

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ВО ВЛАЖНОМ СОСТОЯНИИ

Оксана Александровна Малыгина¹, Виталий Васильевич Засько²

^{1,2}Луганский университет имени В. Даля,
ЛНР, Луганск, Россия, ¹oksalita@mail.ru, ²vizasko@yandex.ru

Аннотация. В процессе эксплуатации зданий влажностное состояние материалов ограждающих конструкций (т. е. содержание в них влаги во всех фазах) изменяется в зависимости от конструктивных особенностей, свойств материалов, температурно-влажностных условий в помещениях, климатических условий района строительства. Для корректного учета теплопроводности строительных материалов при теплотехнических расчетах необходимо решение двух задач – грамотное определение теплопроводности материала в сухом состоянии в лабораторных условиях и безошибочное назначение расчетной теплопроводности в зависимости от выбранных условий эксплуатации конструкции (с учетом поправки теплопроводности в сухом состоянии на эксплуатационную влажность). В данной статье представлены результаты экспериментального определения коэффициента теплопроводности современных теплоизоляционных материалов, используемых в г. Луганске при новом строительстве и реконструкции общественных и жилых зданий. Получены графики зависимости коэффициентов теплопроводности от сорбционной влажности, построены изотермы сорбции исследуемых утеплителей. Установлено, что влажность утеплителя изменяется со временем в зависимости от изменения температуры внутреннего и внешнего воздуха и от сорбционных свойств теплоизолирующих материала.

Ключевые слова: тепло-влажностный режим, коэффициент теплопроводности, сорбционная влажность, изотермы сорбции, теплозащита зданий, тепловая изоляция

Для цитирования: Малыгина О. А., Засько В. В. Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов во влажном состоянии // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2024. Выпуск 2024-5(169) Инженерные системы и техногенная безопасность. С. 5–14. doi: 10.71536/vd.2024.5c169.1. edn: mtxsin.

Original article

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF THERMAL INSULATION MATERIALS IN A WET STATE

Oksana A. Malygina¹, Vitaly V. Zasko²

^{1,2}Lugansk State University named after Vladimir Dahl,
LPR, Lugansk, Russia, ¹oksalita@mail.ru, ²vizasko@yandex.ru

Abstract. During operation of buildings, the humidity state of enclosing structure materials (i. e. their moisture content in all phases) changes depending on the design features, material properties, temperature and humidity conditions in the premises, and climatic conditions of the construction area. To correctly take into account the thermal conductivity of building materials in heat engineering calculations, it is necessary to solve two problems – competent determination of the thermal conductivity of the material in a dry state under laboratory conditions and an error-free assignment of the calculated thermal conductivity depending on the selected operating conditions of the structure (taking into account the correction of the thermal conductivity in a dry state for the operational



humidity). This article presents the results of an experimental determination of the thermal conductivity coefficient of modern thermal insulation materials used in Lugansk in new construction and reconstruction of public and residential buildings. Graphs of the dependence of thermal conductivity coefficients on sorption humidity were obtained, sorption isotherms of the studied insulation materials were constructed. It was found that the humidity of the insulation changes over time depending on changes in the temperature of the internal and external air and on the sorption properties of the insulation material.

Keywords: heat and humidity regime, coefficient of thermal conductivity, sorption humidity, isotherms

For citation: Malygina O. A., Zasko V. V. Experimental determination of the thermal conductivity coefficient of thermal insulation materials in a wet state. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Engineering systems and technological safety*. 2024;5(169):5–14. (In Russ.). doi: 10.71536/vd.2024.5c169.1. edn: mt-xsin.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Исследование коэффициента теплопроводности строительных материалов не учитывает состояние влаги в их пористой структуре, такое как сорбционная, пленочная, капиллярная, и т. д. Исследование связи между коэффициентом теплопроводности и видами связи влаги с материалом является актуальной задачей, которая позволит определить теплотехнические характеристики ограждающих конструкций в зависимости от состояния эксплуатационной влаги в широком диапазоне изменений ограждающих конструкций.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В действующем СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий» [1] при оценке теплотехнических характеристик многослойных конструкций стен зданий учитывается влажность только для двух условий эксплуатации – А или Б. Тем не менее, в реальных условиях эксплуатации ограждающих конструкций влажностный режим может существенно отличаться от ожидаемых показателей, заложенных в проекте. Это обусловлено многими факторами, среди которых особенно важное значение имеют климатические условия конкретного региона, где осуществляется строительство.

