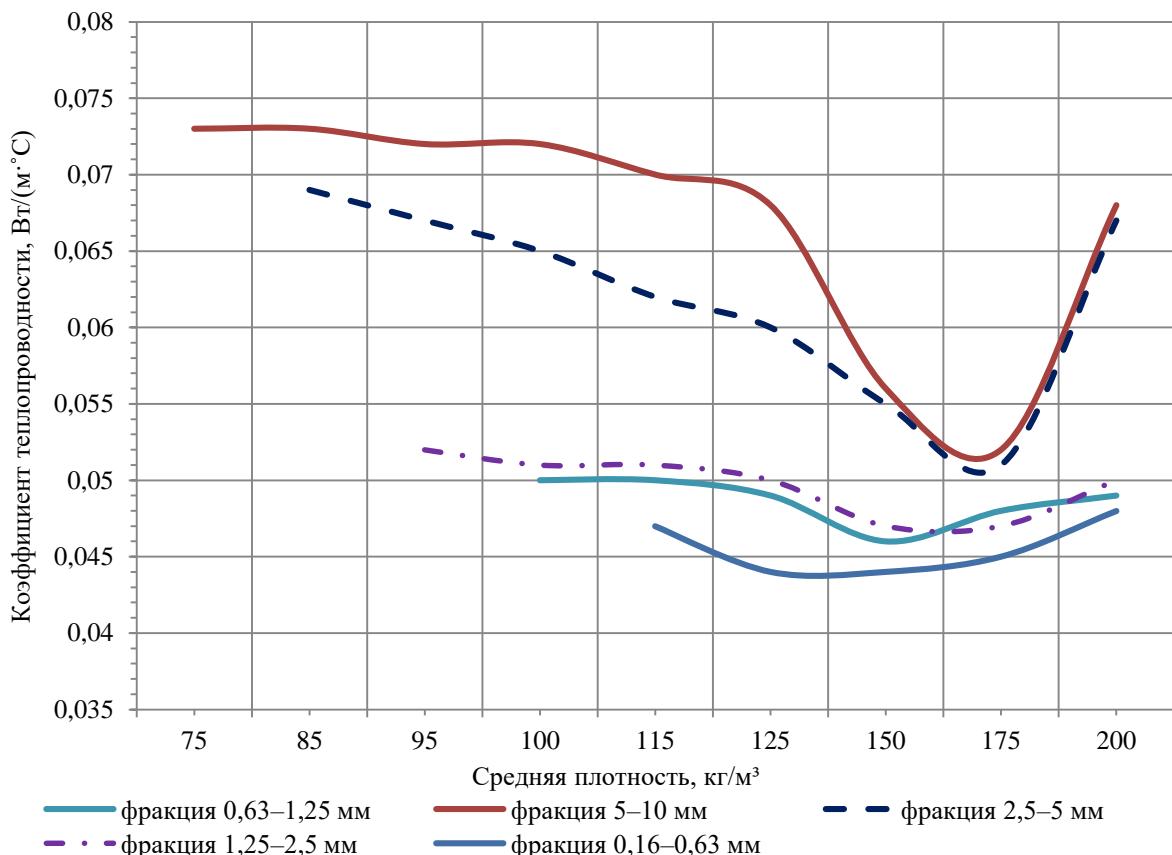


Рисунок 7. – Изменение коэффициента теплопроводности волокон луба осины в зависимости от средней плотности образцов по фракциям

По полученным зависимостям установлены общие закономерности. Повышение плотности до определённого значения обеспечивает снижение коэффициента теплопроводности, а дальнейшее повышение плотности вызывает подъём показателя. С уменьшением фракции существенно сокращается разница между максимальными и минимальными показателями коэффициента теплопроводности в исследуемом диапазоне плотностей.

