

УДК 691.12:699.86:536.2.022

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТЕНОВЫХ БЛОКОВ ИЗ ПШЕНИЧНОЙ СОЛОМЫ

А.Н. Ягубкин, А.А. Бакатович

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
г. Новополоцк, Республика Беларусь
e-mail: a.yagubkin@psu.by, a.bakatovich@psu.by

Статья посвящена определению влияния влажности на коэффициент теплопроводности и долговечность стеновых блоков из пшеничной соломы. Для этого приведены изотермы сорбции и определена кинетика сорбции водяных паров образцами различных составов. Построены зависимости коэффициента теплопроводности от влажности разработанного и запатентованного стенового материала. По результатам мониторинга стеновых блоков, находящихся под прямым атмосферным воздействием, сделано заключение о долговечности.

Ключевые слова: растительное сырье, пшеничная солома, стеновой материал, средняя плотность, сорбция, влажность, коэффициент теплопроводности, долговечность.

THE EFFECT OF MOISTURE ON THERMAL CONDUCTIVITY AND DURABILITY OF WHEAT STRAW WALL BLOCKS

A. Yagubkin, A. Bakatovich

Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Novopolotsk, Republic of Belarus
e-mail: a.yagubkin@psu.by, a.bakatovich@psu.by

This article examines the impact of humidity on the thermal conductivity and durability of wheat straw wall blocks. Sorption isotherms are presented, and the kinetics of water vapor sorption by samples of various compositions are determined. Thermal conductivity versus humidity dependences are plotted for the developed and patented wall material. Based on the results of monitoring wall blocks exposed directly to the atmosphere, a conclusion regarding their durability is reached.

Keywords: plant-based raw materials, wheat straw, wall material, average density, sorption, moisture, thermal conductivity coefficient, durability.

Введение. В современной динамически развивающейся экономике Республики Беларусь, подверженной действиям санкций, особую актуальность приобретают производства со 100% локализацией, использующие быстро возобновляемые экологически чистые материалы. Кроме того, после окончания срока службы такого материала или изделия из него он может быть легко и безопасно утилизирован. К таким материалам, несомненно, относится пшеничная солома. А в качестве изделия из неё стеновые блоки на цементном вяжущем.

Однако большинство исследователей материалов на растительном сырье [1–4] говорят о том, что для надежной и долговечной эксплуатации, отсутствия плесени и грибков влажность материала должна составлять не более 15%.

В статье впервые приводятся результаты исследований влияния влажности на теплопроводность и долговечность разработанных и запатентованных стеновых блоков из пшеничной соломы [5; 6].

Объект исследования – стеновые блоки на основе цемента и структурообразующего материала в виде резанных стеблей пшеничной соломы.

Предмет исследования – физико-механические свойства стеновых блоков из пшеничной соломы.

Практическая значимость – результаты исследования могут использоваться для подбора составов при производстве строительных материалов и изделий из растительного сырья, в учебном процессе строительных специальностей ВУЗов.

Материалы и методы исследования. Для выполнения исследований использовали портландцемент марки 42,5Н ГОСТ 30108-2020, ПЦ500Д0 (производства ОАО «Белорусский цементный завод», г. Костюковичи, Республика Беларусь). Применяли следующие химические добавки: гиперпластификатор «Frem S-SB» на основе поликарбоксилата, (производства ЗАО «Завод добавок и смазок «ФРЭЙМ», Республика Беларусь). В качестве растительного структурообразующего материала исследовали пшеничную солому (д. Черноручье-1, Республика Беларусь) в форме пластин различной фракции длиной от 10 до 50 мм, которую получали на измельчителе «Алькор-1» (Китайская Народная Республика). Бетонную смесь затворяли водопроводной водой по СТБ 1114 [7].

Для взвешивания химических добавок использовались весы лабораторные марки ВК-300 (Российская Федерация). Для взвешивания цемента, воды, соломы при изготовлении бетонных образцов использовали весы марки МТ 15 В1ЖА (Российская Федерация).