Существующие нормы проектирования значительно игнорируют влияние колебаний температуры и влажности, которые возникают внутри строительных конструкций, что обусловлено климатическими условиями и различными факторами эксплуатации, такими как нестабильность вентиляционных систем, аварии отопления и водоснабжения, а также нестационарные процессы теплопередачи. Повышенная влажность строительных материалов приводит к увеличению их теплопроводности, поскольку поры заполняются жидкой влагой, обладающей более высоким коэффициентом теплопроводности. Зимой замерзание влаги в порах ещё больше повышает этот коэффициент.

Таким образом, накопление влаги представляется серьезной угрозой для целостности конструкции, снижая её теплотехнические характеристики и способствуя появлению грибка и плесени на поверхности ограждающих конструкций. Отклонения от расчетных параметров влажности негативно сказываются на коэффициентах теплопроводности слоев ограждающих конструкций, что напрямую влияет на уровень сопротивления теплопередаче.

Из этого следует, что проектирование ограждающих конструкций только с помощью существующих норм не гарантирует надежности в эксплуатации. Без моделирования нестационарных тепло-влажностных процессов, учитывающих климатические особенности региона, тепловые потери резко возрастают и срок службы конструкций сокращается.

В последнее время в Российской Федерации появились десятки новых современных теплоизоляционных материалов, которые произвели значительный прорыв в сфере энергосбережения. Такие материалы стали более эффективными, экологически безопасными для людей, обладающие различными свойствами и фактурой. Их можно использовать при строительстве новых или реконструкции старых объектов строительства. Теплоизоляционный слой в конструкции стены нужен для обеспечения заданных теплозащитных свойств конструкции в течение заданного периода эксплуатации.

В городе Луганске в последнее время широкое применение находят такие теплоизоляционные материалы, производимые на предприятиях Российской Федерации [2]:

- утеплитель IZOVOL из минеральной ваты на основе базальтовых пород;
- утеплитель ТЕХНОФЛОР ПРОФ фирмы ТЕХНОНИКОЛЬ из каменной ваты (базальтовой плиты);
- пенополистирол экструдированный ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ.

Они обладают такими основными характеристиками: теплопроводностью, водопоглощением, горючестью и плотностью.

Теплопроводность характеризуется коэффициентом теплопроводности λ (лямбда) Вт/(м²·С). Этот коэффициент является главной характеристикой теплоизоляционных материалов [1].

Значение коэффициента теплопроводности λ приведено в существующих нормах [1] в сухом состоянии и при стационарном расчёте, что не позволяет реально оценить протекающие процессы в ограждающих конструкциях. При эксплуатации зданий в существующих конструкциях при воздействии влаги меняются физико-технические свойства материалов конструкций. Из-этого можно сделать вывод, что актуальной задачей является рассмотрение нестационарных процессов тепло-влажноперевода в ограждающих конструкциях.

ЦЕЛИ

Целью настоящей статьи является анализ полученных экспериментальных данных коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов IZOVOL, ТЕХНОФЛОР ПРОФ, ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ от сорбционной влажности.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Для определения коэффициента теплопроводности материала во влажном состоянии в источниках литературы используют соотношения [3]:

$$\lambda_w = \lambda_{сух} (1 + \eta \cdot w_s), \quad (1)$$

где $\lambda_{сух}$ – теплопроводность материала в сухом состоянии;
 w_s – влажность материала при эксплуатации, % по массе;
 η – коэффициент теплотехнического качества (для пенополистирола 0,03; для минеральной ваты 0,04).

Для используемых теплоизоляционных материалов при строительстве и реконструкции существующих зданий в г. Луганске на рис. 1 показаны зависимости коэффициента теплопроводности утеплителей от влажности по массе материалов.

