

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. В.Г. ШУХОВА

**НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**  
**ВЕСТНИК**  
**БГТУ им. В.Г. ШУХОВА**

**№ 10, 2019 год**

DOI: 10.34031/article\_5db3379ba2f9e5.82013353

*\*Долгоноков А.В., Бакатович А.А.**Полоцкий государственный университет**Республика Беларусь, 211446, г. Новополоцк, ул. Блохина, д. 29**\*E-mail: andrei92d@gmail.com*

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТЕНОВЫХ БЛОКОВ НА РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДАХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЛАЖНОСТИ МАТЕРИАЛА

**Аннотация.** В статье рассмотрена перспектива использования растительных сельскохозяйственных отходов в качестве заполнителей при разработке новых строительных материалов в виде стеновых блоков. Приведены результаты исследований по влагонасыщению стеновых блоков при относительной влажности воздуха 97 %. Проанализирована кинетика изменения влажности и коэффициента теплопроводности блоков на крупном заполнителе из ржаной и гречишной соломы, и мелком – костре льна и измельченной гречихе. На основе экспериментальных данных получены эмпирические зависимости коэффициента теплопроводности от влажности стеновых блоков. После максимального влагонасыщения наилучшие показатели зафиксированы на образцах костросоломенных блоков. Влажность композита не превысила 10,9 % при увеличении коэффициента теплопроводности до 0,104 Вт/(м·°С).

В результате проведенных исследований предлагается решение по рациональному использованию растительных отходов для получения экологически чистых строительных стеновых блоков с возможным применением при возведении несущих и ненесущих стен в одноэтажных зданиях и в многоэтажном каркасном строительстве при заполнении наружных стеновых проемов.

**Ключевые слова:** ржаная солома, костра льна, гречишная солома, стеновой блок, теплопроводность, влажность, плотность.

**Введение.** Организация производства экологически чистых строительных материалов на растительном сырье является одной из актуальных задач в строительной отрасли, связанных с сокращением выбросов углекислого газа, оказывающего наибольшее негативное воздействие на климат планеты. В мире на производство строительных материалов приходится 10 % всех выбросов CO<sub>2</sub> [1]. По причине отсутствия эффективных технологий удаления углекислого газа, необходимо ограничивать суммарное количество выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу. Использование растительного сырья для замены существующих материалов является возможным решением по снижению выбросов CO<sub>2</sub> в окружающую среду. Производство строительных материалов на основе растительного сырья нейтрализует больше углекислого газа, чем выделяет в атмосферу, так как в процессе выращивания сельскохозяйственные культуры поглощают большие объемы углекислого газа [2]. Данная закономерность стимулирует научный интерес к исследованиям по рациональной утилизации отходов растениеводства, увеличивающихся в объемах с каждым годом. Значительных успехов удалось достичь в производстве строительных материалов, содержащих солому различных злаковых культур, относящуюся к естественным и постоянно возобновляемым источникам сырья, получаемым во многих регионах мира. К наибо-

лее простой технологии применения таких материалов относится возведение ограждающих стеновых конструкций зданий из соломенных тюков.

При строительстве домов из соломенных тюков существует два конструктивных решения. Наиболее распространенным является конструкция здания из несущего деревянного каркаса с заполнением соломенными тюками наружных стеновых проемов. Второй вариант предусматривает использование соломенных тюков в качестве сборных элементов несущих стен. Тюки укладываются с перевязкой швов как в кирпичной кладке, а для дополнительной жесткости и устойчивости стен в тюки вертикально вбивают деревянные колья. При устройстве стропильной системы по верху стены предварительно укладывают распределительные балки [3].

Первое упоминание об использовании соломенных тюков приходится на конец XIX века, когда в штате Небраска (США) возвели первых 70 жилых домов. Часть зданий сохранилась до сегодняшнего времени. Однако, использование соломенных тюков в качестве строительного материала вскоре существенно сократилось по причине строительства автомобильных и железных дорог и возможности транспортировать древесину, металл, камень [4].

Европейские страны в конце XX века вернулись к технологии возведения домов из соломенных тюков. Так в Дании первый соломенный дом

построен в 1998 году. Исследовательский институт Дании в 2001 году приступил к испытаниям физико – механических характеристик соломенных тюков. Ежегодно на территории страны из соломенных тюков возводится 10–20 домов. Началом строительства соломенных домов в Эстонии считается 2006 год и на сегодняшний день построено 8 зданий. В Литве и Латвии за период 1996–2000 годов также возведены первые здания из соломы [5].

Основными преимуществами конструкции из соломенных тюков являются высокие теплоизоляционные свойства, обеспечение здорового микроклимата в помещении и отсутствие негативного воздействия на окружающую среду, по причине использования возобновляемых, биоразлагаемых отходов в сочетании с глиняной штукатуркой [6].

Проведены исследования теплотехнических параметров стен из соломенных тюков с практической реализацией учеными из Румынии. Средние значения коэффициента теплопроводности равны 0,053–0,061 Вт/(м·°С). Данные показатели позволяют обеспечить тепловую защиту зданий в сельской местности [7]. На начало 2012 года в Румынии построен один соломенный дом с деревянным каркасом. По прошествии 2-х лет завершено строительство 11 домов на основе материалов из соломы [8]. Использование соломы на сегодняшний день является альтернативой современным строительным материалам. Стены из соломенных тюков, в отличие от традиционных материалов, улучшают качество воздуха в помещениях благодаря своей способности дышать, а также не выделяют вредных веществ в виде формальдегидов. Необходимо отметить, что использование соломы без минерального связующего не обеспечивает стойкость получаемых стеновых материалов (панелей, блоков и т.п.) к негативному воздействию мелких грызунов [9].