Размеры бетонных образцов для расчёта средней плотности, коэффициента теплопроводности измеряли штангенциркулем цифровым ШЦЦ-I (Российская Федерация). Массу бетонных образцов для расчёта средней плотности, коэффициента теплопроводности определяли на весах МТ 15 В1ЖА.

Среднюю плотность образцов-кубов определяли по ГОСТ 12730.1 [8]. Коэффициент теплопроводности изучали прибором ИТП-МГ4 «250» (Российская Федерация) в соответствии с СТБ 1618 [9]. Для этого предварительно образцы размером 250×250×40 мм высушивались до постоянной массы в сушильном шкафу SNOL 60/300 (Литва).

Для определения сорбционной влажности предварительно высушенные до постоянной массы образцы помещали в эксикаторы.

Паровоздушная среда в эксикаторах создавалась искусственно с помощью химического раствора серной кислоты различной концентрации, обеспечивающего относительную влажность воздуха 40–97%. Влажность образцов определяли путем взвешивания через каждые 15 дней в течение первых 2-х месяцев испытаний, затем через каждые 10 дней до достижения образцами постоянной массы на электронных весах марки ВК-300. При определении сорбционной влажности образцов температура воздуха в эксикаторах и помещении соответствовала $+20 \pm 0,5^\circ\text{C}$.

В проводимых исследованиях по определению влияния влажности на коэффициент теплопроводности за основу принята методика, предложенная Т. И. Рубашкиной [10, с. 137], и получена зависимость коэффициента теплопроводности от влажности по аналогии с зависимостью (1).

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

где λ – теплопроводность сухого материала, Вт/(м·°C);

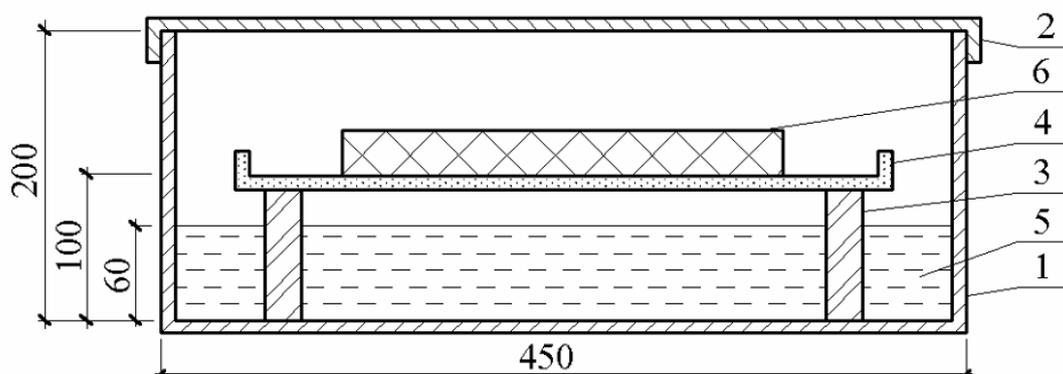
W – весовая влажность материала (влажность), %;

k – коэффициент переменной, определяется для каждого теплоизоляционного материала экспериментальным путем.

Для проведения эксперимента изготавливались образцы в виде плит размером 250×250×30 мм. Составы образцов приведены в таблице 1. Для высушенных образцов определяли значения массы, плотности и коэффициентов теплопроводности. Исследования теплопроводности проводили на приборе ИТП-МГ4 «250» в соответствии с требованиями СТБ 1618. Средняя плотность образцов в сухом состоянии для состава 1 равна 950 кг/м³, для состава 2 1335 кг/м³. Коэффициенты теплопроводности образца составов 1 и 2 равны соответственно 0,08 и 0,225 Вт/(м·°С). Затем каждый образец помещали в индивидуальную герметичную камеру с предварительно залитой водой ниже уровня установки плиты на 40 мм (рисунок 1).