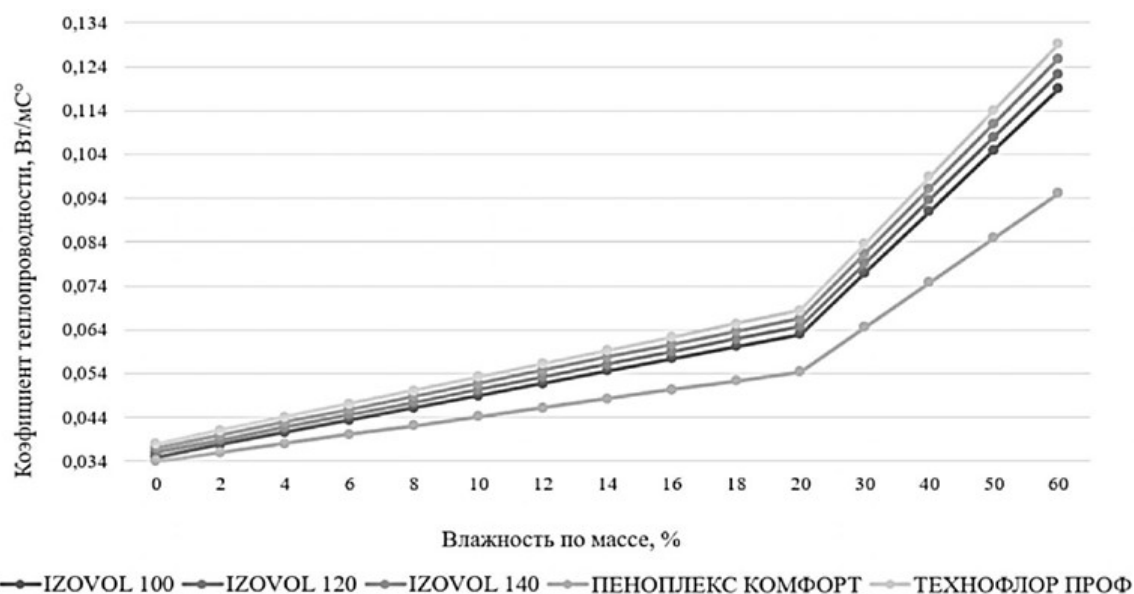


Рисунок 1 – Зависимости коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов от влажности по массе.

Для определения коэффициента теплопроводности таких материалов во времени был проведён эксперимент по [4]. В нём использовались образцы трёх наиболее широко применяемых в строительстве теплоизоляционных материалов г. Луганска (IZOVOL плотностью 100, ТЕХНОФЛОР ПРОФ, ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ). Для обеспечения надёжной защиты здания от тепловых потерь и избытка влаги применяются различные виды утеплителей [5, 6]. Выбор оптимального материала представляет собой непростую задачу, так как каждый утеплитель обладает уникальными характеристиками и предназначен для специфических условий эксплуатации. Из исследуемых материалов были отобраны образцы размером 100×100×5 в соответствии с ГОСТ 24816-81. После предварительного взвешивания, эти образцы были высушены при 100±5 °С в сушильном шкафу и помещены в специальную камеру (рис. 2), в которой находились на подставке над слоем воды в течении 6 часов.

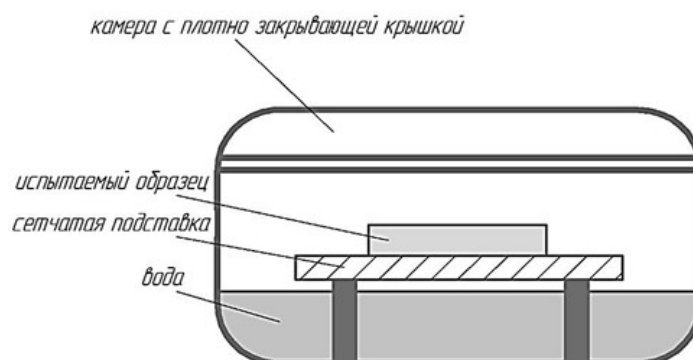


Рисунок 2 – Камера для сорбционного увлажнения образцов.

После этого образцы взвешивались и подвергались измерению теплопроводности с помощью прибора ИТС-1 (рис. 3).



Рисунок 3 – Прибор для измерения теплопроводности материалов ИТС-1.

Аналогично испытания повторялись с выдерживанием образцов через равный промежуток времени при $t = 12; 18; 24; 30$ часов и т. д. до достижения значения максимальной сорбционной влажности образцов.

Результаты испытаний для образца из IZOVOL $\rho = 100 \text{ кг/м}^3$ приведены в таблице 1.