Наиболее крупные волокна фракции 5–10 мм при насыпной плотности 75 кг/м<sup>3</sup> характеризуются коэффициентом теплопроводности 0,073 Вт/(м·°C). При увеличении плотности в 2 раза коэффициент теплопроводности понижается до 0,056 Вт/(м·°C), то есть фиксируется снижение показателя на 23,3%. Коэффициент теплопроводности уменьшается на 28,8% относительно исходного показателя, достигая значения 0,052 Вт/(м·°C) при плотности 175 кг/м<sup>3</sup>. Однако дальнейшее возрастание плотности до 200 кг/м<sup>3</sup> вызывает повышение коэффициента теплопроводности до 0,068 Вт/(м·°C), что связано с увеличением количества и площади контактных точек между волокнами с одновременным уменьшением количества и объёма замкнутых пустот при уплотнении волокнистой структуры.

Наблюдается аналогичная зависимость для фракции 2,5–5 мм. Коэффициент теплопроводности при плотности 85 кг/м<sup>3</sup> составляет 0,069 Вт/(м·°C), тогда как при 125 кг/м<sup>3</sup> снижается до 0,06 Вт/(м·°C), то есть на 13%. Минимальное значение коэффициента теплопроводности 0,055 Вт/(м·°C) зафиксировано при плотности 150 кг/м<sup>3</sup>, что отражает понижение показателя на 20,3% относительно исходного значения. При дальнейшем уплотнении до 200 кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности достигает 0,067 Вт/(м·°C).

Полученные результаты по волокнам фракции 1,25–2,5 мм отличаются отсутствием значительных изменений между максимальными и минимальными показателями коэффициента теплопроводности. От значения 0,052 Вт/(м·°C) при плотности 95 кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности постепенно уменьшается до 0,047 Вт/(м·°C) в диапазоне плотностей 150–175 кг/м<sup>3</sup>, что соответствует снижению на 9,6%. Дальнейшее увеличение плотности до 200 кг/м<sup>3</sup> приводит к возрастанию коэффициента теплопроводности на 6,4%, достигая показателя 0,05 Вт/(м·°C).

Мелкие волокна фракции 0,63–1,25 мм и 0,16–0,63 мм обеспечивают минимальные значения коэффициента теплопроводности. Так, для фракции 0,63–1,25 мм коэффициент теплопроводности при насыпной плотности 100 кг/м<sup>3</sup> составляет 0,05 Вт/(м·°C). Увеличение средней плотности структурообразующего материала до 150 кг/м<sup>3</sup> приводит к постепенному снижению коэффициента теплопроводности на 8%, с достижением минимального показателя равного 0,046 Вт/(м·°C). Последующее повышение плотности вызывает прирост коэффициента теплопроводности на 8,6% относительно минимального значения. При плотности 115 кг/м<sup>3</sup> волокна фракции 0,16–0,63 мм обеспечивают коэффициент теплопроводности на уровне 0,047 Вт/(м·°C), а при плотности 125 кг/м<sup>3</sup> зафиксировано снижение до 0,044 Вт/(м·°C), что соответствует уменьшению показателя на 6,4%. Повышение плотности до 200 кг/м<sup>3</sup> вызывает увеличение коэффициента теплопроводности до 0,048 Вт/(м·°C).

Таким образом, наилучшие показатели коэффициента теплопроводности 0,044–0,046 Вт/(м·°C) достигаются на мелких фракциях волокон луба при плотностях 125–175 кг/м<sup>3</sup>, обеспечивающих разнонаправленную ориентацию тонких волокон, формирующих развитую структуру замкнутых микропустот в матрице материала.

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

1. Согласно результатам исследований, применение крупных пластинчатых частиц коры осины в качестве утеплителя не обеспечивает высоких теплоизоляционных показателей ограждающих конструкций, так как минимальные коэффициенты теплопроводности коры соответствуют 0,063–0,074 Вт/(м·°C) при плотности 200–320 кг/м<sup>3</sup>.