Таблица 1. – Составы образцов

Шифр состава	Расход цемента, кг на 1 м ³	Расход песка, кг на 1 м ³	Расход воды, кг на 1 м ³	Расход соломы, кг на 1 м ³	В/Ц	Вид и расход добавки, % от массы цемента
1	625	-	375	225	0,6	Frem S-SB, 1,5
2	400	800	300	100	0,75	Frem S-SB, 1,5



1 – полиэтиленовая емкость; 2 – герметичная крышка; 3 – металлические стойки из нержавеющей стали; 4 – металлическая сетка из нержавеющей стали; 5 – вода; 6 – испытываемый образец

Рисунок 1. – Схема камеры для увлажнения образцов

Образцы выдерживали в камере над водой в течение 2, 5, 10, 25 и 60 суток после чего извлекали и определяли плотность и коэффициент теплопроводности. Выбранные временные интервалы отражают наиболее характерные показатели изменения влажности и коэффициентов теплопроводности исследуемых образцов.

Ограничения исследования. Погрешности приборов: весы ВК-300 – ±0,015 г, весы МТ 15 В1ЖА – ±2 г, штангенциркуль цифровой ШЦЦ-I – ±0,03 мм, прибор для определения теплопроводности ИТП-МГ4 «250» – ±5%, стабильность температуры в установившемся тепловом режиме для сушильного шкафа SNOL 60/300 – ±1°С. При испытаниях образцов из бетона коэффициент вариации составил 10% (средняя плотность).

Экспериментальная часть. Целью исследований являлось определение влияния влажности на теплопроводность и долговечность стеновых блоков из пшеничной соломы.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- определение сорбционной влажности образцов стеновых блоков из пшеничной соломы;
- определение влияния влажности на теплопроводность образцов блоков из пшеничной соломы;
- заключение о влиянии состава и влажности на долговечность стеновых блоков из пшеничной соломы.

Кинетика сорбции водяных паров при определенном значении относительной влажности воздуха представлена на рисунках 2–3. При относительной влажности воздуха 40% за первые 15 суток показатель сорбционной влажности образца состава 2 достиг 1,6%, что меньше на 19% в сравнении с образцом состава 1. Сорбционная влажность образца состава 1 превышает в 1,1 раза показатель сорбционной влажности образца состава 2 равный 2,0% за 30 суток. Сорбционная влажность образца состава 1 достигла 2,4% за 45 суток, а показатель образца состава 2 составил 2,2%. Установлено, что сорбционная влажность образца состава 1 на 9% больше, чем материала состава 2 за период, равный 60 суткам. Максимальная сорбционная влажность образца состава 2 составляет 2,4% в возрасте 70 суток, а образца состава 2 достигает 2,6% через 70 суток.