По результатам таблицы 1 построенный график (рис. 4), на котором выявлено, что зависимость коэффициента ζ от изменения его сорбционной влажности w аппроксимируется линейной функцией $\zeta = 1 + 0,043 \cdot w$ (с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,96$).

На основании проведенных испытаний зависимость коэффициента теплопроводности IZOVOL от изменения его сорбционной влажности можно выразить соотношением

$$\lambda_w = \lambda_{\text{сух}} (1 + 0,043 \cdot w_s), \quad (2)$$

где λ_w – теплопроводность материала при влажности w_s ;
 $\lambda_{\text{сух}}$ – теплопроводность материала в сухом состоянии.

Таблица 1 – Результаты исследуемого образца утеплителя IZOVOL

№ испытуемого образца	Время выдерживания t , час	Сорбционная влажность w , %	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м ² С	Коэффициент изменения теплопроводности ζ
1	0	0	0,0350	1
2	6	0,748	0,0360	1,032
3	12	1,451	0,0370	1,062
4	18	2,891	0,0393	1,124
5	24	5,610	0,0434	1,241
6	30	7,831	0,0468	1,337
7	36	10,012	0,0500	1,430
8	42	12,511	0,0538	1,538

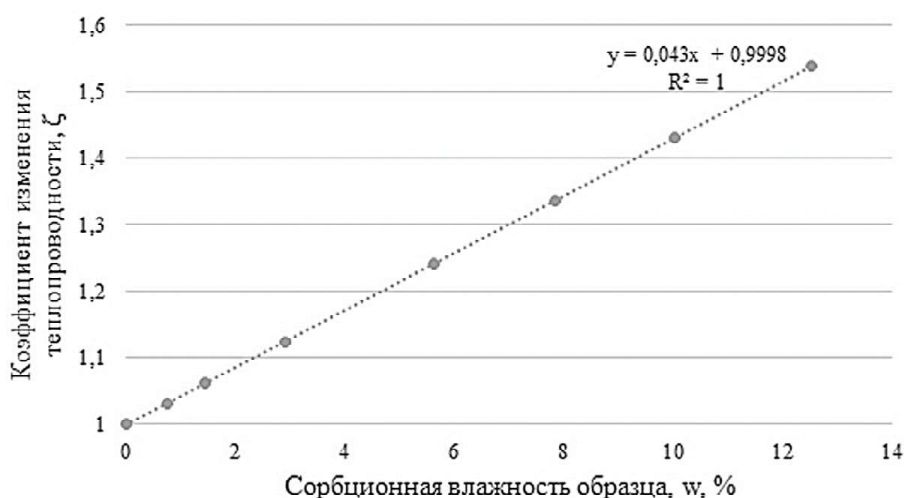


Рисунок 4 – Зависимость изменения коэффициента теплопроводности IZOVOL от сорбционной влажности.

Результаты испытаний для образца из ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ $\rho = 30 \text{ кг/м}^3$ приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты исследуемого образца утеплителя ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ

№ испытуемого образца	Время выдерживания t , час	Сорбционная влажность w , %	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м ² С	Коэффициент изменения теплопроводности ζ
1	0	0	0,0340	1
2	6	0,681	0,0347	1,02
3	12	1,264	0,0353	1,04
4	18	2,518	0,0368	1,081
5	24	5,103	0,0396	1,163
6	30	6,411	0,041	1,205
7	36	8,621	0,0434	1,276
8	42	10,901	0,0459	1,349

По результатам таблицы 2 построенный график (рис. 5), на котором выявлено, что зависимость коэффициента ζ от изменения его сорбционной влажности w аппроксимируется линейной функцией $\zeta = 1 + 0,032 \cdot w$ (с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,96$).

Результаты испытаний для образца из ТЕХНОФЛОР ПРОФ $\rho = 155 \text{ кг/м}^3$ приведены в таблице 3.

По результатам таблицы 3 построенный график (рис. 6), на котором выявлено, что зависимость коэффициента ζ от изменения его сорбционной влажности w аппроксимируется линейной функцией $\zeta = 1 + 0,041 \cdot w$ (с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,96$).

На рис. 7 показаны построенные графики зависимости сорбционной влажности от коэффициентов теплопроводности испытуемых теплоизоляционных материалов.