2. Проведённые исследования гранулометрического состава показали, что наилучшие условия механического измельчения коры осины обеспечиваются при влажности материала 20–30%, при которой увеличивается доля средних и мелких фракций, а также минимизируется образование пылевидных частиц.

3. Эксперименты с механически измельчённой корой осины позволили установить, что для фракции 0,63–1,25 мм при плотности 200 кг/м<sup>3</sup> наименьший коэффициент теплопроводности равен 0,056 Вт/(м·°C), а для фракции 0,16–0,63 мм при плотности 225 кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности соответствует 0,053 Вт/(м·°C). Полученные показатели коэффициента теплопроводности свидетельствуют о недостаточно эффективной изолирующей способности механически измельчённой коры осины.

4. Минимальные значения коэффициента теплопроводности коркового слоя коры осины равные 0,069–0,071 Вт/(м·°C) зафиксированы при насыпной плотности структурообразующего материала 255–305 кг/м<sup>3</sup>. Полученные результаты выше минимальных значений коэффициента теплопроводности измельчённой коры осины на 20,3–30,1%, что указывает на низкую теплоизолирующую способность коркового слоя.

5. Наибольший теплоизолирующий эффект достигается на тонких волокнах фракции 0,16–0,63 мм и 0,63–1,25 мм лубяного слоя коры. При плотности волокон 125–175 кг/м<sup>3</sup> теплоизоляционные составы обеспечивают коэффициент теплопроводности на уровне 0,044–0,046 Вт/(м·°C), что на 17–17,9% ниже минимальных показателей измельчённой коры осины. По результатам исследований, волокна луба коры осины могут рассматриваться как перспективное природное сырьё для получения эффективных теплоизоляционных композитов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Шакель Е.Ю., Рессоха Е.В. Развитие «зеленого» строительства в Республике Беларусь // Повышение качества жизни и обеспечение конкурентоспособности экономики на основе инновационных и научно-технических разработок: сборник статей VII Международной научно-технической конференции «Минские научные чтения – 2024», Минск, 3–5 декабря 2024 г.: в 3 т. – Минск: БГТУ, 2024. – Т. 3. – С. 365–368.
- Кисель Е.И., Срываина Л.Г. Перспективы развития «зеленого» строительства в Республике Беларусь // Актуальные проблемы современных экономических систем – 2022: сборник научных трудов / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет; редкол.: А.Г. Проровский и др. – Брест: БрГТУ, 2022. – С. 86–92.
- Потаев Г.А., Сысоева В.А. Современное состояние и перспективы развития «зеленого» градостроительства в Республике Беларусь // Архитектура: сборник научных трудов. – 2018. – Вып. 11. – С. 116–123.
- Lisowski P., Glinicki M.A. Promising biomass waste-derived insulation materials for application in construction and buildings // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2025. – Vol. 15, № 1. – P. 57–74. DOI: 10.1007/s13399-023-05192-8.
- A Comprehensive Review of Sustainable Thermal and Acoustic Insulation Materials from Various Waste Sources / M. Ouda, A.A. Abu Sanad, A. Abdelaal et al. // Buildings. – 2025. – Vol. 15, № 16. – P. 2876.
- Lisowski P., Glinicki M.A. Promising biomass waste-derived insulation materials for application in construction and buildings // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2025. – Vol. 15, № 1. – P. 57–74.
- Živković V., Novosel A., Krstić H. Innovative Solutions: Comparative Study of Laboratory and In Situ Measurements of Thermal Properties of Bark Insulated Exterior Walls // Buildings. – 2025. – Vol. 15, № 5. – P. 810. DOI: 10.3390/buildings15050810.
- Enhanced resistance to fire of the bark-based panels bonded with clay / E.M. Tudor, C. Scheriau, M.C. Barbu et al. // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, № 16. – P. 5594. DOI: 10.3390/app10165594.
- Pásztor Z., Ronyecz I. The thermal insulation capacity of tree bark // Acta Silvatica et Lignaria Hungarica. – 2013. – Vol. 9. – P. 111–117.
- Giannatas G., Kamperidou V., Barboutis I. Tree bark utilization in insulating bio-aggregates: a review // Biofuels, Bioproducts and Biorefining. – 2021. – Vol. 15, № 6. – P. 1989–1999. DOI: 10.1002/bbb.2291.
- 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.