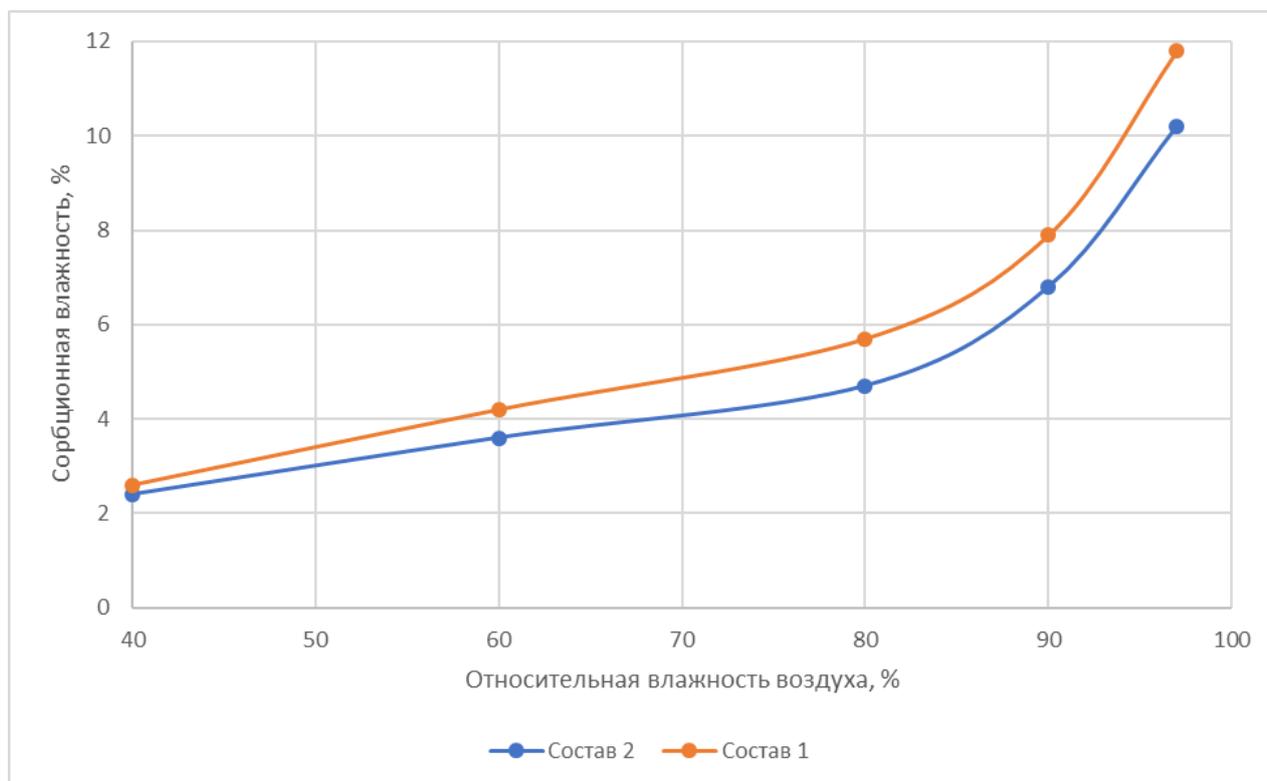


Рисунок 2. – Изотермы сорбции водяного пара

При относительной влажности воздуха 60% за первые 15 суток показатель сорбционной влажности образца состава 2 достиг 2,4%, что меньше на 17% в сравнении с образцом состава 1. Сорбционная влажность образца состава 1 превышает в 1,1 раза показатель сорб-

ционной влажности образца состава 2 равный 3,2% за 30 суток. Сорбционная влажность образца состава 1 достигла 3,9% за 45 суток, а показатель образца состава 2 составил 3,3%. Установлено, что сорбционная влажность образца состава 1 на 15% больше, чем материала состава 2 за период, равный 60 суткам. Максимальная сорбционная влажность образца состава 2 составляет 3,6% в возрасте 70 суток, а образца состава 1 достигает 4,2% через 80 суток.