На основе соломенных тюков производят стеновые панели «Есососоп» (Литва) и «Экобуд» (Россия) толщиной 400 мм с коэффициентом теплопроводности 0,05–0,065 Вт/м·°С [10]. Панели состоят из тюков ржаной соломы плотно запрессованных в деревянный каркас с помощью гидравлического пресса, поэтому со временем соломенное заполнение не дает усадку. Конструкция имеет высокую пожаробезопасность по причине отсутствия необходимого объема воздуха для горения соломы в прессованных панелях. Для производства соломенных панелей «Есососоп» используют солому влажностью не более 15 %. Теплопроводность соломенной панели равна 0,054–0,059 Вт/(м·°С).

Также повышенное внимание в Беларуси уделяется утилизации костры льна, образующейся при переработке льняной тресты. Костра является источником повышенной пожарной опасности при хранении в отвалах на территории льнозаводов.

Льняную костру возможно использовать для изготовления композитной фанеры и древесностружечных плит, а при высоком давлении формования для плит без вяжущего компонента [11].

В 1985 году начали производить теплозвукоизоляционные плиты с низкой плотностью, так называемые плиты сухого формования, состоящие из костры льна с добавлением смолы (до 8 %) и парафина (до 1 %). Выпуск плит освоен в Таиланде, Великобритании и Канаде [12].

Костра льна используется для производства легких бетонов [13]. Содержание костры льна достигает до 20 % от массы цемента. Исследование показало, что увеличение количества льняных частиц замедляет гидратацию цемента. Химическая обработка заполнителя снижает воздействие сахаров, содержащихся в костре, на твердение вяжущего. Прочность бетона на сжатие при 20 % содержании льняных частиц достигает 4,8 МПа, а прочность на изгиб 1,2 МПа.

Важной характеристикой стеновых материалов наряду с прочностными показателями является теплоизолирующая способность. Во время эксплуатации на теплопроводность значительное влияние оказывает влажность материала, постоянно изменяющаяся с течением времени. В научных работах [14, 15] рассмотрено влияние влажности на коэффициент теплопроводности и получены эмпирические формулы, отражающие данное влияние для пеноизола, пенополистирола, силикатного кирпича. Для новых строительных материалов также требуется определение зависимостей коэффициентов теплопроводности от влажности.

Как известно, увеличение влажности материала приводит к повышению коэффициента теплопроводности [16], что ухудшает теплотехнические характеристики стеновых материалов. Для тепловлажностного расчета ограждающей конструкции необходимо определить влияние влажности на коэффициент теплопроводности, так как в процессе эксплуатации этот фактор может оказаться решающим в определении эффективной работы материала и его долговечности [17].

При разработке нового стенового материала нами ставилась задача получить конструкционные блоки на основе соломы и костры льна на цементном вяжущем с обеспечением прочности на сжатие не менее 2 МПа с повышенными тепло-

изоляционными свойствами. К основным требованиям также относилась экологическая безопасность блоков для здоровья человека и окружающей среды. По итогам исследований основных физико-механических характеристик получены стеновые блоки плотностью 500–600 кг/м<sup>3</sup> и коэффициентом теплопроводности 0,075–0,085 Вт/(м·°С). Однако, как отмечается в работах [17, 18], для доказательства эффективности и долговечности стеновых блоков необходимо проводить исследования по установлению влияния влажности материала на показатель теплопроводности. В этой связи проведен комплекс исследований по установлению влияния показателя влажности материала на коэффициент теплопроводности стеновых блоков на основе отходов сельскохозяйственного производства и ниже приведены результаты выполненных исследований.

**Методология.** В связи с отсутствием в нормативных документах стандартной методики по определению зависимости коэффициента теплопроводности от влажности за основу взята методика, применяемая Давыденко Н.В. в исследованиях теплоизоляционных материалов на растительном сырье [19].

Для определения влияния влажности на коэффициент теплопроводности из стеновых блоков в возрасте 28 суток вырезали образцы в виде плит размером 250×250×30 мм. Плиты помещали в сушильный шкаф и высушивали при температуре +50 °С до постоянной массы. После остывания образца до температуры +20±2 °С определяли коэффициент теплопроводности с использованием прибора ИТП – МГ4. Затем образцы помещали в герметичную камеру с гидрозатвором на сетчатую подставку над водой. Относительная влажность воздуха в камере составляла 97 %. Плотность и коэффициент теплопроводности образцов во влажном состоянии измеряли через 2, 5, 10, 25, 60 (65) суток. Максимальное время выдержки в камере составило 60 (65) суток в зависимости от вида заполнителя, так как за этот период достигнуто наибольшее влагонасыщение образцов-плит. Под образцом подразумевается партия из 3 плит.

**Основная часть.** Для изготовления стеновых блоков в качестве крупных заполнителей использовалась дробленая солома ржи и гречихи фракцией 20–40 мм. Костру льна и измельченную гречишную солому размером до 10 мм использовали в виде мелкого заполнителя. Вяжущим компонентом являлся цемент. В качестве добавки, нейтрализующей действие сахаров, вводили известь. Расход материалов в экспериментальных составах на 1 м<sup>3</sup> равен: цемент – 289 кг,

известь – 71 кг, заполнитель – 170 кг. Образцы материалов представлены на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид образцов на основе смеси соломы и костры льна

Для стеновых материалов в сухом состоянии на основе соломы и соломы с кострой коэффициенты теплопроводности равны 0,085 Вт/(м·°С) и 0,075 Вт/(м·°С) соответственно. В сухом состоянии коэффициент теплопроводности стеновых блоков на основе гречишной соломы составил 0,1 Вт/(м·°С), а блоков на основе гречишной смеси (дробленая и измельченная солома) – 0,092 Вт/(м·°С). Плотность всех образцов в сухом состоянии соответствует 530 кг/м<sup>3</sup>. Результаты лабораторных исследований приведены в таблице 1.