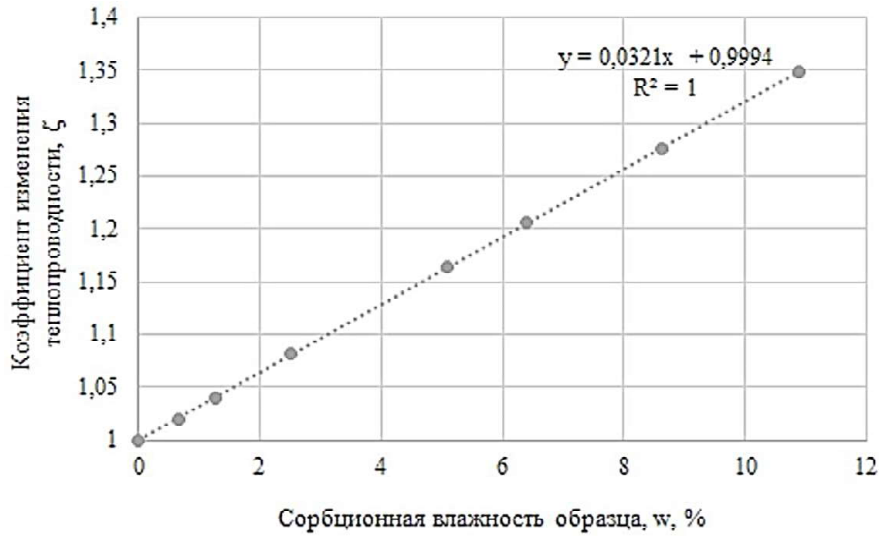


Рисунок 5 – Зависимость изменения коэффициента теплопроводности ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ от сорбционной влажности.

Таблица 3 – Результаты исследуемого образца утеплителя ТЕХНОФЛОР ПРОФ

№ испытуемого образца	Время выдерживания t , час	Сорбционная влажность w , %	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м ² С	Коэффициент изменения теплопроводности ζ
1	0	0	0,0380	1
2	6	0,768	0,0392	1,031
3	12	1,521	0,0400	1,062
4	18	3,112	0,0423	1,128
5	24	6,235	0,0477	1,256
6	30	8,512	0,0513	1,349
7	36	10,782	0,0548	1,442
8	42	12,981	0,0610	1,532

В результате, зависимости коэффициента теплопроводности утеплителя ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ от изменения его сорбционной влажности можно выразить соотношением $\lambda_w = \lambda_{сух} (1 + 0,032 \cdot w_s)$, а для ТЕХНОФЛОР ПРОФ – $\lambda_w = \lambda_{сух} (1 + 0,041 \cdot w_s)$.

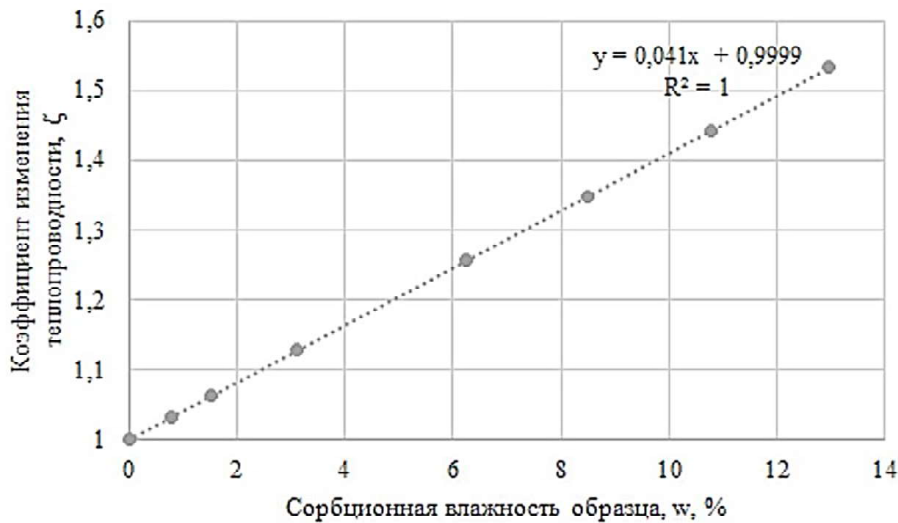


Рисунок 6 – Зависимость изменения коэффициента теплопроводности ТЕХНОФЛОР ПРОФ от сорбционной влажности.

