

УДК 691.12

DOI 10.52928/2070-1683-2025-43-4-60-67

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТИ НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТЕНОВЫХ БЛОКОВ ИЗ ПШЕНИЧНОЙ СОЛОМЫ

А.Н. ЯГУБКИН, канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Статья посвящена определению влияния влажности на коэффициент теплопроводности и долговечность стеновых блоков из пшеничной соломы. Для образцов в эксикаторах получены изотермы сорбции водяного пара. Установлена кинетика сорбции водяных паров образцами различных составов. Построены зависимости коэффициента теплопроводности от влажности разработанного и запатентованного стенового материала. Для зависимостей выполнена аппроксимация линейной функцией с высоким коэффициентом корреляции. По результатам мониторинга стеновых блоков, находящихся под прямым атмосферным воздействием, сделано заключение о долговечности. Результаты исследования могут использоваться для учёта влияния влажности на коэффициент теплопроводности и долговечность при подборе составов для производства строительных блоков из растительного сырья, а также в качестве материала для учебного процесса строительных специальностей высших и средне-специальных учебных заведений.

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

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 должен легко и безопасно утилизироваться. К таким материалам, несомненно, относится пшеничная солома. А в качестве изделия из неё выступают стеновые блоки на цементном вяжущем.

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

В статье выполнена первая попытка представить результаты о влиянии влажности на коэффициент теплопроводности и долговечность стеновых блоков из пшеничной соломы, которые были разработаны и запатентованы в Полоцком государственном университете имени Евфросинии Полоцкой^{1,2,3}.

Объект исследования – теплопроводность и долговечность стеновых блоков на цементном вяжущем и пшеничной соломе.

Предмет исследования – влияние влажности на коэффициент теплопроводности и долговечность стеновых блоков на цементном вяжущем и пшеничной соломе.

Практическая значимость заключается в учёте влияния влажности на коэффициент теплопроводности и долговечность при подборе составов для производства строительных блоков из цементного вяжущего и растительного сырья, а также в возможности применения результатов исследования в качестве материала для учебного процесса строительных специальностей высших и средне-специальных учебных заведений.

Материалы и методы исследований. Пшеничную солому (д. Черноручье-1, Республика Беларусь) как структурно образующий материал добавляли в форме пластин фракции длиной от 10 до 50 мм. Фракционирование выполняли на измельчителе «Алькор-1» (Китайская Народная Республика). В работе использовался портландцемент марки 42,5Н ГОСТ 30108-2020, ПЦ500Д0 (выпущенный на ОАО «Белорусский цементный завод», г. Костюковичи, Республика Беларусь). В качестве химической добавки применяли гиперпластификатор «Frem S-SB» на поликарбоксилатной основе (произведена на ЗАО «Завод добавок и смазок «ФРЭЙМ», Республика Беларусь). Мелким заполнителем выступил песок по ГОСТ 8736-2014. Водопроводной водой, соответствующей требованиям СТБ 1114⁴, затворяли смеси для изготовления образцов и блоков.

¹ ТУ ВУ 300220696.063-2023. Блоки строительные конструкционно-теплоизоляционные на растительном заполнителе. Технические условия. – Введ. 06.06.2023. – Новополоцк: Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, 2023. – 11 с.

² Конструкционно-теплоизоляционный материал: Евразийский патент №048617. – Опубл. 19.12.2024. – М.: Евразийская патентная организация, 2024. – 3 с.

³ Строительный конструкционно-теплоизоляционный материал: Евразийский патент №047578. – Опубл. 08.08.2024. – М.: Евразийская патентная организация, 2024. – 3 с.

⁴ СТБ 1114-98. Вода для бетонов и растворов. Технические условия. – Введ. 01.01.99. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь; РУП «Стройтехнорм», 1998. – 20 с.

Для взвешивания пшеничной соломы, цементного вяжущего, песка, воды затворения, образцов и блоков применяли весы марки МТ 15 В1ЖА (Российская Федерация). Химическую добавку и образцы для определения сорбционной влажности отвешивали на весах лабораторных марки ВК-300 (Российская Федерация).