Проведенные исследования показали, что за первые 2 суток плотность соломенных плит возросла на 20 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности на 0,005 Вт/(м·°С), а влажность образца достигла 3,8 %. Значение плотности костросоломенного образца 6 возросло на 10 кг/м<sup>3</sup> при влажности 1,9 %. Показатель коэффициента теплопроводности незначительно увеличился на 0,004 Вт/(м·°С). Влажность образца 1 относительно величины показателя плит 6 увеличилась в 2 раза, а коэффициент теплопроводности соломенных плит возрос на 14 % в сравнении с композитом на основе костросоломенной смеси. Плотность плит на заполнителе из гречишной соломы (образец 11) в первые 2 суток выросла на 28 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности на 0,01 Вт/(м·°С), а влажность образца составила 5,3 %. Влажность плит из гречишной смеси (образец 16) составила 4,5%, при увеличении коэффициента теплопроводности на 0,009 Вт/(м·°С) и плотности на 24 кг/м<sup>3</sup>. Влажность образца 11 на основе гречишной соломы повысилась на 39 % по отношению к значению образца 1 на заполнителе из ржаной соломы, а коэффициент теплопроводности возрос на 22 %. Аналогичная зависимость наблюдается для образцов на основе костросоломенной и гречишной

смеси. Так, показатель влажности образца на основе гречишной смеси увеличился в 2,4 раза, а коэффициент теплопроводности на 28 % относительно образца из смеси соломы с кострой. Тепло-

проводность образца 11 из гречишной соломы повысилась на 9 % относительно показателя образца 16 на основе гречишной смеси при возрастании влажности на 18 %.

Таблица 1

## Показатели плотности, влажности и теплопроводности стеновых материалов

№ образца	Вид заполнителя	Время выдерживания образца в камере, сутки	Показатели влажного образца			Коэффициент изменения теплопроводности
			плотность, кг/м <sup>3</sup>	влажность, %	коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	
1	солома ржи	2	550	3,8	0,09	1,059
2		5	562	6,1	0,098	1,153
3		10	570	7,5	0,106	1,247
4		25	594	12,1	0,112	1,318
5		60	608	14,8	0,119	1,4
6	солома ржи с кострой льна	2	540	1,9	0,079	1,053
7		5	548	3,4	0,086	1,147
8		10	557	6,0	0,092	1,227
9		25	577	8,9	0,097	1,293
10		60	588	10,9	0,104	1,387
11	гречишная солома	2	558	5,3	0,11	1,1
12		5	581	9,5	0,124	1,24
13		10	587	10,8	0,129	1,29
14		25	604	14	0,137	1,37
15		65	629	17,8	0,151	1,51
16	гречишная смесь (дробленая и измельченная солома)	2	554	4,5	0,101	1,1
17		5	574	8,3	0,109	1,19
18		10	578	9	0,115	1,25
19		25	590	11,3	0,122	1,33
20		65	604	13,8	0,13	1,41

По окончании эксперимента отмечено, что наиболее интенсивно влажность образцов увеличивалась за первые 10 суток и составила 51 % – 65 % от итоговых показателей в возрасте 60 суток. Для стенового материала (образец 3) влажность увеличилась в 2 раза относительно показателя образца 1 за первые 2 суток, а значение коэффициента теплопроводности возросло на 17 %. Влажность костросоломенных плит 8, в сравнении с показателем образца 6, повысилась в 3,2 раза. При этом произошло увеличение коэффициента теплопроводности на 17 %. Влажность образца 13 на заполнителе из гречишной соломы возросла в 2 раза относительно показателей образца 11 за первые 2 суток и составила 10,8 %, при увеличении на 17 % коэффициента теплопроводности. Для образца 18 из гречишной смеси показатель влажности повысился также в 2 раза в сравнении с образцом 16 и на 14 % возрос коэффициент теплопроводности.

Кроме того, установлено, что при испытаниях после 10 суток выдержки в камере, влажность образца 3 на 25 % выше относительно величины образца 8, а коэффициент теплопроводности возрос на 15 %. Образец 13 на основе гречишной соломы превышает показатель влажности образца 18 из гречишной смеси на 20 % при увеличении коэффициента теплопроводности на 12 %.

При достижении максимальной влажности экспериментальными составами через 60 суток показатель образца 5 вырос в 2 раза относительно показателя образца 3 при выдержке 10 суток. Коэффициент теплопроводности возрос на 12 % при увеличении плотности на 38 кг/м<sup>3</sup>. Для костросоломенных плит (образец 10) влажность повысилась в 1,8 раза относительно значения образца 8. В тоже время показатель плотности показал прирост на 31 кг/м<sup>3</sup> и коэффициент теплопроводности на 13 %. Плиты на гречишной соломе при выдержке 65 суток имеют значение влажности в 1,7

раза выше при сравнении с образцом 13 (10 суток). При этом плотность возросла на  $42 \text{ кг/м}^3$ , а коэффициент теплопроводности на 17 %. Показатель влажности для плит на заполнителе из гречишной смеси (образец 20) составил 13,8 %, что в 1,5 раза превышает влажность образца 18 при выдержке 10 суток. Повышение плотности составило  $26 \text{ кг/м}^3$  при увеличении коэффициента теплопроводности на 13 %.