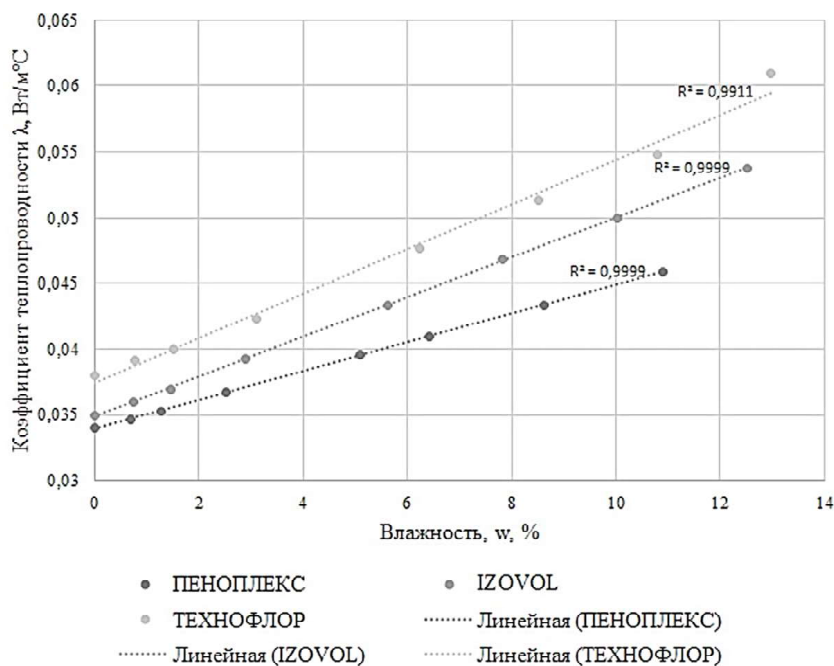


Рисунок 7 – Графики зависимости коэффициентов теплопроводности от сорбционной влажности.

Запишем в окончательном варианте эмпирическую зависимость коэффициента теплопроводности во влажном состоянии

$$\lambda_w = \lambda_{сух} (1 + k \cdot w_s), \quad (3)$$

где k – коэффициент переменной, которые определены из эксперимента для конкретного теплоизоляционного материала (для IZOVOL плотностью 100 $k = 0,043$, для ТЕХНОФЛОР ПРОФ $k = 0,041$, для ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ $k = 0,032$).

Влажность утеплителя подвержена изменению во времени в зависимости от колебаний температуры окружающего воздуха и от сорбционных характеристик самого материала. Эти свойства присущи всем строительным материалам. Каждый вид теплоизоляционного материала демонстрирует специфическую зависимость между влажностью и относительной влажностью воздуха при постоянной температуре, что и называется изотермой сорбции. Данная зависимость устанавливается путем экспериментальных исследований в соответствии с ГОСТ 24816-81 [4].

На рисунке 8 представлены графики изотерм сорбции для наиболее распространенных утеплителей, используемых в городе Луганске Российской Федерации. Эти данные были получены в ходе лабораторных испытаний, упомянутых в [4]. Анализ этих изотерм позволяет лучше понять, как различные материалы взаимодействуют с атмосферной влагой и каким образом это может влиять на их эксплуатационные характеристики. Объективное изучение таких зависимостей является важным этапом в выборе утеплителя для конкретных условий эксплуатации, что в свою очередь способствует повышению энергоэффективности зданий и улучшению их долговечности.

На рисунке 8 демонстрируется, что сорбционные характеристики теплоизоляционных материалов имеют схожую природу, зависящую от изменения их влажности. Анализ графических данных изотерм сорбции, представленных на рисунке 8, с использованием методов подбора линий тренда, выявил, что все изотермы можно аппроксимировать аналогичными полиномами третьей степени. Уравнение, описывающее это явление, выглядит следующим образом:

$$W_s = A_1 \varphi + A_2 \varphi^2 + A_3 \varphi^3, \quad (4)$$

где W_s – сорбционная влажность материала, %;
 A_1, A_2, A_3 – коэффициенты переменной, зависящие от конкретного материала;
 φ – относительная влажность воздуха.