Для определения размеров образцов при расчётах средней плотности, определении коэффициента теплопроводности использовали штангенциркуль цифровой ШЦЦ-I (Российская Федерация).

Средняя плотность определялась на образцах-кубах с размером ребра 150 мм в соответствии с ГОСТ 12730.1⁵. Коэффициент теплопроводности измеряли с помощью прибора ИТП-МГ4 «250» (Российская Федерация) на основании СТБ 1618⁶. При этом образцы размером 250×250×40 мм предварительно высушивались в сушильном шкафу SNOL 60/300 (Литва) до постоянной массы.

Для определения сорбционной влажности образцы-кубики с размером ребра 20 мм выпиливались из блоков, затем высушивались до постоянной массы и помещались в эксикаторы. В эксикаторах искусственно создавалась паровоздушная среда с целью обеспечения относительной влажности воздуха в пределах 40–97%, для этого применяли химический раствор серной кислоты с разной концентрацией.

В первые 2 месяца испытаний образцы взвешивали каждые 15 дней, а затем каждые 10 дней до достижения постоянной массы и определяли их влажность. Температура воздуха в эксикаторах и лаборатории составляла +20±0,5°C.

Влияние влажности на коэффициент теплопроводности определяли по методике⁷. Согласно этой методике зависимость коэффициента теплопроводности от влажности получается по зависимости (1).

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

где λ – теплопроводность высушенного до постоянной массы образца, Вт/(м·°C);

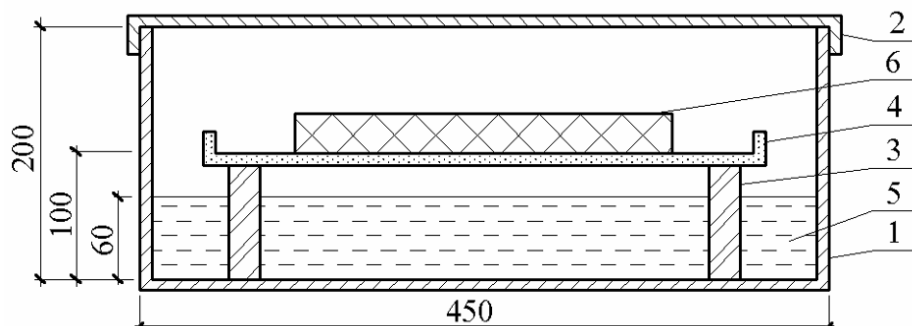
W – весовая влажность образца исследуемого материала (влажность), %;

k – коэффициент, определяемый для каждого теплоизоляционного материала экспериментальным путем.

Составы образцов для испытаний представлены в таблице 1. Средняя плотность образцов в сухом состоянии для состава 1 равна 950 кг/м³, для состава 2 составила 1335 кг/м³. Коэффициент теплопроводности для образца состава 1⁸ равен 0,08 Вт/(м·°C), для образца состава 2⁹ составил 0,225 Вт/(м·°C). После этого образцы погружали в герметичные камеры с водой, залитой ниже уровня плиты на 40 мм (рисунок 1).

Таблица 1. – Составы образцов для проведения испытаний

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 – емкость для заливки воды; 2 – крышка для герметизации; 3 – пластиковые стойки; 4 – пластиковая сетка; 5 – вода; 6 – образец для испытаний

Рисунок 1. – Схема установки для оценки влияния влажности на коэффициент теплопроводности

⁵ ГОСТ 12730.1-78. Бетоны. Методы определения плотности. – Введ. 01.01.80. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 5 с.

⁶ СТБ 1618-2006. Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме. – Введ. 01.07.2006. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь; РУП «Стройтехнорм», 2006. – 12 с.

⁷ Рубашкина, Т.И. Исследование эффективности современных утеплителей в многослойных ограждающих конструкциях зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Рубашкина Татьяна Ивановна. – Чита, 2009. – 152 л. – См. стр. 137.

⁸ См. сноску 2.