Показатель плотности стенового материала на заполнителе из соломы ржи при выдержке в камере 60 суток на  $20 \text{ кг/м}^3$  превысил значение образца 10 при увеличении влажности на 36 %. Из анализа экспериментальных данных (таблица 1) следует, что по истечении 60 суток коэффициент теплопроводности образцов плит из смеси соломы с кострой составляет  $0,104 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$ , что меньше на 15 % показателя образца на основе ржаной соломы равного  $0,119 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$ .

По окончании эксперимента плотность образца 15 на гречишной соломе превысила показатель материала из гречишной смеси (образец 20) на  $25 \text{ кг/м}^3$ . Влажность образца 15 возросла на 29 % при сравнении с показателем образца 20, а коэффициент теплопроводности увеличился на 16 %.

Более высокие показатели влажности образцов-плит на основе ржаной соломы объясняются большей сорбционной влажностью соломы по сравнению с кострой льна. По этой же причине скорость насыщения влагой материала с заполнителем из ржаной соломы увеличивается, что ухудшает теплофизические характеристики соломенных блоков.

Дополнительно проведены исследования по определению влажности дробленой соломы ржи и гречихи, костры льна и измельченной соломы гречихи в насыпном состоянии в камере над водой при относительной влажности воздуха 97 %. Дробленая солома в основном представляет собой трубки-цилиндры длиной 20–40 мм. Исследования показали, что максимального значения равного 35 % показатель влажности ржаной соломы достигает через 15 суток, а предельная влажность костры льна составляет 12 % на 9 сутки при температуре  $+20 \text{ }^\circ\text{С}$ . Полученные результаты по сорбционной влажности костры льна подтверждаются исследовательскими данными, полученными сотрудниками Костромского университета [20]. Влажность дробленой измельченной гречихи и гречишной соломы составила 40 %. Выдерживание заполнителей в камере до набора максимальной влажности продолжалось в течение 12 и 15 суток соответственно. Показатель влажности соломенных трубок ржи ниже на 14 % значений измельченной гречихи и дробленой гречишной соломы. Влажность костры льна в 3 раза

ниже показателя дробленой соломы ржи и в 3,3 раза – дробленой измельченной соломы гречихи.

Кроме того, при формовке стеновых блоков на основе соломы ржи и гречихи происходит смятие и деформация всех соломенных трубок, что приводит к нарушению целостности внешней оболочки и микроструктуры заполнителя. Локальные разрушения внешнего защитного слоя и строения микроструктуры способствуют увеличению сорбции водяных паров деформированными трубками соломы.

Введение костры льна и измельченной гречихи в качестве мелкого заполнителя влечет за собой уменьшение объема костросоломенной и гречишной смеси в сравнении с объемом соломенного заполнителя в насыпном состоянии, что способствует при формовании блоков только смятию трубок соломы ржи и гречихи диаметром 3–5 мм, а трубки диаметром менее 3 мм не подвергаются деформациям и не имеют повреждений своей микроструктуры. Присутствие в каркасе заполнителя неповрежденных трубок соломы в количестве 40–50 % от массы крупного заполнителя, дополнительно способствует снижению сорбции водяных паров стеновыми блоками на основе костросоломенной и гречишной смеси.

По результатам обработки данных эксперимента, получены графики зависимостей (рис. 2) коэффициентов изменения теплопроводности от влажности стеновых материалов на основе соломы ржи и гречихи, а также костросоломенной и гречишной смеси.

При анализе построенных графиков полученных по данным таблицы 1 установлено, что зависимость коэффициента теплопроводности стенового материала от изменения влажности аппроксимируется линейной функцией с коэффициентом корреляции  $R^2 = 0,9783$  для образца на основе дробленой ржаной соломы и  $R^2 = 0,9861$  для материала с заполнителем из костросоломенной смеси. Для материалов, содержащих дробленую гречишную солому коэффициент корреляции составил  $R^2 = 0,9879$ , а для образцов из гречишной смеси –  $R^2 = 0,9777$ .

На основании лабораторных исследований и построенных графиков получены эмпирические зависимости 1–4 для стеновых материалов на заполнителях из ржаной и гречишной соломы, а также костросоломенной и гречишной смеси в виде выражений:

$$\lambda_w = \lambda \cdot (1 + 0,0279 \cdot W), \quad (1)$$

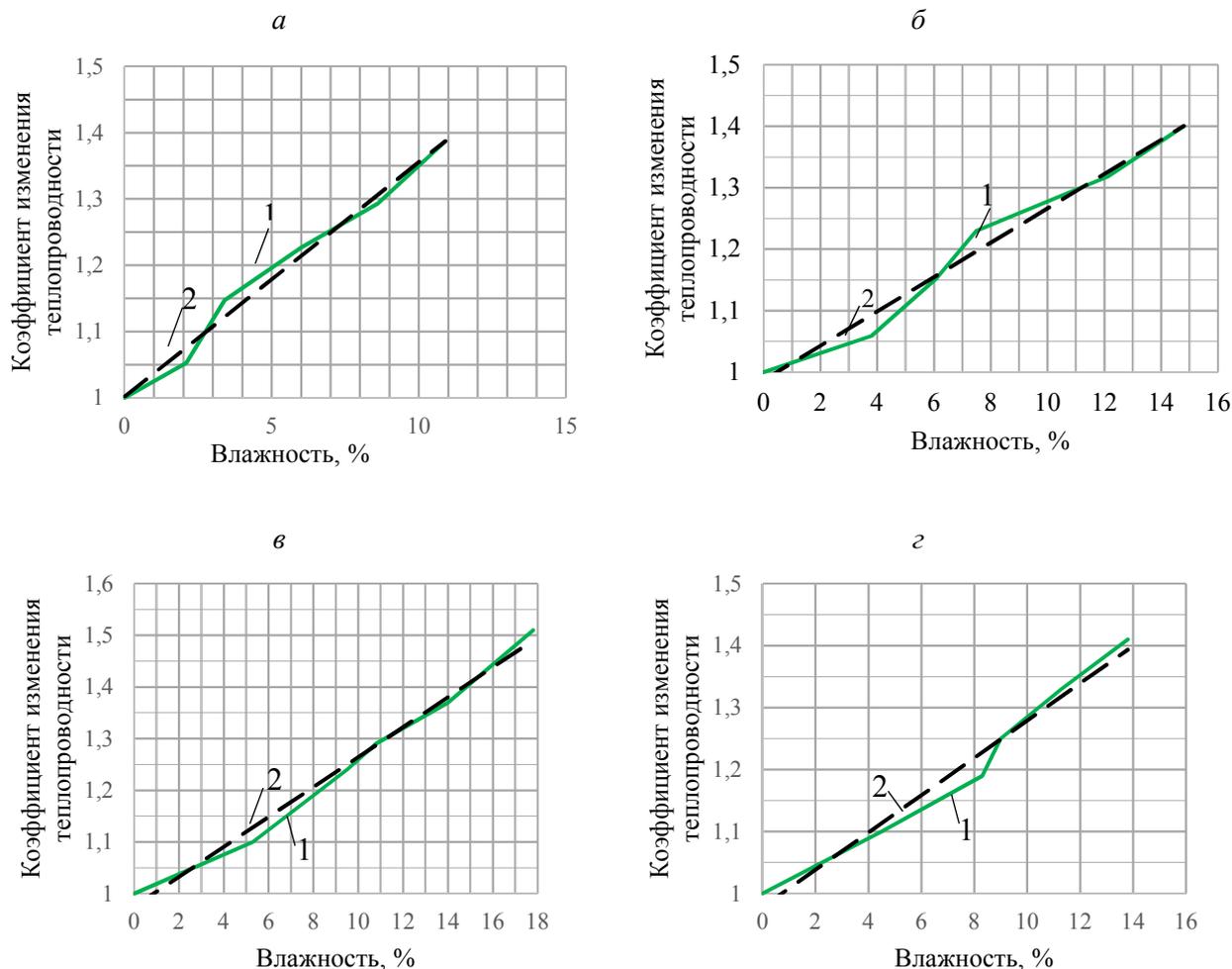
$$\lambda_w = \lambda \cdot (1 + 0,0354 \cdot W) \quad (2)$$

$$\lambda_w = \lambda \cdot (1 + 0,0291 \cdot W) \quad (3)$$

$$\lambda_w = \lambda \cdot (1 + 0,0301 \cdot W) \quad (4)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность сухого стенового материала, Вт/(м·°С);  $W$  – влажность стенового мате-

риала, %; 0,0279; 0,0354; 0,0291; 0,0301 - коэффициенты переменной, которые определяются для каждого материала экспериментальным путем;  $\lambda_w$  – теплопроводность материала при заданной влажности, Вт/(м·°С).



1 – экспериментальные данные; 2 – аппроксимирующая кривая

Рис. 2. Зависимость коэффициента изменения теплопроводности от влажности стенового материала на основе а – дробленой ржаной соломы; б – из смеси дробленой ржаной соломы и костры льна; в – дробленой гречишной соломы; г – гречишной смеси

Используя выражения (1) – (4), построены зависимости коэффициента теплопроводности материала на основе ржаной соломы (прямая 1) и материала из смеси соломы с кострой (прямая 2) от заданных значений влажности (рис. 3). Также представлены зависимости для стенового материала с применением гречишной соломы (прямая 1) и гречишной смеси (прямая 2) на рис. 4.

Полученные эмпирические зависимости для стеновых материалов обеспечивают возможность прогнозировать увеличение или понижение коэффициента теплопроводности в зависимости от влажностного режима эксплуатации стеновых ограждений зданий. Определенный расчетами влажностный режим работы стенового материала является необходимым условием

для обоснования долговечности и оценки эффективности разработанных стеновых блоков. Зависимости 1 – 4 предназначены для использования при тепловлажностном расчете проектируемых стеновых ограждений из материалов на основе соломы ржи и гречихи, а также костросоломенной и гречишной смеси.

**Выводы.** По результатам исследований установлено, что при нахождении стеновых материалов, содержащих заполнители из ржаной, гречишной соломы и костры льна в условиях 97 % относительной влажности воздуха происходит влагонасыщение композитов и возрастание коэффициента теплопроводности. При этом максимальное влагонасыщение образцов наступает на 60 (65) сутки.