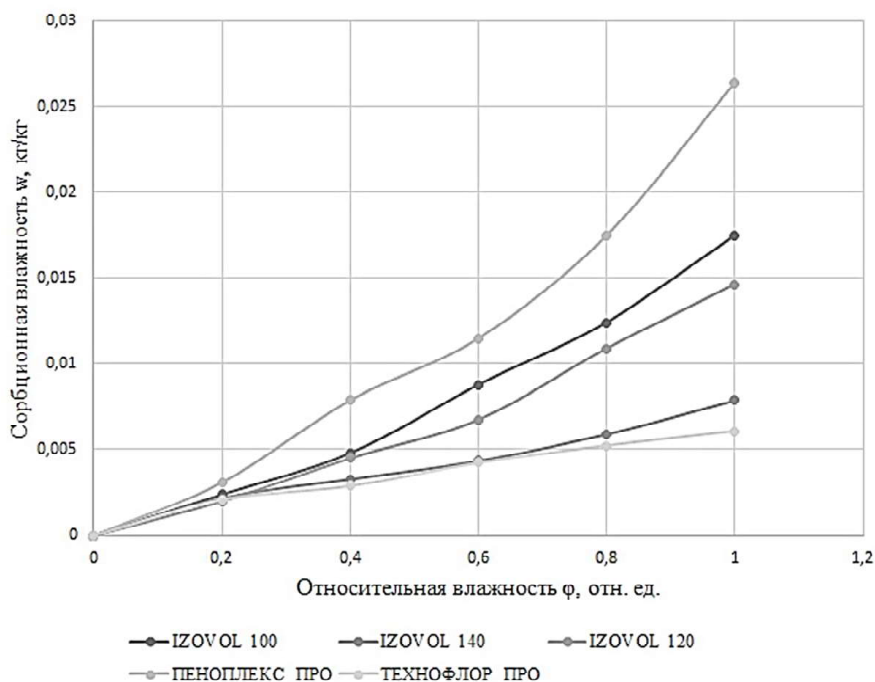


Рисунок 8 – Изотермы сорбции утеплителей ограждающих конструкций, применяемых в г. Луганске.

Численные значения этих коэффициентов A_1, A_2, A_3 для исследуемых утеплителей, чьи изотермы сорбции отображены на рисунке 8, были определены экспериментально и представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения коэффициентов A_1, A_2, A_3

Материал	Плотность, кг/м ³	Коэффициенты переменной		
		A_1	A_2	A_3
IZOVOL	100	0,0072	-0,0103	0,0206
	120	0,0070	-0,0100	0,0203
	140	0,0067	-0,0098	0,0197
ТЕХНОФЛОР ПРОФ	155	0,0065	-0,0097	0,0195
ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ	30	0,0245	-0,0320	0,0260

Сорбционная влажность слоев ограждающей конструкции прямо пропорциональна относительной влажности, которая в свою очередь определяется парциальным давлением водяного пара в порах материала. Динамика парциального давления водяного пара в насыщенном воздухе зависит от температурных условий: чем выше температура, тем больше парциальное давление. Это взаимодействие можно определить, воспользовавшись графиками [7] или экспериментальными таблицами [8]. В [8] приведены значения парциального давления насыщенного водяного пара при изменении температуры в диапазоне от -41 до +30 °С. Нелинейная зависимость этой величины описывается полиномом третьей степени:

$$P_{н.п.} = 0,0215T_{in}^3 + 1,70T_{in}^2 + 48,08T_{in} + 613. \quad (5)$$

Влажностное состояние воздуха определяется относительной влажностью ϕ , которая согласно закону Бойля–Мариотта выражается через отношение парциального давления воздуха к давлению насыщенных паров. Для насыщенного состояния воздуха параметр равен 1 или 100 %, тогда как для ненасыщенного он меньше единицы.