⁹ См. сноску 3.

Согласно методике¹⁰ выдержку образцов над водой осуществляли в течение 2, 5, 10, 25 и 60 суток. Для определения средней плотности и коэффициента теплопроводности образцы извлекались из камер через указанные интервалы времени. Эти интервалы показывают характерные изменения влажности и коэффициента теплопроводности в изучаемых образцах.

Ограничения исследования связаны в основном с погрешностями приборов и оборудования, а также с вариацией при определении средней плотности. При этом погрешность весов лабораторных марки ВК-300 составила $\pm 0,015$ г, для весов МТ 15 В1ЖА равнялась ± 2 г, штангенциркуль цифровой ШЦЦ-I имел погрешность $\pm 0,03$ мм, погрешность прибора ИТП-МГ4 «250» соответствовала $\pm 5\%$. Для оборудования стабильность температуры сушильного шкафа SNOL 60/300 по данным производителя не превышала $\pm 1^\circ\text{C}$. При определении средней плотности образцов и блоков коэффициент вариации равнялся 10%.

Основная часть. Цель исследований – определение влияния влажности на теплопроводность и долговечность стеновых блоков на цементном вяжущем и пшеничной соломе.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- определение сорбционной влажности образцов стеновых блоков на цементном вяжущем и пшеничной соломе;
- определение влияния влажности на теплопроводность образцов блоков на цементном вяжущем и пшеничной соломе;
- заключение о влиянии состава и влажности на долговечность стеновых блоков на цементном вяжущем и пшеничной соломе.

На рисунках 2–3 приведены изотермы сорбции и кинетика сорбции водяных паров при различной относительной влажности воздуха.

При относительной влажности воздуха 40% в эксикаторе в течение первых 15 суток значение показателя сорбционной влажности образца состава 2 равнялось 1,6%, что меньше на 19%, чем у образца состава 1. Через 30 суток у образца состава 1 сорбционная влажность превышает в 1,1 раза показатель образца состава 2 (2,0%). По достижению 45 суток для состава 1 сорбционная влажность равнялась 2,4%, а у состава 2 – 2,2%. Установлено, что за период, равный 60 суткам, сорбционная влажность образца состава 1 на 9% больше, чем у образца состава 2. Максимальная сорбционная влажность для образца стенового материала состава 2 достигает 2,4% в возрасте 70 суток, для образца стенового материала состава 1 доходит до 2,6% через 70 суток.