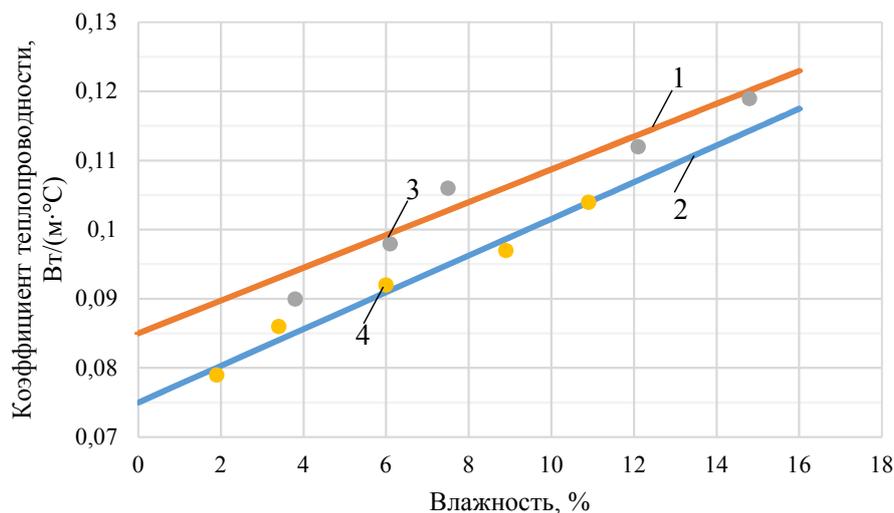


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности от влажности

- 1 – эмпирическая зависимость для стенового материала из дробленой ржаной соломы;  
 2 – эмпирическая зависимость для стенового материала из смеси дробленой ржаной соломы и коостры льна;  
 3 – экспериментальные данные для стенового материала из дробленой ржаной соломы;  
 4 – экспериментальные данные для стенового материала из смеси дробленой ржаной соломы и коостры льна

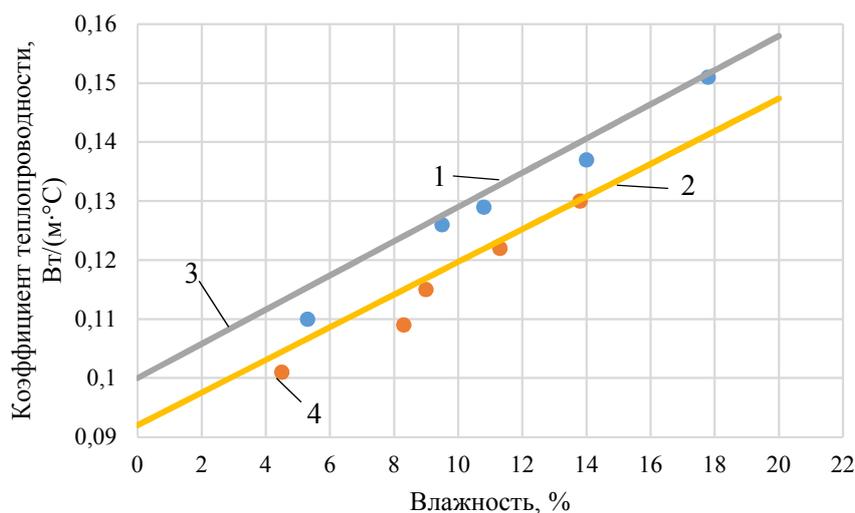


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности от влажности

- 1 – эмпирическая зависимость для стенового материала из дробленой гречишной соломы;  
 2 – эмпирическая зависимость для стенового материала из гречишной смеси;  
 3 – экспериментальные данные для стенового материала из дробленой гречишной соломы;  
 4 – экспериментальные данные для стенового материала из гречишной смеси

Плотность образцов по окончании эксперимента возрастает на 58–99 кг/м<sup>3</sup> относительно начального показателя в сухом состоянии, а влажность составляет 10,9–17,8 %. Коэффициенты теплопроводности стеновых блоков увеличиваются на 39–51 %.

Наилучшие характеристики зафиксированы для стеновых материалов на основе коостросоломенной смеси. После максимального влагонасыщения, влажность блоков на основе соломы и коостры льна не превышала 10,9 %. Плотность композита увеличилась на 58 кг/м<sup>3</sup> и равна 588

кг/м<sup>3</sup>. Прирост коэффициента теплопроводности составил 39 %, а показатель достиг значения 0,104 Вт/(м·°С).

Полученные эмпирические зависимости коэффициента теплопроводности от влажности для стеновых блоков на основе соломы ржи, гречихи и коостры льна позволяют на стадии проектирования объектов определить теплотехнические характеристики ограждающих конструкций в заданных условиях эксплуатации и оценить работу стенового материала с позиции