12. Thermophysical Properties of Larch Bark Composite Panels / L. Kristak, I. Ruziak, E.M. Tudor et al. // Polymers. – 2021. – № 13. – P. 2287. DOI: 10.3390/polym13142287.
13. Salthammer T., Mentese S., Marutzky R. Formaldehyde in the Indoor Environment // Chemical Reviews. – 2010. – Vol. 110, № 4. – P. 2536–2572. DOI: 10.1021/cr800399g.
14. Formaldehyde carcinogenicity research: 30 years and counting for mode of action, epidemiology, and cancer risk assessment / J.A. Swenberg, B.C. Moeller, K. Lu et al. // Toxicologic Pathology. – 2013. – Vol. 41, № 2. – P. 181–189. DOI: 10.1177/0192623312466459.
15. Binderless Thermal Insulation Panels Made of Spruce Bark Fibres / J. Gößwald, M.-C. Barbu, A. Petutschnigg et al. // Polymers. – 2021. – № 13. – P. 1799. DOI: 10.3390/polym13111799.
16. Using bark as heat insulation material / G. Kain, M.C. Barbu, S. Hinterreiter et al. // Bioresources. – 2013. – № 8. – C. 3718–3731.
17. Insulation panels made from thermally modified bark / Z. Pásztor, D. Tsalagkas, N. Horváth et al. // Acta silvatica et lignaria hungarica: an international journal in forest, wood and environmental sciences. – 2019. – Vol. 15, № 1. – P. 23–34. DOI: 10.2478/aslh-2019-0002.
18. Bark based porous materials obtained with a simple mechanical foaming procedure / M. Busquets Ferrer, A. Solt-Rindler, O. Vay et al. // European Journal of Wood and Wood Products. – 2023. – Vol. 81. – P. 61–71. DOI: 10.1007/s00107-022-01856-w.
19. Efficient Bio-Based Insulation Panels Produced from Eucalyptus Bark Waste / C. Fuentealba, C. Segovia, M. Pradella-Miquel et al. // Forests. – 2024. – Vol. 15, № 9. – P. 1628. DOI: 10.3390/f15091628.
20. Обромпальский Р.Л., Бакатович А.А., Бакатович Н.В. Основные характеристики тепловой изоляции, содержащей берёзовую бересту // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс]: электрон. сб. ст. VI междунар. науч. конф., Новополоцк, 30–31 окт. 2024 г. / Полоцк. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой; редкол.: Д.Н. Лазовский (председ.) и др. – Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2025. – С. 227–231.
21. Бакатович А.А., Обромпальский Р.Л. Оценка эффективности березовой коры по физическим показателям в качестве сырьевого источника для производства тепловой изоляции // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2024. – № 2. – С. 24–30. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-24-30.
22. Дейнеко И.П., Фаустова Н.М. Элементный и групповой химический состав коры и древесины осины // Химия растительного сырья. – 2015. – № 1. – С. 51–62.
23. Clonal variation in the bark chemical properties of hybrid aspen: Potential for added value chemicals / P. Korkalo, R. Korpinen, E. Beuker et al. // Molecules. – 2020. – Vol. 25, № 19. – P. 4403.

