

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТИ НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ВОЛОКНИСТОГО ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ИЗ ОЧЁСОВ ЛЬНА

С.А. Романовский, аспирант;

А.А. Бакатович, канд. техн. наук, доцент

Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Республика Беларусь

Аннотация: Исследовано влияние показателя влажности на коэффициент теплопроводности и плотность теплоизоляционных материалов из очёсов и волокон льна. Приведено описание методики определения теплопроводности и плотности в зависимости от влажности утеплителей. Представлены графики изменения плотности, коэффициента теплопроводности от влажности теплоизоляционных плит. Определены коэффициенты изменения теплопроводности материалов из льняных очёсов и волокон при различных показателях влажности плит. Получены эмпирические зависимости, позволяющие прогнозировать влияние показателя влажности материала на кинетику изменения теплопроводности для плит из очёсов и волокон льна.

Ключевые слова: льняные очёсы, волокна льна, теплоизоляционные плиты, влажность, средняя плотность, коэффициент теплопроводности.

THE PECULIARITY OF THE INFLUENCE OF HUMIDITY ON THE THERMAL CONDUCTIVITY OF A FIBROUS HEAT-INSULATING MATERIAL FROM FLAX NOILS

S.A. Romanovsky, graduate student;

A.A. Bakatovich, Candidate of Technical Sciences

Polotsk State University, Navapolatsk, Republic of Belarus

Abstract: The influence of the moisture index on the coefficient of thermal conductivity and density of heat-insulating plates made from flax fibers and noil has been established. A description of the method for determining thermal conductivity and density depending on the moisture content of heaters is given. Graphs of changes in density, coefficient of thermal conductivity from moisture insulation. The coefficients of change in the thermal conductivity of materials from flax fibers and noils are determined for various indicators of plate moisture. Empirical dependences are obtained, which allow predicting the effect of the material moisture index on the kinetics of changes in thermal conductivity for plates based on fibers and flax noil.

Keyword: flax noils, flax fibers, heat-insulating plates, humidity, average density, heat conductivity coefficient.

Основной составляющей процесса передачи теплоты через ограждение является теплопроводность слоев материала по толщине конструкции. Так еще В.Н. Богословский определял коэффициент теплопроводности строительных материалов как собирательный эквивалентный коэффициент, учитывающий структурные параметры и все физические процессы, происходящие в материале [1]. На значение теплопроводности существенное влияние оказывают состав, структура и тепловлажностное состояние материала. Так, при расчете теплоты через наружные ограждения вопрос о влажностном состоянии материалов в конструкции является одним из определяющих.

В научных работах [2, 3] установлено, что с ростом показателя влажности материалов увеличивается теплопроводность, однако степень изменения коэффициента теплопроводности материалов различна для разных диапазонов влажности. В Беларуси и России нормы по теплозащите зданий определяют расчетные значения теплопроводности определяются для двух режимов эксплуатации А и Б, при этом фактический температурно-влажностный режим эксплуатации конструкций не учитывается. В мировой практике, согласно стандарта ISO 6949, введены поправочные коэффициенты, определяемые по ISO 10456, позволяющие производить преобразование теплотехнических характеристик, определенных при одних условиях (λ_1 , R_1) в значения, действительные для других условий (λ_2 , R_2). Поправочные коэффициенты учитывают влияние условий, максимально приближенных к реальной эксплуатации ограждающих конструкций (температуру, влажность и влияние старения строительного материала), что является определенным преимуществом зарубежных норм.

В настоящее время отсутствует нормативный документ по методу определения зависимости коэффициента теплопроводности от влажности строительных материалов. Не представляется так же

возможным установить общую математическую зависимость для всех строительных материалов, так как значительное влияние оказывают такие факторы как химико-минералогический состав, структура, пористость. Поэтому исследования сводятся к выявлению эмпирических зависимостей коэффициента теплопроводности (λ) от влажности (W) – $\lambda(W)$ для отдельных материалов [4].

Согласно методике, приведенной в работе [2], в климатической лаборатории исследовано влияние показателя влажности на коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов, содержащих очёсы льна. Также в качестве альтернативы теплоизоляционным плитам из очёсов исследовали образцы с наполнителем на основе волокон льна.