обеспечения эффективной теплоизолирующей способности.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions. France: IEA, 2007.
2. Wall K., Walker P., Gross C, Mander. Development and testing of a prototype straw bale house // Proceeding of the institution of Civil Engineers: Construction Materials. 2012. Vol. 165. Issue 6. Pp. 377–384. <https://doi.org/10.1680/coma.11.00003>
3. Широков Е.И. Экотехнология биопозитивных ограждающих конструкций из соломенных блоков в Беларуси. В 2 ч. Ч. 1. Экодома из соломы: технология строительства. Минск: Изд-во Адукацыя і выхаванне, 2007. 40 с.
4. Raamets J., Ruus, A., Ivask M. Assessment of Indoor Air Quality and Hygrothermal Conditions of Boarders During Autumn, Winter and Spring in Two of Estonian Straw-Bale Houses. In Cold Climate HVAC Conference; Johansson, D., Bagge, H., Wahlström, A., Eds.; Springer: Cham, Germany, 2019. Pp. 815–823.
5. Milutienė E., Jurmann K., Keller L. Straw Bale Building – Reaching Energy Efficiency and Sustainability in Northern Latitudes. Abstract Book of 11th International conference on Solar Energy at High Latitudes “North Sun 2007”, Riga, 30 th May–1st June, 2007. Pp. 38–39.
6. Milutienė E. House Embodied Energy and Zero Energy Building Concept // Environmental Research, Engineering and Management. 2010. No.4 (54), Pp. 62–71
7. Pruteanu M. Investigations regarding the thermal conductivity of straw // Bul. Inst. Politehnic Jassy. 2010. Vol. 56(60). Pp. 9–16.
8. Cantor D.M., Manea D.L. Using Wheat Straw in Construction, Pro Environment. 2015. Vol. 8. Pp.17–23.
9. Lawrence, M., Heath, A., Walker, P. The impact of external finishes on the weather resistance of straw bale walls. In: 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies, NOCMAT 2009, 6-9 September 2009, University of Bath, UK.
10. Долгонок А., Давыденко Н., Бакатович А. Растительные отходы для производства эффективных стеновых материалов // Материалы международной научно – технической конференции: Геодезия, картография, кадастр, ГИС – проблемы и перспективы развития, Новополоцк, 9 – 10 июня 2016 г.: в 2 частях / Полоцкий гос. ун – т, 2016. часть 2. С. 132–137.
11. Ермачкова В.В., Куликова М.Г. Сравнительная характеристика энергоэффективности биокomпозитных материалов // Эволюция современной науки. Сборник статей международной научно–практической конференции. 2017. С. 25–28.
12. Живетин В.В., Гинзбург Л.Н., Ольшанская О.М. Лен и его комплексное использование. М.: Информ-Знание, 2002. 400 с.
13. Langlet T., Aamr-Daya E., Benazzouk A., Dheilly R.M., Queneudec M. The suitability of utilising flax by-product material for lightweight cement composites, Construction and Building Materials. 2007.
14. Шильд Е., Кассельман Х.-Ф., Дамен Г., Поленц Р. Строительная физика. М.: Стройиздат. 1982. 296 с.
15. Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов М: НИИСФ Госстроя СССР, 1965.
16. Давыденко, Н.В., Бакатович А.А. Влияние показателя влажности на коэффициент теплопроводности соломенных и костросоломенных теплоизоляционных материалов // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. 2013. № 8. С. 73–78.
17. Lawrence M., Heath A., Walker P. Determining moisture levels in straw bale construction. Construction and Building Materials. 2009. Vol. 23. Is. 8. Pp. 2763–2768. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.03.011>
18. Романовский С.А., Бакатович А.А. Особенности влияния влажности на теплопроводность волокнистого теплоизоляционного материала из очёсов льна // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: материалы II нац. научно-практич. конф., Омск, 18–19 апреля 2019г. / Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет; ред. кол. А.П. Жигадло [и др.]. Омск, 2019. С. 432–439.
19. Bakatovich A., Davydenko N., Gaspar F. Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste // Energy and Buildings. 2018. Vol. 180. Pp. 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.032>
20. Угрюмов С.А. Совершенствование технологии производства композиционных материалов на основе древесных наполнителей и костры льна : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.21.05 / С.А. Угрюмов. Кострома, 2009. 295 с.

*Информация об авторах*

**Долгонок Андрей Валентинович**, аспирант кафедры строительного производства. E-mail: andrei92d@gmail.com. Полоцкий государственный университет. Республика Беларусь, 211446, Новополоцк, ул. Блохина, д. 29.

**Бакатович Александр Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства. E-mail: a.bakatovich@psu.by. Полоцкий государственный университет. Республика Беларусь, 211446, Новополоцк, ул. Блохина, д. 29.

Поступила в августе 2019 г.

© Долгонон А.В., Бакатович А.А., 2019

**\*Dalzhonak A.V., Bakatovich A.A.**

Polotsk State University

Republic of Belarus, 211446, Novopolotsk, st. Blokhin, 29

\*E-mail: andrei92d@gmail.com

## PECULIARITIES OF KINETICS OF THE COEFFICIENT OF THERMAL CONDUCTIVITY DEPENDING ON THE HUMIDITY RATE OF WALL BLOCKS MADE OF AGRICULTURAL WASTES

**Abstract.** The article considers the prospect of plant wastes usage as aggregates while constructing new building materials in the form of wall blocks. The results of the research on water absorption of the wall blocks at the relative air humidity of 97 % are presented. The kinetics of change in humidity and the coefficient of thermal conductivity of the blocks with the rye and buckwheat straw coarse aggregate, and also the blocks with fine coarse aggregate of flax boon and atomized buckwheat are analyzed. Empirical dependences of the coefficient of thermal conductivity on the rate of humidity of wall blocks are obtained from experimental observations. After the maximum rate of hygroscopic moisture absorption, the best indexes are recorded on the blocks made of flax and straw. The humidity rate of the composite does not exceed 10,9 % with the increase of thermal conductivity up to 0.104 W/(m·°C).

In the result of the research, the solution to the sustainable use of agricultural wastes to get environmental responsible building materials is proposed. Blocks can be used in the erection of supporting and filler walls in one-story buildings and multistoried frame housing construction when filling exterior wall openings.