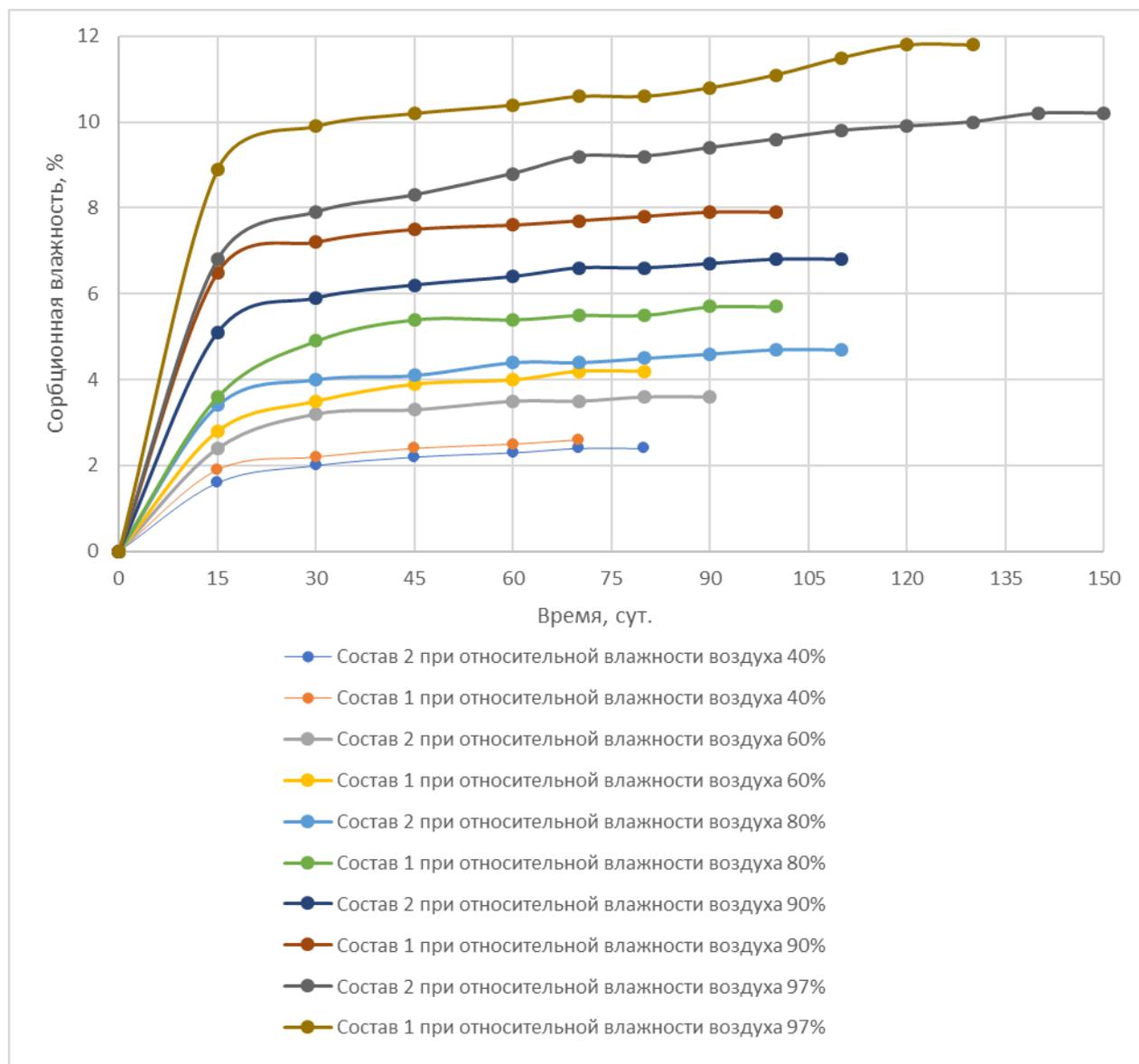


Рисунок 3. – Кинетика сорбции водяных паров образцами

При относительной влажности воздуха 80% за первые 15 суток показатель сорбционной влажности образца состава 2 достиг 3,4%, что меньше на 6% в сравнении с образцом состава 1. Сорбционная влажность образца состава 1 превышает в 1,2 раза показатель сорбционной влажности образца состава 2 равный 4,0% за 30 суток. Сорбционная влажность образца состава 1 достигла 5,4% за 45 суток, а показатель образца состава 2 составил 4,1%. Установлено, что сорбционная влажность образца состава 1 на 23% больше, чем материала состава 2 за период, равный 60 суткам. Максимальная сорбционная влажность образца состава 2 составляет 4,7% в возрасте 100 суток, а образца состава 1 достигает 5,7% через 90 суток.

При относительной влажности воздуха 90% за первые 15 суток показатель сорбционной влажности образца состава 2 достиг 5,1%, что меньше на 27% в сравнении с образцом состава 1. Сорбционная влажность образца состава 1 превышает в 1,22 раза показатель сорбционной влажности образца состава 2 равный 5,9% за 30 суток. Сорбционная влажность образца состава 1 достигла 7,5% за 45 суток, а показатель образца состава 2 составил 6,2%. Установлено, что сорбционная влажность образца состава 1 на 19% больше, чем материала состава 2 за период, равный 60 суткам. Максимальная сорбционная влажность образца состава 2 составляет 6,8% в возрасте 100 суток, а образца состава 1 достигает 7,9% через 90 суток.