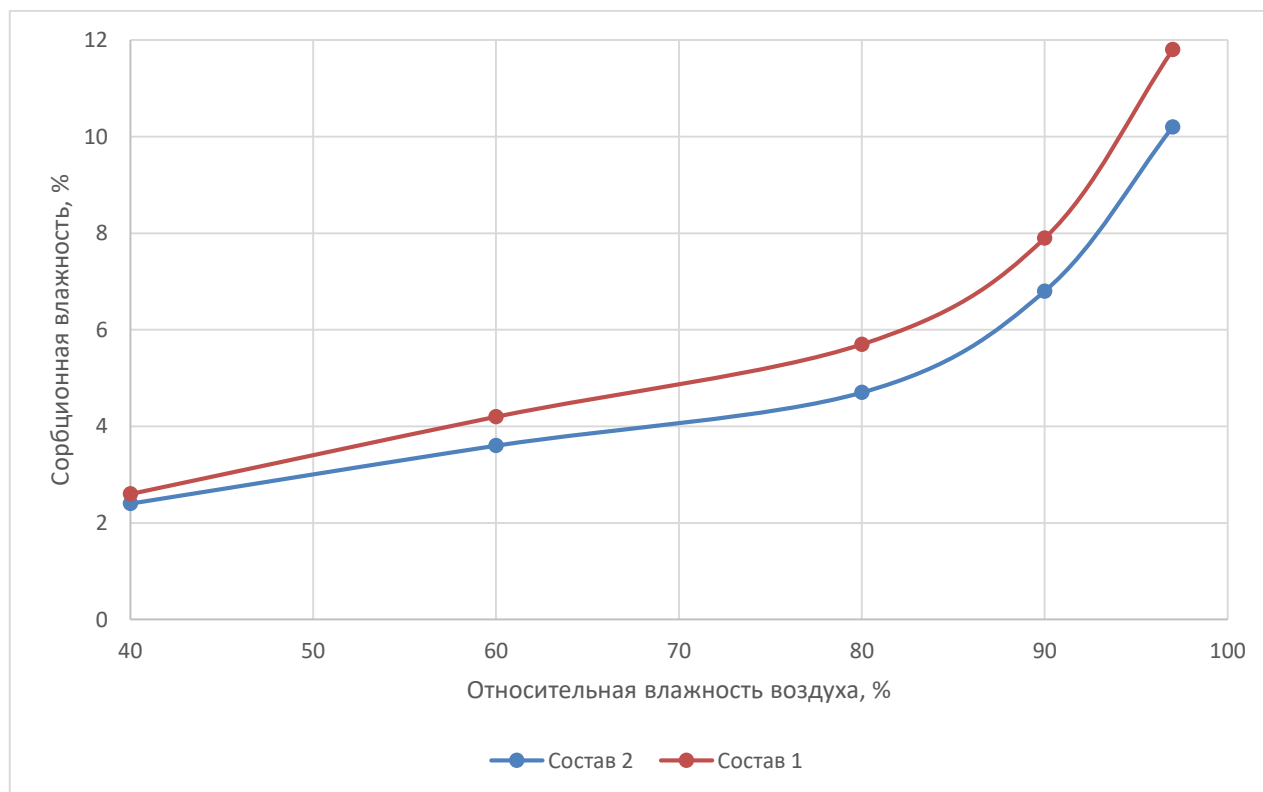


Рисунок 2. – Изотермы сорбции водяного пара

¹⁰ См. сноску 7.

Выдержка образцов при относительной влажности воздуха 60% в эксикаторе показала, что в первые 15 суток сорбционная влажность образца стенового материала состава 2 составила 2,4%, что на 17% меньше, чем у образца состава 1. Через 30 суток у образца состава 1 сорбционная влажность превышает в 1,1 раза показатель образца состава 2 (3,2%). По достижению 45 суток для состава 1 сорбционная влажность равнялась 3,9%, а у состава 2 – 3,3%. Установлено, что за период, равный 60 суткам, сорбционная влажность образца состава 1 на 15% больше, чем у образца состава 2. Максимальная сорбционная влажность для образца стенового материала состава 2 достигает 3,6% в возрасте 70 суток, для образца стенового материала состава 1 доходит до 4,2% через 80 суток.