Для проведения эксперимента изготавливались образцы утеплителей на основе льняных очёсов и волокон с модифицированным жидким стеклом в виде плит размером 250×250×50 мм. При изготовлении исследуемых образцов соблюдали определенную последовательность выполнения технологических операций. Предварительно производили дозировку компонентов. После чего в жидкое стекло вводили сначала известь и перемешивали до однородной консистенции, а затем добавляли гипс. В результате перемешивания модифицированного жидкого стекла с волокнистым наполнителем и формовки получали экспериментальные образцы теплоизоляционного материала. Образцы выдерживали в форме 6 часов при температуре 20±2 °С, а затем высушивали в течение 4 часов в сушильном шкафу при температуре 45–55 °С. Образцы на основе волокон льна и полиэфирных волокон вырезали из теплоизоляционных плит «Экотерм», производимых в Республике Беларусь.

Количественный состав, масса, средняя плотность, теплопроводность исследуемых образцов в сухом состоянии представлена в таблице 1. Теплопроводность и плотность плит определяли согласно ГОСТ 17177 [5] и СТБ 1618 [6] соответственно. Затем каждый образец помещали в индивидуальную герметичную камеру с предварительно залитой водой ниже уровня установки плиты на 40 мм. Температура воздуха в камере соответствовала 20±2 °С, а относительная влажность воздуха составляла 97%. Условия испытания отражают наиболее неблагоприятный влажностный режим для теплоизоляционных плит – период после выпадения осадков в виде дождя.

Таблица 1 – Количественный состав, масса, плотность и теплопроводность образцов в сухом состоянии

№ образца	Расход компонентов на 1 м ³ , кг						Масса, г	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
	волокно льна	очёсы льна	полиэфирное волокно	жидкое стекло	известь	гипс			
1	-	60	-	9	0,5	0,5	219	70	0,035
2	60	-	-	9	0,5	0,5	219	70	0,041
3	29	-	5	-	-	-	106	34	0,04

Теплоизоляционные плиты выдерживали в камере над водой в течение 2, 5, 10 и 20 суток, после чего извлекали и определяли плотность и коэффициент теплопроводности. Полная стабилизация показателя влажности происходила после 20 суток, что и обуславливает максимальный период выдерживания образцов в герметичной камере. Периодичность испытания образцов обусловлена наиболее характерными изменениями в динамике показателей влажности и теплопроводности. Результаты лабораторных испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Показатели массы, плотности, влажности и теплопроводности теплоизоляционных плит во влажном состоянии

№ образца	Время выдерживания образца в камере, сутки (часы)	Показатели влажного образца			
		масса, г	плотность, кг/м ³	влажность, %	коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
Теплоизоляционные плиты из очёсов льна и модифицированного жидкого стекла					
1	2 (48)	239,4	76,6	9,3	0,043
2	5 (120)	269,8	86,3	23,2	0,058
3	10 (240)	290	92,8	32,4	0,067
4	20 (480)	304,6	97,5	39,1	0,075
Теплоизоляционные плиты из льняных волокон и модифицированного жидкого стекла					
5	2 (48)	238,9	76,4	9,1	0,049
6	5 (120)	264,3	84,6	20,7	0,06
7	10 (240)	278,6	89,2	27,2	0,072
8	20 (480)	293	93,8	33,8	0,08
Теплоизоляционные плиты «Экотерм»					
9	2 (48)	114,4	36,6	7,9	0,048
10	5 (120)	124,9	40	17,8	0,063
11	10 (240)	131,9	42,2	24,4	0,074
12	20 (480)	137,8	44,1	30	0,081

Из экспериментальных данных (таблица 2) следует, что за 48 часов показатель влажности образцов 1 на основе льняных очёсов достигает 9,3% и практически идентичен значению образцов 5, при этом на 18% превышает значения влажности утеплителей из волокон льна (образцы 9).

Для образцов 2 на основе очёсов через 5 суток от начала испытаний влажность возрастает на 12% и 30% относительно показателей плит 6 и 10 из льняных волокон.

В последующие 5 суток происходит постепенное увеличение показателя влажности для всех материалов. Значение влажности плит 3 на основе очёсов льна через 10 суток равно 32,4%, что превышает показатели образцов 7 и 11 из льняных волокон на 19% и 33% соответственно.

Относительно значений в сухом состоянии влажность образцов за 20 суток испытаний для утеплителей 4, 8 и 12 возросла до 39,1%, 33,8% и 30% соответственно, при этом прирост между показателями плит 4, 8 и образцами 4, 12 составил 16% и 30%.