При относительной влажности воздуха 97% за первые 15 суток показатель сорбционной влажности образца состава 2 достиг 6,8%, что меньше на 30% в сравнении с образцом состава 1. Сорбционная влажность образца состава 1 превышает в 1,25 раза показатель сорбционной влажности образца состава 2 равный 7,9% за 30 суток. Сорбционная влажность образца состава 1 достигла 10,2% за 45 суток, а показатель образца состава 2 составил 8,3%. Установлено, что сорбционная влажность образца состава 1 на 18% больше, чем материала состава 2 за период, равный 60 суткам. Максимальная сорбционная влажность образца состава 2 составляет 10,2% в возрасте 140 суток, а образца состава 1 достигает 11,8% через 120 суток.

Результаты лабораторных испытаний влияния влажности на коэффициент теплопроводности приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Показатели плотности, влажности и теплопроводности образцов

№ образца	Время Выдерживания образца в камере, сутки (часы)	Показатели влажного образца			Коэффициент изменения теплопроводности образца
		плотность, кг/м ³	влажность, %	коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	
Состав 1					
1	2	968	1,9	0,085	1,06
2	5	983	3,5	0,093	1,16
3	10	1012	6,5	0,101	1,26
4	25	1043	9,8	0,107	1,34
5	60	1049	10,4	0,112	1,40
Состав 2					
1	2	1358	1,7	0,235	1,04
2	5	1378	3,2	0,263	1,17
3	10	1404	5,2	0,273	1,21
4	25	1438	7,7	0,289	1,28
5	60	1452	8,8	0,297	1,32

По результатам обработки данных эксперимента, получены графики зависимостей (рисунки 4, 5) коэффициентов изменения теплопроводности от влажности стеновых материалов.

На основании лабораторных исследований и построенных графиков получены эмпирические зависимости 2–3 для составов 1, 2 соответственно:

$$\lambda_w = \lambda \cdot (1,0088 + 0,0365 \cdot W); \quad (2)$$

$$\lambda_w = \lambda \cdot (1,0095 + 0,0366 \cdot W). \quad (3)$$

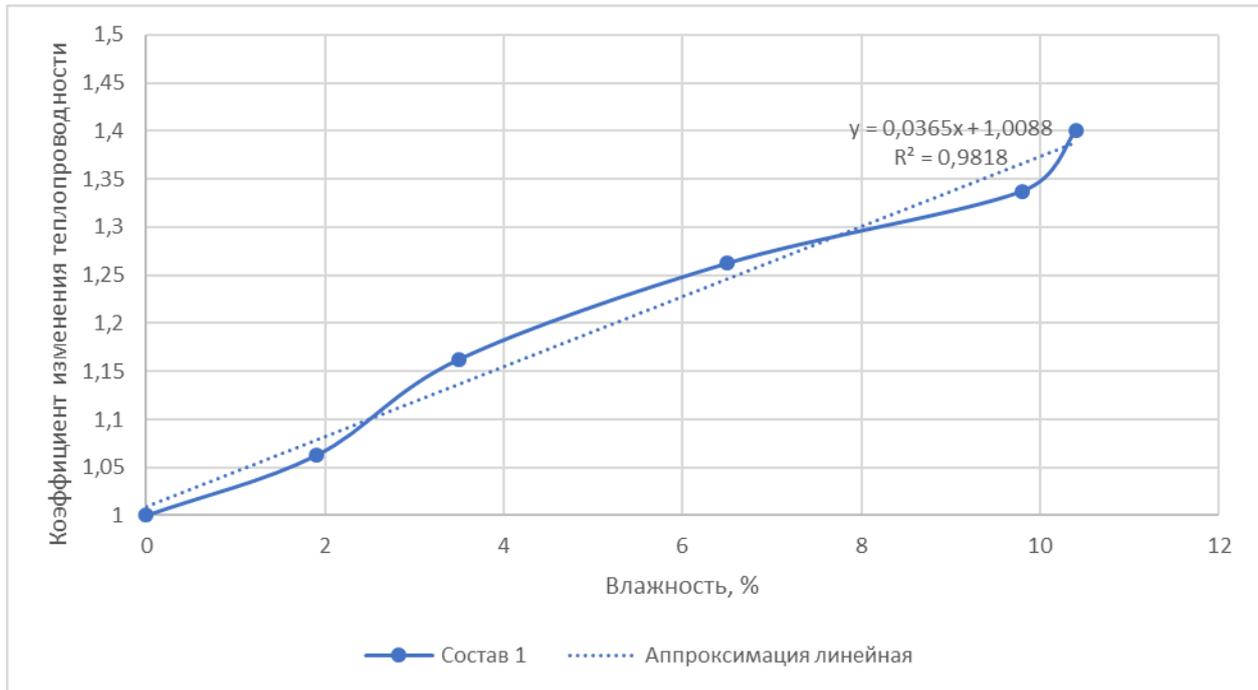


Рисунок 4. – Зависимость коэффициента изменения теплопроводности от влажности стенового материала для состава 1

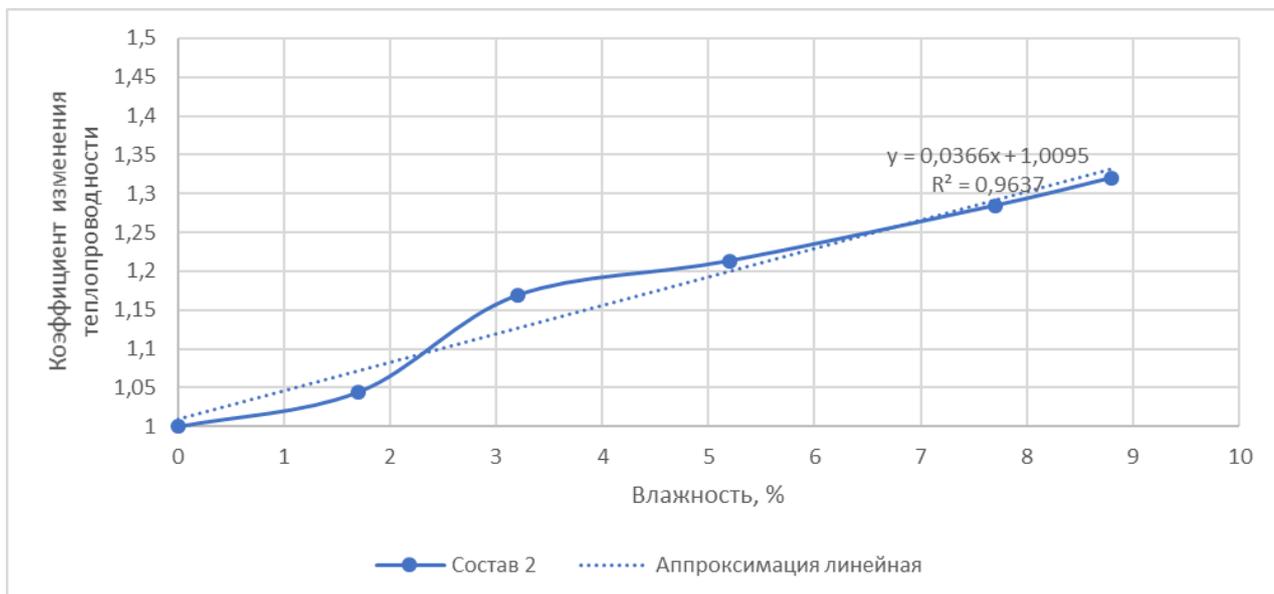


Рисунок 5. – Зависимость коэффициента изменения теплопроводности от влажности стенового материала для состава 2

При анализе построенных зависимостей, полученных по данным таблицы 2 установлено, что зависимость коэффициента теплопроводности стенового материала от изменения влажности аппроксимируется линейной функцией с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,9818$ для образца состава 1 и $R^2 = 0,9637$ для образца состава 2.