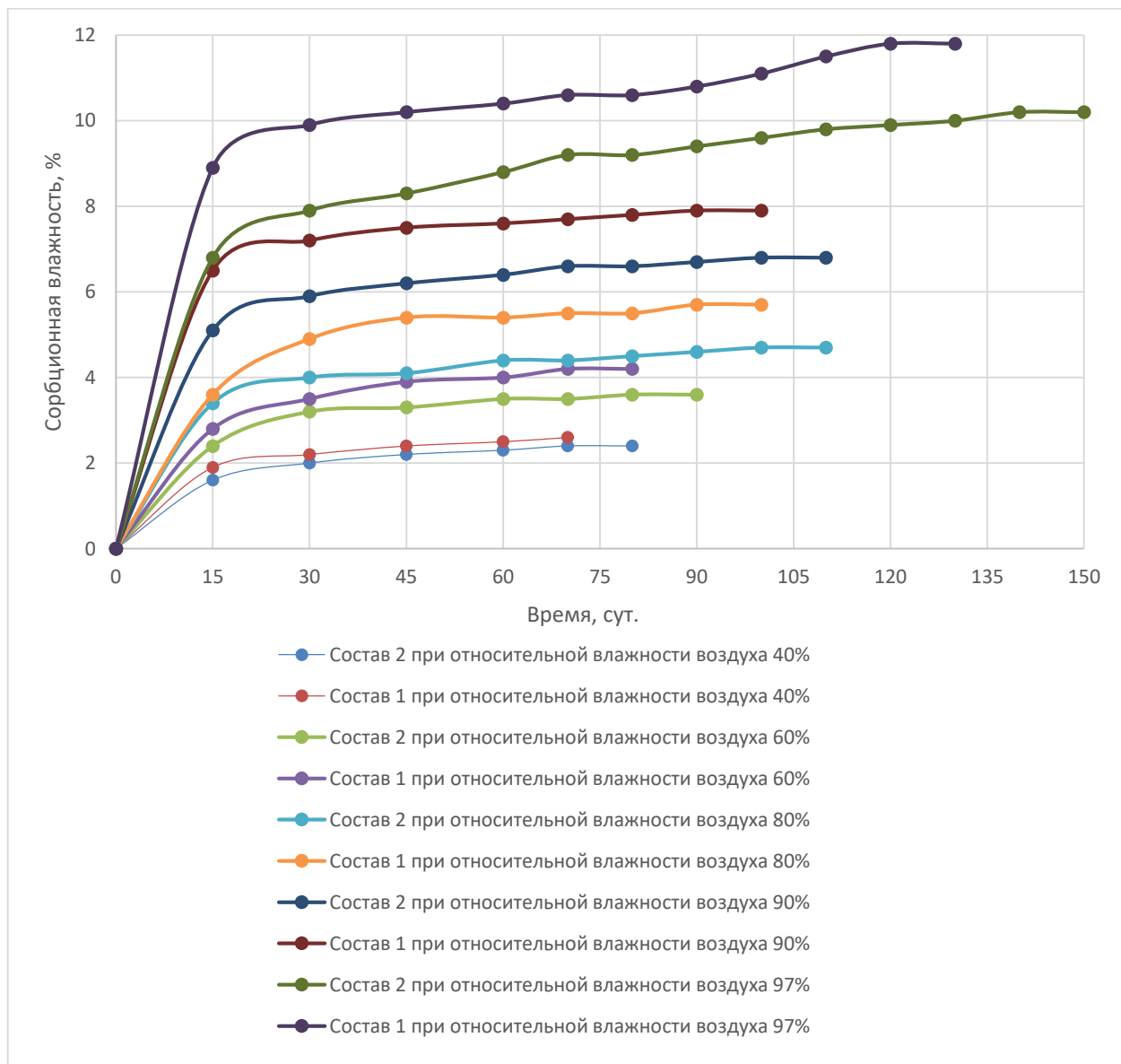


Рисунок 3. – Кинетика сорбции водяных паров образцами

При относительной влажности воздуха 80% в эксикаторе в течение первых 15 суток значение показателя сорбционной влажности образца состава 2 равнялось 3,4%, что меньше на 6%, чем у образца состава 1. Через 30 суток у образца состава 1 сорбционная влажность превышает в 1,2 раза показатель образца состава 2 (4,0%). По достижению 45 суток для состава 1 сорбционная влажность равнялась 5,4%, а у состава 2 – 4,1%. Установлено, что за период, равный 60 суткам, сорбционная влажность образца состава 1 на 23% больше, чем у образца состава 2. Максимальная сорбционная влажность для образца стенового материала состава 2 достигает 4,7% в возрасте 100 суток, для образца стенового материала состава 1 доходит до 5,7% через 70 суток.

Выдержка образцов при относительной влажности воздуха 90% в эксикаторе показала, что в первые 15 суток сорбционная влажность образца стенового материала состава 2 составила 5,1%, что на 27% меньше чем

у образца состава 1. Через 30 суток у образца состава 1 сорбционная влажность превышает в 1,22 раза показатель образца состава 2 (5,9%). По достижению 45 суток для состава 1 сорбционная влажность равнялась 7,5%, а у состава 2 – 6,2%. Установлено, что за период, равный 60 суткам, сорбционная влажность образца состава 1 на 19% больше, чем у образца состава 2. Максимальная сорбционная влажность для образца стенового материала состава 2 достигает 6,8% в возрасте 100 суток, для образца стенового материала состава 1 доходит до 7,9% через 90 суток.