Максимальный показатель влажности теплоизоляционных материалов на основе очесов волокна льна достигается за счёт наиболее значительной величины сорбционной влажности льняных очёсов, что обусловлено большей геометрической площадью контакта поверхности с внешней средой отдельных элементарных волокон в очесах по сравнению с показателем волокна льна, состоящего из плотного пучка элементарных волокон.

Полученные экспериментальные данные (табл. 1) свидетельствуют о том, что после 48 часов выдерживания в герметичной камере показатель плотности образцов 1 из очёсов льна увеличился на 9% и достиг $76,6 \text{ кг/м}^3$. Для утеплителей 5 и 9 на основе льняных волокон за тот же промежуток времени плотность изменилась на 9% и 8% соответственно.

Через 3 суток испытаний показатель плотности плит 2 из очёсов волокна льна возрос дополнительно на 13% и составил $86,3 \text{ кг/м}^3$. Для образцов 6 и 10 на основе волокон льна плотность за первые 5 суток соответственно изменилась на 21% и 18%.

Для теплоизоляционных плит 3 из очёсов после 10 суток испытаний средняя плотность возрастает на 33% и равна $92,8 \text{ кг/м}^3$. Плотность образцов 7 и 10 на основе льняных волокон за аналогичный интервал времени увеличилась на 27% и 24% соответственно.

По истечении 20 суток при испытаниях образцов 4, 8 и 12 установлено повышение показателя плотности на 39%, 34% и 30% соответственно для плит из очёсов и волокон льна относительно значений в сухом состоянии.

Из анализа экспериментальных данных (таблица 2) следует, что для теплоизоляционных плит 1 на основе очёсов льна через 48 часов испытаний значение теплопроводности увеличилось на 23%. За такой же промежуток времени, коэффициент теплопроводности образцов 5 и 9 из волокон льна возрос на 20%.

После 5 суток выдерживания плит в герметичной камере значение теплопроводности образцов 2, 6 и 9 на основе очёсов и волокон льна увеличилось на 66, 46 и 58% соответственно.

Изменение коэффициента теплопроводности за вторые 120 часов составляет 16% для образцов 3 из очёсов волокна льна, что на 61% меньше по сравнению с изменением показателя этого же материала за первые 120 часов. Для плит 7 и 10 на основе льняных волокон изменение величины теплопроводности за тот же промежуток времени соответственно равны 20% и 17%.

Теплопроводность образцов 4 из очёсов после 20 суток увеличивается в 2,1 раза до $0,075 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, а для теплоизоляционных плит 8 и 12 на основе волокон льна в 2 раза. Определенные основные физические характеристики можно объяснить наличием более плотной структуры у материала из очёсов волокна льна, препятствующей свободному перемещению воздушных тепловых потоков через утеплитель, что, не смотря на более высокую влажность плит из очесов, позволяет обеспечивать идентичные показатели по теплопроводности с плитами из волокон льна.

Зависимость коэффициента изменения теплопроводности от показателя влажности теплоизоляционных материалов из очёсов и волокон льна представлены на рисунках 1-3.

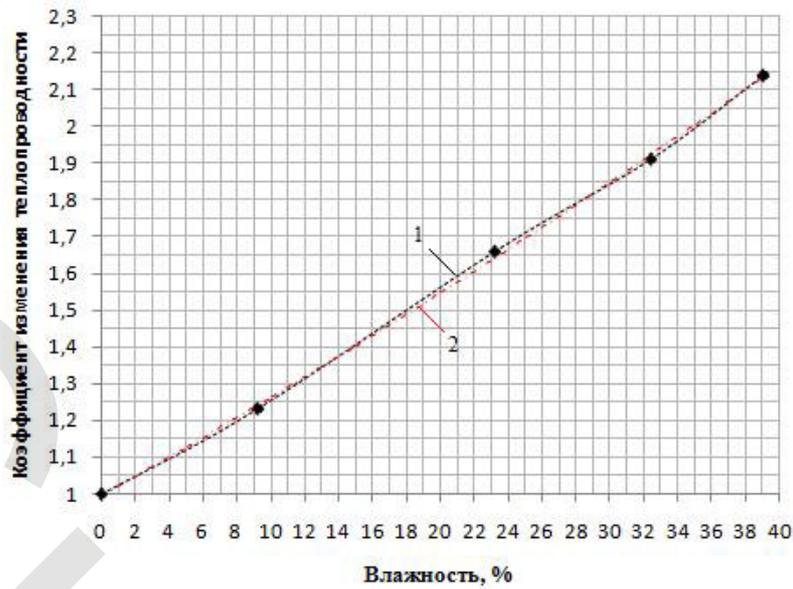


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента изменения теплопроводности от показателя влажности теплоизоляционного материала из очёсов льна
1 – экспериментальные данные; 2 – аппроксимирующая кривая