#### REFERENCES

1. Shakel' E.Y., Rossokha E.V. Razvitie «zelenogo» stroitel'stva v Respublike Belarus' // Povyshenie kachestva zhizni i obespechenie konkurentosposobnosti ekonomiki na osnove innovatsionnykh i nauchno-tehnicheskikh razrabotok: sbornik statei VII Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii «Minskie nauchnye chteniya – 2024», Minsk, 3–5 dekabrya 2024 g.: v 3 t. – Minsk: BGTU, 2024. – T. 3. – S. 365–368. (In Russ.).
2. Kisel' E.I., Sryvkina L.G. Perspektivnye razvitiya «zelenogo» stroitel'stva v Respublike Belarus' // Aktual'nye problemy sovremennykh ekonomicheskikh sistem – 2022: sbornik nauchnykh trudov / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet; redkol.: A.G. Prorovskii i dr. – Brest: BrGTU, 2022. – S. 86–92. (In Russ.).
3. Potaev G.A., Sysoeva V.A. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya «zelenogo» gradostroitel'stva v Respublike Belarus' // Arkhitektura: sbornik nauchnykh trudov. – 2018. – Vyp. 11. – S. 116–123. (In Russ.).
4. Lisowski P., Glinicki M.A. Promising biomass waste-derived insulation materials for application in construction and buildings // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2025. – Vol. 15, № 1. – P. 57–74. DOI: 10.1007/s13399-023-05192-8.
5. A Comprehensive Review of Sustainable Thermal and Acoustic Insulation Materials from Various Waste Sources / M. Ouda, A.A. Abu Sanad, A. Abdelaal, A. Krishna, M. Kandah, J. Kurdi // Buildings. – 2025. – Vol. 15, № 16. – P. 2876.
6. Lisowski P., Glinicki M.A. Promising biomass waste-derived insulation materials for application in construction and buildings // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2025. – Vol. 15, № 1. – P. 57–74.
7. Živković V., Novosel A., Krstić H. Innovative Solutions: Comparative Study of Laboratory and In Situ Measurements of Thermal Properties of Bark Insulated Exterior Walls // Buildings. – 2025. – Vol. 15, № 5. – P. 810. DOI: 10.3390/buildings15050810.
8. Enhanced resistance to fire of the bark-based panels bonded with clay / E.M. Tudor, C. Scherian, M.C. Barbu, R. Réh, L. Krišták, T. Schnabel // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, № 16. – P. 5594. DOI: 10.3390/app10165594.
9. Pásztor Z., Ronyecz I. The thermal insulation capacity of tree bark // Acta Silvatica et Lignaria Hungarica. – 2013. – Vol. 9. – P. 111–117.
10. Giannatos G., Kamperidou V., Barboutis I. Tree bark utilization in insulating bio-aggregates: a review // Biofuels, Bioproducts and Biorefining. – 2021. – Vol. 15, № 6. – P. 1989–1999. DOI: 10.1002/bbb.2291.
11. Substantial bark use as insulation material / G. Kain, M.C. Barbu, A. Teischinger, M. Musso, A. Petutschnigg // Forest Products Journal. – 2012. – Vol. 62, № 6. – P. 480–487.
12. Thermophysical Properties of Larch Bark Composite Panels / L. Kristak, I. Ruziak, E.M. Tudor, M.C. Barbu, G. Kain, R. Reh // Polymers. – 2021. – № 13. – P. 2287. DOI: 10.3390/polym13142287.
13. Salthammer T., Mentese S., Marutzky R. Formaldehyde in the Indoor Environment // Chemical Reviews. – 2010. – Vol. 110, № 4. – P. 2536–2572. DOI: 10.1021/cr800399g.
14. Formaldehyde carcinogenicity research: 30 years and counting for mode of action, epidemiology, and cancer risk assessment / J.A. Swenberg, B.C. Moeller, K. Lu, J. E. Rager, R. C. Fry, T. B. Starr // Toxicologic Pathology. – 2013. – Vol. 41, № 2. – P. 181–189. DOI: 10.1177/0192623312466459.
15. Binderless Thermal Insulation Panels Made of Spruce Bark Fibres / J. Gößwald, M.-C. Barbu, A. Petutschnigg, E.M. Tudor // Polymers. – 2021. – № 13. – P. 1799. DOI: 10.3390/polym13111799.
16. Using bark as heat insulation material / G. Kain, M.C. Barbu, S. Hinterreiter, K. Richter, A. Petutschnigg // Bioresources. – 2013. – № 8. – C. 3718–3731.