При относительной влажности воздуха 97% в эксикаторе в течение первых 15 суток значение показателя сорбционной влажности образца состава 2 равнялось 6,8%, что меньше на 30%, чем у образца состава 1. Через 30 суток у образца состава 1 сорбционная влажность превышает в 1,25 раза показатель образца состава 2 (7,9%). По достижению 45 суток для состава 1 сорбционная влажность равнялась 10,2%, а у состава 2 – 8,3%. Установлено, что за период, равный 60 суткам, сорбционная влажность образца состава 1 на 18% больше, чем у образца состава 2. Максимальная сорбционная влажность для образца стенового материала состава 2 достигает 10,2% в возрасте 140 суток, для образца стенового материала состава 1 доходит до 11,8% через 120 суток.

Результаты лабораторных испытаний влияния влажности на теплопроводность стеновых блоков на цементном вяжущем и пшеничной соломе приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Показатели влажных образцов различных составов

№ образца	Время выдерживания образца в установке, сутки	Показатели влажного образца			Коэффициент изменения теплопроводности образца
		Средняя плотность, кг/м ³	Влажность, %	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)	
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

На основании данных эксперимента, приведенных в таблице 2, построены графики зависимостей (рисунки 4, 5) коэффициентов изменения теплопроводности от влажности образцов. По графикам с помощью линейной аппроксимации получены эмпирические зависимости 2–3 для составов 1, 2 соответственно:

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

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

Выполненный анализ зависимостей, приведённых на рисунках 4–5, показывает, что коэффициент изменения теплопроводности образца стенового блока на цементном вяжущем и пшеничной соломе от влажности аппроксимируется линейной функцией с коэффициентами корреляции $R^2 = 0,9818$ (состав 1) и $R^2 = 0,9637$ (состав 2).