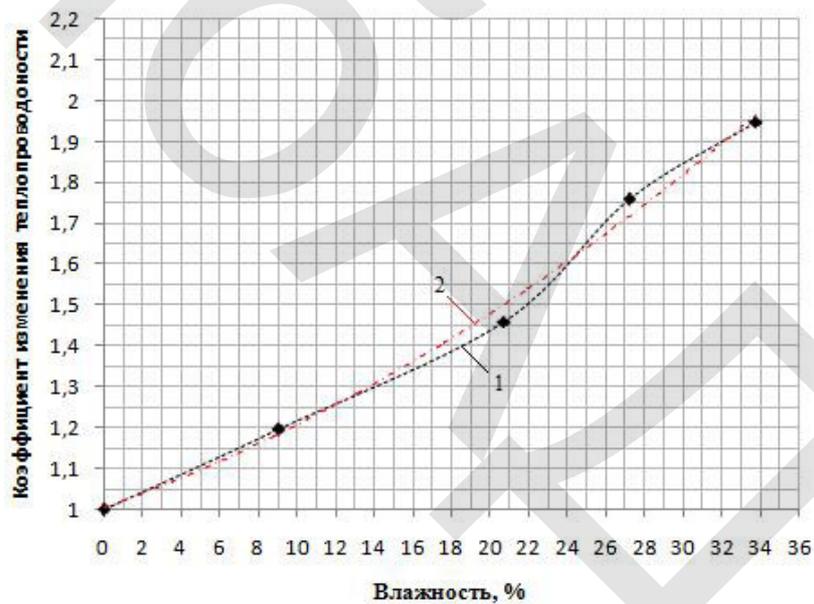


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента изменения теплопроводности от показателя влажности теплоизоляционного материала из волокон льна
1 – экспериментальные данные; 2 – аппроксимирующая кривая

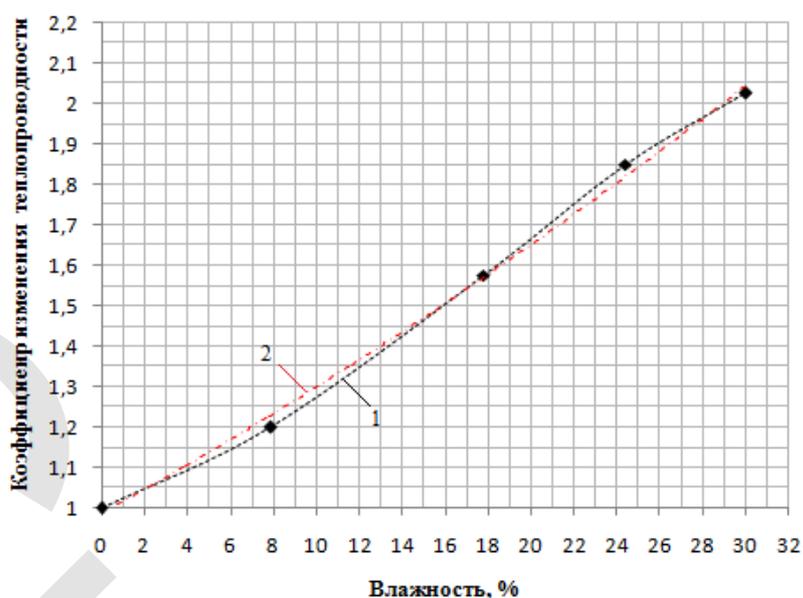


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента изменения теплопроводности от показателя влажности теплоизоляционного материала «Экотерм»

1 – экспериментальные данные; 2 – аппроксимирующая кривая

Анализ экспериментальных данных, включая полученные графические зависимости, позволил установить, что зависимость коэффициента изменения теплопроводности материалов на основе очёсов (1), волокон льна (2) и плит «Экотерм» (3) от изменения влажности достаточно точно аппроксимируется полиномиальными функциями:

$$K=0,000082 \cdot W^2+0,026 \cdot W+0,995 \quad (1)$$

$$K=0,00034 \cdot W^2+0,017 \cdot W+1,002 \quad (2)$$

$$K=0,0002 \cdot W^2+0,029 \cdot W+0,986 \quad (3)$$

где W – влажность утеплителя.