**Keywords:** rye straw, flax boon, buckwheat straw, wall block, thermal conductivity, humidity, density.

### REFERENCES

1. Tracking Industrial Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions. France: IEA, 2007.
2. Wall K., Walker P., Gross C, Mander. Development and testing of a prototype straw bale house. Proceeding of the institution of Civil Engineers: Construction Materials. 2012. Vol. 165. Issue 6. Pp. 377–384. <https://doi.org/10.1680/coma.11.00003>
3. Shirokov E.I. Eco-technology of environmentally friendly cladding structures made from straw blocks in Belarus. P1. Green building from straw: construction techniques [Ekotekhnologiya biopozitivnyh ograždnyushchih konstrukcij iz solomennyh blokov v Belarusi. V 2 ch. CH. 1. Ekodoma iz solomy: tekhnologiya stroitel'stva]. Minsk: Publishing Education and upbringing, 2007. 40 p. (rus)
4. Raamets J., Ruus A., Ivask M. Assessment of Indoor Air Quality and Hygrothermal Conditions of Boarders During Autumn, Winter and Spring in Two of Estonian Straw-Bale Houses. In Cold Climate HVAC Conference; Johansson, D., Bagge, H., Wahlström, A., Eds.; Springer: Cham, Germany, 2019. Pp. 815–823.
5. Milutienė E., Jurmann K., Keller L. Straw Bale Building – Reaching Energy Efficiency and Sustainability in Northern Latitudes. Abstract Book of 11th International conference on Solar Energy at High Latitudes “North Sun 2007”, Riga, 30 th May–1st June, 2007. Pp. 38–39.
6. Milutienė E. House Embodied Energy and Zero Energy Building Concept. Environmental Research, Engineering and Management. 2010. No. 4 (54). Pp. 62–71.
7. Pruteanu M. Investigations regarding the thermal conductivity of straw. Bul. Inst. Politehnic Jassy. 2010. Vol. 56(60). Pp. 9–16.
8. Cantor D.M., Manea D.L. Using Wheat Straw in Construction, Pro Environment. 2015. Vol. 8. Pp. 17–23.
9. Lawrence M., Heath A., Walker P. The impact of external finishes on the weather resistance of straw bale walls. In: 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies, NOCMAT 2009, 6-9 September 2009, University of Bath, UK.
10. Dalzhonak A., Davydenko N., Bakatovich A. Plant wastes for manufacturing effective wall materials [Rastitel'nye othody dlya proizvodstva effektivnyh stenovykh materialov]. Materials of the international scientific and technical conference: Geodesy, cartography, cadastre, GIS - problems and development prospects, Novopolotsk, 9 – 10 June 2016. In 2 part / Polotsk State University, 2016. Part 2. Pp. 132–137. (rus)

11. Ermachkova V.V., Kulikova M.G. Comparative analysis of biocomposite materials energy efficiency. Evolution of modern science [Svravnitel'naya harakteristika energoeffektivnosti biokompozitnykh materialov]. The evolution of modern science. Collection of articles of the international scientific and practical conference. 2017. Pp. 25–28. (rus)
12. Zhivetin V.V., Ginzburg L.N., Ol'shanskaya O.M. Flax and its multiple use [Len i ego kompleksnoe ispol'zovanie]. M.: Inform Knowledge, 2002. 400 p. (rus)
13. Langlet T., Aamr-Daya E., Benazzouk A., Dheilily R.M., Queneudec M. The suitability of utilising flax by-product material for lightweight cement composites, Construction and Building Materials. 2007.
14. Shil'd E., Kassel'man H.-F., Damen G., Polenc R. Construction Physics [Stroitel'naya fizika]. M.: Construction Publisher. 1982. 296 p. (rus)
15. Franchuk A.U. The tables of thermal characteristics of building materials [Tablicy teploekhnicheskikh pokazatelej stroitel'nykh materialov]. M: NIISF Gosstroy of the USSR, 1965. (rus)
16. Davydenko N.V., Bakatovich A.A. The influence of humidity rate on the coefficient of thermal conductivity of straw and flax-straw thermal insulating materials [Vliyanie pokazatelya vlazhnosti na koeffitsient teploprovodnosti solomennykh i kostrosolomennykh teploizolyatsionnykh materialov]. Herald of Polotsk State University. Ser. F, Civil engineering. Applied sciences. 2013. No 8. Pp. 73–78. (rus)
17. Lawrence M., Heath A., Walker P. Determining moisture levels in straw bale construction. Construction and Building Materials. 2009. Vol. 23. Issue 8. Pp. 2763–2768. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.03.011>
18. Romanovskij S.A., Bakatovich A.A. Peculiarities of the influence of humidity on the thermal conductivity of fibrous heat-insulating material from combing of flax [Osobennosti vliyaniya vlazhnosti na teploprovodnost' voloknistogo teploizolyatsionnogo materiala iz ochyosov l'na]. Education. Transport. Innovation Construction: materials II nat. scientific and practical Conf., Omsk, April 18-19, 2019. The Siberian State Automobile and Highway University; ed. count A.P. Gigadlo [et al.]. Omsk. 2019. Pp. 432–439. (rus)
19. Bakatovich A., Davydenko N., Gaspar F. Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste. Energy and Buildings. 2018. Vol. 180. Pp. 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.032>
20. Ugryumov S.A. Improving of production technology of composite materials on the base of wood filler and flax boon [Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva kompozitsionnykh materialov na osnove drevesnykh napolnitelej i kostry l'na]: dis. ... dr. tech. Sciences: 05.21.05 / S.A. Ugryumov. Kostroma, 2009. 295 p. (rus)

#### Information about the authors

**Dalzhonak, Andrei V.** Postgraduate student. E-mail: andrei92d@gmail.com. Polotsk State University. Republic of Belarus, 211446, Novopolotsk, st. Blokhin, 29.

**Bakatovich, Alexander A.** PhD, Assistant professor. E-mail: a.bakatovich@psu.by. Polotsk State University. Republic of Belarus, 211446, Novopolotsk, st. Blokhin, 29.

---

*Received in August 2019*

#### Для цитирования:

Должонок А.В., Бакатович А.А. Особенности изменения коэффициента теплопроводности стеновых блоков на растительных отходах в зависимости от влажности материала // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 10. С. 19–28. DOI: 10.34031/article\_5db3379ba2f9e5.82013353

#### For citation:

Dalzhonak A.V., Bakatovich A.A. Peculiarities of kinetics of the coefficient of thermal conductivity depending on the humidity rate of wall blocks made of agricultural wastes. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 10. Pp. 19–28. DOI: 10.34031/article\_5db3379ba2f9e5.82013353