Для расчета сопротивления теплопередачи ограждающей конструкции с учетом существующей влажности необходимо разработать математические модели, способные рассчитать значения парциального давления и относительной влажности в различных сечениях слоев конструкции.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований, были получены значения коэффициентов теплопроводности IZOVOL, ТЕХНОФЛОР ПРОФ и ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ от сорбционной влажности. Эти значения необходимы для компьютерного имитационного моделирования четырехслойной ограждающей конструкции с несущим слоем из керамического кирпича с внешним штукатурным слоем и с вентилируемым слоем с целью изучения совместного влияния тепла и влаги, протекающих в ограждающей конструкции в период эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. СП 50.13330.2024. Тепловая защита зданий = Thermal protection of buildings : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 15 мая 2024 г. № 327/пр. : актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 : дата введения 2024-06-16 / исполнитель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН). – Москва : Стандартинформ, 2024 – 93 с. – Текст : непосредственный.
2. Warming of panel houses in various climatic zones / О. Gamayunova, Т. Musorina, М. Petrichenko [et al.]. – Текст : непосредственный // International scientific conference on energy, environmental and construction engineering : Proceedings of EECЕ, St. Petersburg, 19–20 ноября 2019 года. – Cham : Springer, 2020. – P. 253–263.
3. ГОСТ Р 59985-2022. Конструкции ограждающих зданий. Методы определения теплотехнических показателей теплоизоляционных материалов и изделий при эксплуатационных условиях = Structures of enclosing buildings. Methods for determining thermal engineering parameters of thermal insulation materials and products under operating conditions : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 января 2022 г. № 29-ст : введен впервые : дата введения 2022-05-01 / разработан Федеральным государственным бюджетным учреждением «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН). – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – 12 с. – Текст : непосредственный.
4. ГОСТ 24816-81. Материалы строительные. Методы определения сорбционной влажности = Construction materials. Methods for determining sorption humidity : государственный стандарт союза ССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 22 мая 1981 г. № 75 : дата введения с 1982-01-01 / разработан Научно-исследовательским институтом строительной физики [НИИСФ] Госстроя СССР. – Москва : Издательство стандартов, 1981. – 8 с. – Текст : непосредственный.
5. Zubarev, K. Mathematical modeling of heat and moisture regimes of building for the facade thermal insulation composite system with mineral wool insulation / K. Zubarev, V. Gagarin. – Текст : непосредственный // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – Volume 247. – P. 625–634.
6. Zubarev, K. Heat and moisture transfer in building enclosing structures / K. Zubarev, V. Gagarin. – Текст : непосредственный // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Volume 247. – P. 257–266.
7. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) : учебник для вузов / В. Н. Богословский. – Москва : Высшая школа, 1982. – 415 с. – Текст : непосредственный.
8. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий = Design of thermal protection of buildings : издание официальное : утвержден и введен в действие совместным Приказом ОАО «ЦНИИпромзданий» и ФГУП ЦНС № 01 от 23 апреля 2004 г. : введен впервые : дата введения 2004-06-01 / разработан Научно-исследовательским институтом строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), Москгоэкспертизой, Центральным научно-исследовательским и проектно-экспериментальным институтом промышленных зданий и сооружений, Федеральным государственным унитарным предприятием – Центром методологии и стандартизации в строительстве, Центральным научно-исследовательским и проектным институтом типового и экспериментального проектирования жилища. – Москва : Центр проектной продукции в строительстве, 2004. – 145 с. – Текст : непосредственный.

Информация об авторе

Малыгина Оксана Александровна – старший преподаватель кафедры проектирования и технологии строительства Луганского государственного университета имени Владимира Даля, ЛНР, Луганск, Россия. Научные интересы: тепло-влажностный режим ограждающих конструкций зданий.

Засько Виталий Васильевич – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры проектирования и технологии строительства Луганского государственного университета имени Владимира Даля, ЛНР, Луганск, Россия. Научные интересы: тепло-влажностный режим ограждающих конструкций зданий, трубопроводов.

Information about the author

Malygina Oksana A. – a senior lecturer, at the Department of Design and Construction Technology of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl, LPR, Lugansk, Russia. Scientific interests: heat and humidity regime of building enclosing structures.

Zasko Vitaly V. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Associate Professor of the Department of Design and Construction Technology of the Lugansk State University named after Vladimir Dahl, LPR, Lugansk, Russia. Scientific interests: heat and humidity regime of building enclosing structures, pipelines.

Статья поступила в редакцию 18.09.2024; одобрена после рецензирования 18.10.2024; принята к публикации 25.10.2024.

The article was submitted 18.09.2024; approved after reviewing 18.10.2024; accepted for publication 25.10.2024.