17. Insulation panels made from thermally modified bark / Z. Pásztor, D. Tsalagkas, N. Horváth, Z. Börcsök // *Acta silvatica et lignaria hungarica: an international journal in forest, wood and environmental sciences.* – 2019. – Vol. 15, № 1. – P. 23–34. DOI: 10.2478/aslh-2019-0002.
18. Bark based porous materials obtained with a simple mechanical foaming procedure / M. Busquets Ferrer, A. Solt-Rindler, O. Vay, C. Hansmann, W. Gindl-Altmutter // *European Journal of Wood and Wood Products.* – 2023. – Vol. 81. – P. 61–71. DOI: 10.1007/s00107-022-01856-w.
19. Efficient Bio-Based Insulation Panels Produced from Eucalyptus Bark Waste / C. Fuentealba, C. Segovia, M. Pradena-Miquel, A.G. César // *Forests.* – 2024. – Vol. 15, № 9. – P. 1628. DOI: 10.3390/f15091628.
20. Obrompal'skii R.L., Bakatovich A.A., Bakatovich N.V. Osnovnye kharakteristiki teplovoi izolyatsii, soderzhashchei berezovuyu berestu // *Arkhitekturno-stroitel'nyi kompleks: problemy, perspektivy, innovatsii [Elektronnyi resurs]: elektron. sb. st. VI mezhdunar. nauch. konf., Novopolotsk, 30–31 okt. 2024 g.* / Polotsk. gos. un-t im. Evfrosinii Polotskoi; red-kol.: D.N. Lazovskii (predsed.) i dr. – Novopolotsk: Polotsk. gos. un-t im. Evfrosinii Polotskoi, 2025. – S. 227–231. (In Russ.).
21. Bakatovich A.A., Obrompal'skii R.L. Otsenka effektivnosti berezovoi kory po fizicheskim pokazatelyam v kachestve syr'evogo istochnika dlya proizvodstva teplovoi izolyatsii // *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Priladnye nauki.* – 2024. – № 2. – S. 24–30. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-24-30. (In Russ., abstr. in Engl.).
22. Deineko I.P., Faustova N.M. Elementnyi i gruppovoyi khimicheskii sostav kory i drevesiny osiny // *Khimiya rastitel'nogo syr'ya.* – 2015. – № 1. – S. 51–62. (In Russ.).
23. Clonal variation in the bark chemical properties of hybrid aspen: Potential for added value chemicals / P. Korkalo, R. Korpinen, E. Beuker, T. Sarjala, J. Hellström, J. Kaseva, T. Jyske // *Molecules.* – 2020. – Vol. 25, № 19. – P. 4403.

*Поступила 16.12.2025*

## INFLUENCE OF FRACTIONAL COMPOSITION AND AVERAGE DENSITY ON THE THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF PROCESSED ASPEN BARK

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

*The article studies the granulometric composition of aspen bark, crushed in a dry and moist state, and determines the percentage content of bast fibers and bark particles by fraction. The effect of the fractional composition and average density of structure-forming materials from aspen bark, including bark particles and bast fibers, on the thermal conductivity of the resulting compositions is studied. It was found that the greatest thermal insulation effect is achieved with thin fibers of 0.5–2.5 mm in length, fractions of 0.16–0.63 mm and 0.63–1.25 mm of the bast layer of the bark. With an aspen bark bast fiber density of 125–175 kg/m<sup>3</sup>, the thermal insulation compositions provide a thermal conductivity of 0.044–0.046 W/(m·°C).*

**Keywords:** thermal conductivity coefficient, density, aspen bark, bast, rind.