На рисунке 6 представлены фотографии блоков (составы 1, 2), находящихся под прямым атмосферным воздействием (деревня Жихари Полоцкий район, Витебская область, Республика Беларусь) в течение 7 лет (с 2018 г.).



Рисунок 6. – Блоки под прямым атмосферным воздействием (составы 1, 2)

На основании выполненного мониторинга сделано заключение о влиянии состава и влажности на долговечность стеновых блоков из пшеничной соломы, которое приведено ниже.

Заключение. Максимальная сорбционная влажность образцов блоков из пшеничной соломы составляет не более 12% по массе и достигается в течение 130–150 суток. Процессы гниения в пшеничной соломе по данным научных исследований начинаются при влагосодержании 15% по массе и выше. Таким образом, разработанные составы блоков из пшеничной соломы позволяют избежать процессов разложения в процессе эксплуатации.

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 предназначены для использования при тепловлажностном расчете проектируемых стеновых ограждений.

Мониторинг, проводимый в течении последних 7 лет, показывает, что блоки, находящиеся на открытой бетонной площадке и подвергающиеся постоянным атмосферным воздействиям, находятся в хорошем работоспособном состоянии. Следы разрушения блоков по массиву материала не наблюдаются, что позволяет сделать заключение о высокой долговечности блоков на разработанных и запатентованных составах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bouasker, M. Physical Characterization of Natural Straw Fibers as Aggregates for Construction Materials Applications / M. Bouasker, N. Belayachi, D. Hoxha, M. Al-Mukhtar // *Materials*. – 2014. – № 7. – P. 3034–3048. <https://doi:10.3390/ma7043034>.
2. Rotz, C.A. Changes in Forage Quality During Harvest and Storage / C.A. Rotz, R.E. Muck // *Forage Quality, Evaluation, and Utilization*. – 1994. – Chapter 20, P. 828-868. <https://DOI:10.2134/1994.foragequality.c20>.
3. Martinson, K. The Effect of Harvest Moisture and Bale Wrapping on Forage Quality, Temperature, and Mold in Orchardgrass Hay / K. Martinson, W. Coblenz, C. Sheaffer // *Journal of Equine Veterinary Science*. – 2011. – № 31. – P. 711–716. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2011.05.003>.

4. Collins, M. Moisture and Storage Effects on Dry Matter and Quality Losses of Alfalfa in Round Bales / M. Collins, W.H. Paulson, M.F. Finner, N.A. Jorgensen, C.R. Keuler // American Society of Agricultural Engineers. – 1987. – № 30. – P. 913–917. [https://doi:0001-2351/87/3004-0913\\$02.00](https://doi:0001-2351/87/3004-0913$02.00).
5. Блоки строительные конструкционно-теплоизоляционные на растительном заполнителе. Технические условия : ТУ ВУ 300220696.063-2023. – Введ. 06.06.2023. – Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, 2023. – 11 с.
6. Строительный конструкционно-теплоизоляционный материал : Евразийский патент №047578. – Оpubл. 08.08.2024. – Москва : Евразийская патентная организация, 2024. – 3 с.
7. Вода для бетонов и растворов. Технические условия : СТБ 1114-98. – Введ. 01.01.99. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь : РУП "Стройтехнорм", 1998. – 20 с.
8. Бетоны. Методы определения плотности : ГОСТ 12730.1-78. – Введ. 01.01.80. – Москва : Издательство стандартов : СССР, 1980. – 5 с.
9. Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме : СТБ 1618-2006. – Введ. 01.07.2006. – Минск : Минстройархитектуры Республики Беларусь : РУП «Стройтехнорм», 2006. – 12 с.
10. Рубашкина, Т.И. Исследование эффективности современных утеплителей в многослойных ограждающих конструкциях зданий / Т.И. Рубашкина // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Чита, 2009. – 152 с.