Коэффициент корреляции уравнения для плит из очёсов равен $R^2=0,999$; для образцов из волокон льна $R^2=0,993$ и $R^2=0,997$ для теплоизоляционных материалов «Экотерм».

Основываясь на полученных результатах исследований, зависимость коэффициента теплопроводности от изменения показателя влажности теплоизоляционных материалов из очёсов, волокон льна и плит «Экотерм» можно представить в виде выражений 4, 5 и 6 соответственно.

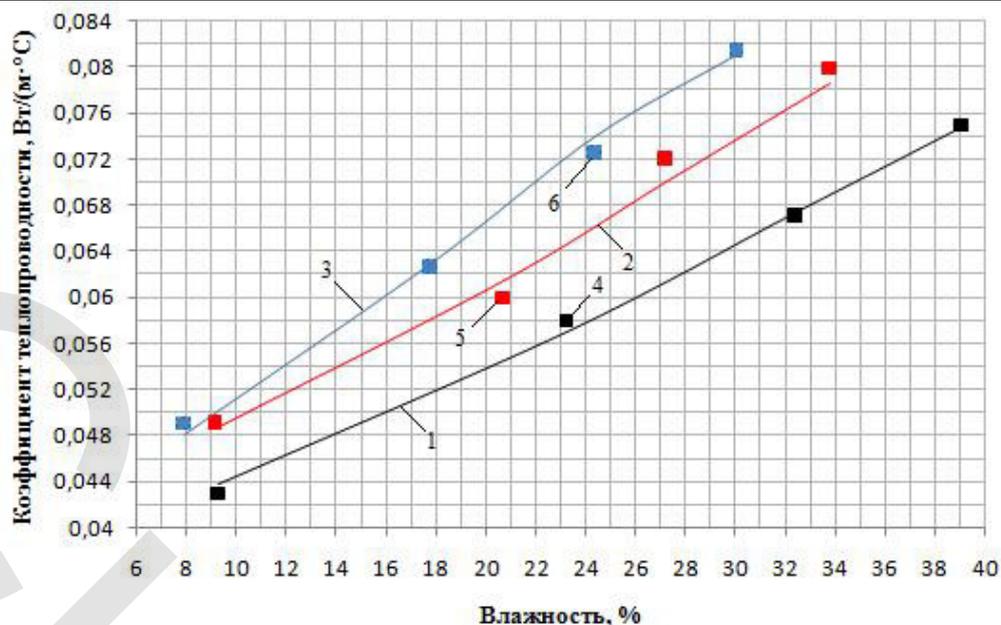
$$\lambda_w=\lambda_0 \cdot (0,000082 \cdot W^2+0,026 \cdot W+0,995) \quad (4)$$

$$\lambda_w=\lambda_0 \cdot (0,00034 \cdot W^2+0,017 \cdot W+1,002) \quad (5)$$

$$\lambda_w=\lambda_0 \cdot (0,0002 \cdot W^2+0,029 \cdot W+0,986) \quad (6)$$

где λ_w – коэффициент теплопроводности утеплителя при данной влажности, Вт/(м·°С); λ_0 – коэффициент теплопроводности сухого утеплителя, Вт/(м·°С); W – влажность утеплителя, %.

Используя выражение 4, 5 и 6 получены зависимости коэффициента теплопроводности материала на основе льняных очёсов (кривая 1), материала из волокон льна (кривая 2) и плит «Экотерм» (кривая 3) от заданных значений влажности (рисунок 4).