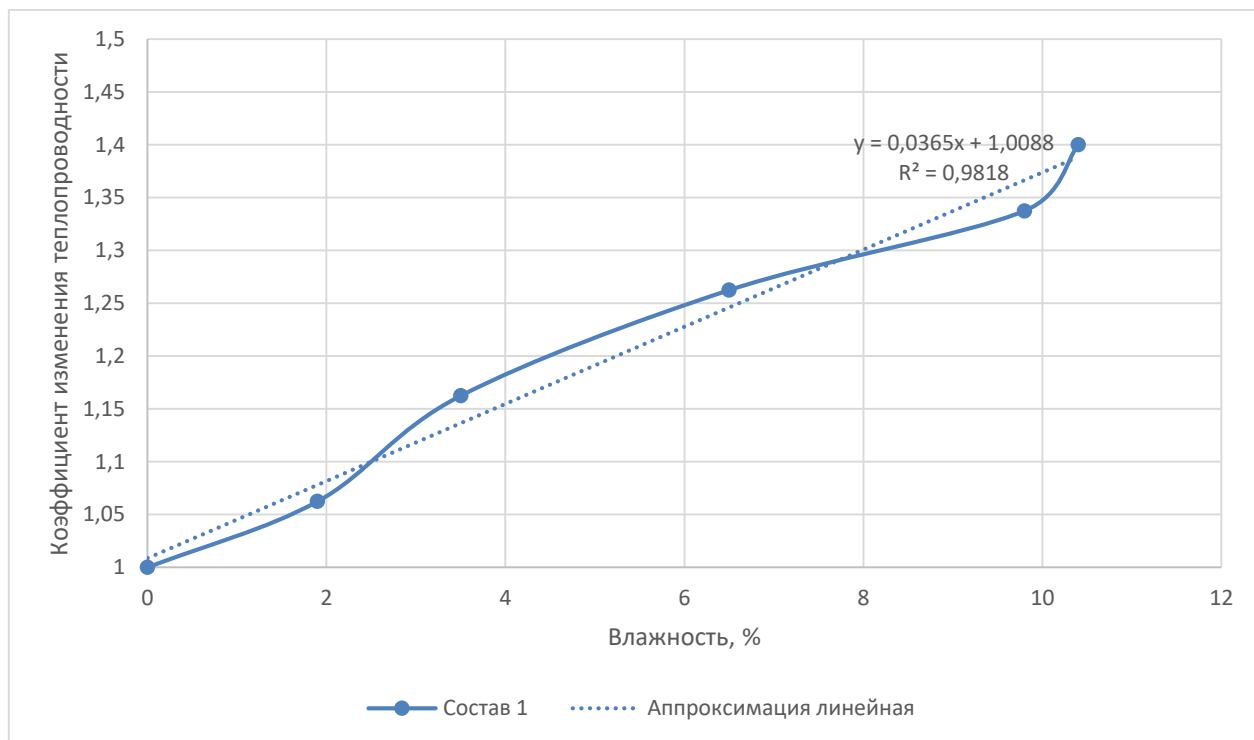


Рисунок 4. – График зависимости коэффициента изменения теплопроводности от влажности образца из стенового блока (состав 1)

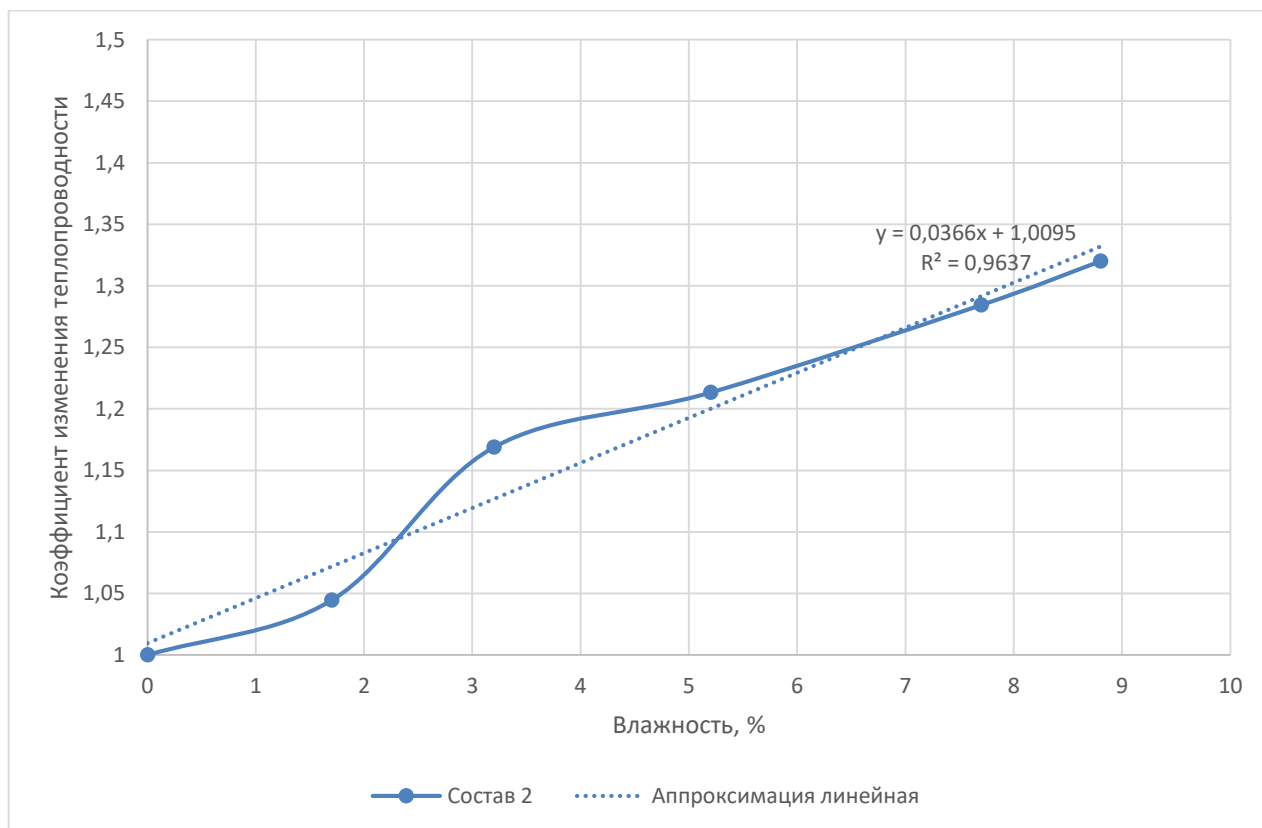


Рисунок 5. – График зависимости коэффициента изменения теплопроводности от влажности образца из стенового блока (состав 2)

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.

Представленные эмпирические зависимости позволяют прогнозировать изменение коэффициента теплопроводности от влажности при эксплуатации зданий. Влажностный режим работы стеновых блоков – необходимое условие для обеспечения долговечности и её оценки. Зависимости могут использоваться для проектирования стеновых ограждений зданий различного назначения.

Мониторинг, проводимый в течении последних 7 лет, показывает, что блоки, расположенные 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. Physical Characterization of Natural Straw Fibers as Aggregates for Construction Materials Applications / M. Bouasker, N. Belayachi, D. Hoxha et al. // *Materials*. – 2014. – № 7. – P. 3034–3048. DOI: 10.3390/ma7043034.
2. Rotz C.A., Muck R.E. Changes in Forage Quality During Harvest and Storage // *Forage Quality, Evaluation, and Utilization*. – 1994. – Chapter 20. – P. 828–868. DOI: 10.2134/1994.foragequality.c20.
3. Martinson K., Coblenz W., Sheaffer C. The Effect of Harvest Moisture and Bale Wrapping on Forage Quality, Temperature, and Mold in Orchardgrass Hay // *Journal of Equine Veterinary Science*. – 2011. – № 31(12). – P. 711–716. DOI: 10.1016/j.jevs.2011.05.003.
4. Moisture and Storage Effects on Dry Matter and Quality Losses of Alfalfa in Round Bales / M. Collins, W. H. Paulson, M. F. Finner et al. // *American Society of Agricultural Engineers*. – 1987. – № 30(4). – P. 913–917. DOI: 10.13031/2013.30498.

REFERENCES

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. DOI: 10.3390/ma7043034.
2. Rotz, C.A., Muck, R.E. Changes in Forage Quality During Harvest and Storage // *Forage Quality, Evaluation, and Utilization*. – 1994. – Chapter 20. – P. 828–868. DOI: 10.2134/1994.foragequality.c20.
3. Martinson, K., Coblenz, W., Sheaffer, C. The Effect of Harvest Moisture and Bale Wrapping on Forage Quality, Temperature, and Mold in Orchardgrass Hay // *Journal of Equine Veterinary Science*. – 2011. – № 31(12). – P. 711–716. DOI: 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(4). – P. 913–917. DOI: 10.13031/2013.30498.

Поступила 30.11.2025

**EVALUATION OF THE INFLUENCE OF HUMIDITY ON THE THERMAL CONDUCTIVITY
AND DURABILITY OF WALL BLOCKS MADE OF WHEAT STRAW**

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

This article examines the influence of humidity on the thermal conductivity and durability of wheat straw wall blocks. Water vapor sorption isotherms were constructed for samples placed in desiccators. The kinetics of water vapor sorption by samples of various compositions were determined. The dependences of thermal conductivity on humidity for the developed and patented wall material were obtained. These dependences were approximated by a linear function with a high correlation coefficient. Based on the results of monitoring wall blocks exposed directly to the atmosphere, a conclusion was reached regarding their durability. The results of the study can be used to take into account the influence of humidity on the thermal conductivity coefficient and durability when selecting compositions for the production of building blocks from plant-based raw materials, as well as a material for the educational process of construction specialties in higher and secondary specialized educational institutions.

Keywords: *plant material, wheat straw, wall material, average density, sorption, desiccator, humidity, thermal conductivity coefficient, monitoring, durability.*