1 – эмпирическая зависимость для плит из очёсов льна; 2 – эмпирическая зависимость для плит из волокон льна; 3 – эмпирическая зависимость для плит «Экотерм»; 4 – экспериментальные данные для плит из льняных очёсов; 5 – экспериментальные данные для плит из льняных волокон; 6 – экспериментальные данные для плит «Экотерм»

Рисунок 4 – Зависимость коэффициента теплопроводности от влажности теплоизоляционных материалов

По аналогичной методике проведены исследования на образцах из очёсов или волокон льна, содержащих модифицированное жидкое стекло, а также плит «Экотерм». Количественный состав, средняя плотность, теплопроводность исследуемых образцов в сухом состоянии представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Количественный состав, масса, плотность и теплопроводность образцов в сухом состоянии

№ образца	Расход компонентов на 1 м ³ , кг			Масса, г	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
	волокно льна	очёсы льна	жидкое стекло			
1	-	60	10	219	70	0,035
2	60	-	10	219	70	0,041

Экспериментально полученные показатели коэффициента теплопроводности (табл. 3) подтверждают, что частичная замена жидкого стекла добавками из извести и гипса не влияет на коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов на основе льняных очёсов или волокон в сухом состоянии. По результатам исследований также установлено, что за 20 суток коэффициент теплопроводности для плит из очёсов льна возрос в 2,3 раза и составляет 0,08 Вт/(м·°С) при повышении влажности на 45,4% относительно образцов в сухом состоянии. Для образцов на основе волокон льна за аналогичный промежуток времени с приростом значения влажности на 37,3% теплопроводность увеличивается в 2 раза. При этом влажность материалов, содержащих жидкое стекло на 10–16% превышает показатель с добавками из извести и гипса в вяжущем. В результате теплопроводность плит с использованием жидкого стекла во влажном состоянии на 0,004–0,005 Вт/(м·°С) выше коэффициентов теплопроводности образцов на модифицированном жидком стекле.

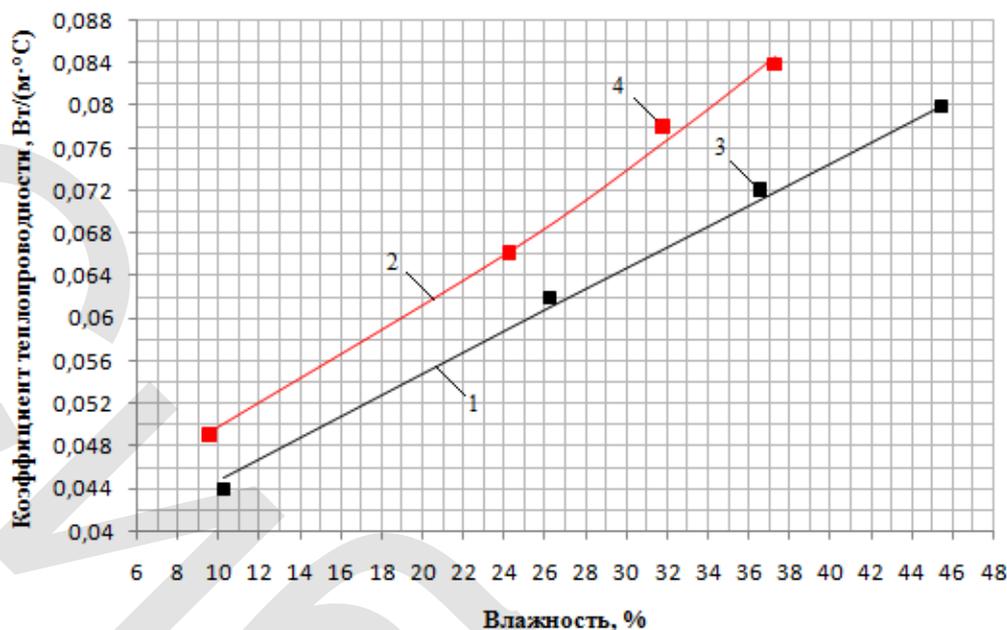
Для теплоизоляционных материалов из очёсов или волокон с модифицированным жидким стеклом получена зависимость коэффициента теплопроводности от влажности аппроксимируемая полиномиальными функциями вида $K=k_1 \cdot W^2+k_2 \cdot W+a$ с коэффициентом корреляции $R^2=0,998$ для плит из льняных очёсов и волокон. Основываясь на полученных результатах исследований, зависимость теплопроводности от изменения влажности теплоизоляционных материалов на основе очёсов и волокон льна можно представить в виде выражений 7 и 8 соответственно.

$$\lambda_w = \lambda_0 \cdot (-0,000026 \cdot W^2 + 0,03 \cdot W + 0,984) \quad (7)$$

$$\lambda_w = \lambda_0 \cdot (0,000235 \cdot W^2 + 0,02 \cdot W + 0,993) \quad (8)$$

где λ_w – коэффициент теплопроводности утеплителя при данной влажности, Вт/(м·°С); λ_0 – коэффициент теплопроводности сухого утеплителя, Вт/(м·°С); W – влажность утеплителя, %.

Используя выражение 7 и 8 получены зависимости теплопроводности материала на основе льняных очёсов (кривая 1) и плит из волокон льна (кривая 2) от заданных значений влажности (рисунок 5).



1 – эмпирическая зависимость для плит из очёсов льна; 2 – эмпирическая зависимость для плит из волокон льна; 3 – экспериментальные данные для плит из льняных очёсов; 4 – экспериментальные данные для плит из льняных волокон

Рисунок 5 – Зависимость коэффициента теплопроводности от влажности теплоизоляционных материалов

При аппроксимации полученных результатов исследований выведена эмпирическая зависимость коэффициента теплопроводности рассматриваемых теплоизоляционных материалов от показателя влажности общего вида:

$$\lambda_w = \lambda_0 \cdot (k_1 \cdot W^2 + k_2 \cdot W + a) \quad (9)$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности сухого материала, Вт/(м·°С); W – влажность материала, %; k_1 , k_2 , a – эмпирические коэффициенты (для материала на основе очёсов льна и модифицированного жидкого стекла $k_1=0,000082$; $k_2=0,026$; $a=0,995$; для материала из волокон льна и модифицированного жидкого стекла $k_1=0,00034$; $k_2=0,017$; $a=1,002$; для плит «Экотерм» $k_1=0,0002$; $k_2=0,029$; $a=0,986$); для материала из очёсов льна и жидкого стекла $k_1=-0,000026$; $k_2=0,03$; $a=0,984$); для материала из волокон льна и жидкого стекла $k_1=0,000235$; $k_2=0,02$; $a=0,993$).

Полученная зависимость 9 обеспечивает прогнозирование значения коэффициента теплопроводности с учётом влажности материала из волокон или очёсов льна. Возможно применять эмпирическую зависимость при теоретических расчетах теплофизических параметров ограждений, а также при прогнозировании теплофизических характеристик ограждающих конструкций с применением утеплителей на основе льняных волокон или очёсов в условиях эксплуатации.

Также установлено, что изменение показателя влажности оказывает существенное влияние на основные физико-механические характеристики теплоизоляционных плит на основе очёсов и волокон льна. Увеличение влажности теплоизоляционных материалов приводит к повышению плотности на 30–45% и коэффициента теплопроводности в 2–2,1 раза. При этом для утеплителей с использованием модифицированного жидкого стекла показатель влажности ниже на 9–14%, что позволяет снизить теплопроводность теплоизоляционных плит на 0,004–0,005 Вт/(м·°С), содержащих в своём составе добавки из извести и гипса.

Библиографический список

1. Богославский, В.Н. Тепловой режим здания / В.Н. Богославский. – М.: Стройиздат, 1979. –248 с.
2. Давыденко, Н.В. Влияние показателя влажности на коэффициент теплопроводности соломенных и костросоломенных теплоизоляционных материалов / Н.В. Давыденко, А.А. Бакатович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 8. – С. 73-78.
3. Долгонок, А.В., Влияние показателя влажности на коэффициент теплопроводности стеновых материалов из отходов растениеводства / А.В. Долгонок, А.А. Бакатович, // Материалы XXI Международного научно-методического семинара «Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров» 25-26 октября 2018 г. / Брестский государственный технический университет. – Брест, 2018. – С. 39-43.
4. Куприянов, В.Н. Влияние влаги на теплопроводность стеновых материалов. Состояние вопроса / В.Н. Куприянов, А.М. Юзмухаметов, И.Ш. Сафин и др. // Строительные конструкции, здания и сооружения. Известия КГАСУ. – 2017. – №1 (39). – С. 102-110.
5. ГОСТ 17177-94. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний.– Введ. 1995-08-22. – Минск: Минстройархитектур. – 1996. – 56 с.
6. СТБ 1618-2006. Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме : – Введ. 2006-03-24.. – Минск: Минстройархитектуры. – 2006. – 9 с.