



УДК536.2.022, 697.137.2

Добросмыслов Сергей Сергеевич

научный сотрудник

E-mail: dobrosmislov.s.s@gmail.com

Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес организации: 660036, Россия, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50

Пылаева Марина Махмудовна

аспирант

E-mail: marina_khodjaeva@mail.ru

Огорельцева Нина Валерьевна

аспирант

E-mail: xomyak1994@gmail.com

Перькова Марина Александровна

аспирант

E-mail: dero-gai@mail.ru

Сибирский федеральный университет

Адрес организации: 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 82а

Изменение теплофизических характеристик наружных ограждающих конструкций в условиях реального температурно-влажностного режима

Аннотация

Постановка задачи. В наружных ограждающих конструкциях вследствие изменения влажности материалов в течение года изменяются теплофизические характеристики. Целью исследования является повышение достоверности расчетов тепло- и влагопереноса через наружные ограждающие конструкции и их сопротивления теплопередаче с учетом зависимости теплопроводности от сорбционной влажности.

Результаты. Полученные результаты показали, что в процессе эксплуатации зданий слои наружной ограждающей конструкции работают при различных влажностных условиях и использование для всех слоев в одной конструкции условий А и Б некорректно. По результатам вычислений значения сопротивления теплопередаче отличаются от проектной величины, представленной в СП 50.13330.2012, на 1-16 %.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в совершенствовании нормативной документации путем повышения точности вычисления коэффициента теплопроводности и, следовательно, повышения точности вычислений сопротивления теплопередаче.

Ключевые слова: теплопроводность, сорбционная влажность, режим эксплуатации, наружные ограждающие конструкции, сопротивление теплопередаче.

Введение

Наружные ограждения зданий защищают помещения от атмосферных воздействий, а также выполняют функции защиты и регулирования воздушного, теплового и влажностного режимов. Влажностный режим влияет на теплофизические свойства применяемых материалов [1]. В свою очередь от теплофизических свойств зависят энергозатраты необходимые на эксплуатацию здания.

Основной величиной, от которой зависят теплофизические свойства, является сорбционная влажность, которая, в свою очередь, зависит от температуры и влажности материалов. Под сорбцией строительных материалов чаще всего понимается физическая адсорбция водяного пара из воздуха на внутренних капиллярах, щелях, пустотах и прочих поверхностях, а также капиллярная конденсация водяного пара в его порах [2].

В процессе эксплуатации зданий происходит изменение температурных и влажностных полей, как в зависимости от времени, так и по толщине ограждающих конструкций. В ряде случаев, в связи с существенной тепловой инерции зданий, данный процесс можно не рассматривать как зависящий от времени и, следовательно, решать

задачу можно в стационарном приближении. В этом случае теплофизические свойства определяются эксплуатационной влажностью.

Эксплуатационная влажность материала – это влагосодержание в слоях ограждения относительно воздействующих на него температурно-влажностных факторов внутренних и наружных сред. Влагосодержание в материале конструкции становится равновесным после продолжительной эксплуатации здания [3, 4] и меняется в течении года.

В действующем СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» при оценке теплотехнических характеристик многослойных конструкций стен зданий влажность учитывается для двух условий эксплуатации – А или Б, которые в свою очередь определяются климатом района строительства. Коэффициент теплопроводности материалов при данных условиях эксплуатации выбирается постоянным. В реальных условиях влажностное состояние меняется в зависимости от расположения и температуры рассматриваемой области [5, 6]. Следовательно, при расчете сопротивления теплопередаче допускается неточность, связанная с использованием постоянных значений теплофизических свойств ограждающих конструкций. В работах [7-11] показано, что относительная влажность воздуха в материалах при эксплуатации зданий изменяется, как правило, в диапазоне 20-85 %. В этом диапазоне относительной влажности воздуха и будут формироваться теплофизические свойства материальных слоев ограждающих конструкций. В случае учета реальных температурных и влажностных полей будет повышена точность расчетов, выполняемая при проектировании здания.

Цель работы – повышение достоверности расчетов тепло- и влагопереноса через наружные ограждающие конструкции и сопротивления теплопередаче с учетом зависимости теплопроводности строительных материалов от сорбционной влажности.

Постановка задачи

В процессе эксплуатации зданий и сооружений через пористую ограждающую конструкцию проходит два потока – поток тепла и поток влаги. Процесс переноса тепла определяется уравнением теплопроводности, а процесс переноса влаги можно рассмотреть при помощи уравнения диффузии. Для задач влагопереноса при проектировании зданий уравнение диффузии записывается через парциальные давления водяного пара и коэффициента паропроницаемости. Зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры аппроксимируется аналитической зависимостью, а зависимость теплопроводности от сорбционной влажности и сорбционной влажности от относительной влажности воздуха целесообразно взять из результатов экспериментальных исследований. Следовательно, при решении поставленной задачи можно воспользоваться следующей системой уравнений (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial e}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial e}{\partial y} = 0 \\ E = 1,84 \times 10^{11} \exp\left(\frac{-5330}{T}\right) \\ \varphi = \frac{e}{E} 100\%; l = f(W); W = f(\varphi) \end{array} \right. , \quad (1)$$

где l – коэффициент теплопроводности, Вт/(м град); T – температура, К; μ – коэффициент паропроницаемости, кг/(сжмПа); E – давление насыщенного водяного пара, Па; j – относительная влажность, %; e – парциальное давление водяного пара, Па.

Условия однозначности

В исследовании был рассмотрен конструкционно-теплоизоляционный блок – красный полнотелый кирпич, плиты пенополистирольные, кирпич глиняный пустотелый и штукатурка из цементно-песчаного раствора. Геометрические размеры расчетной области представлены на рис. 1.

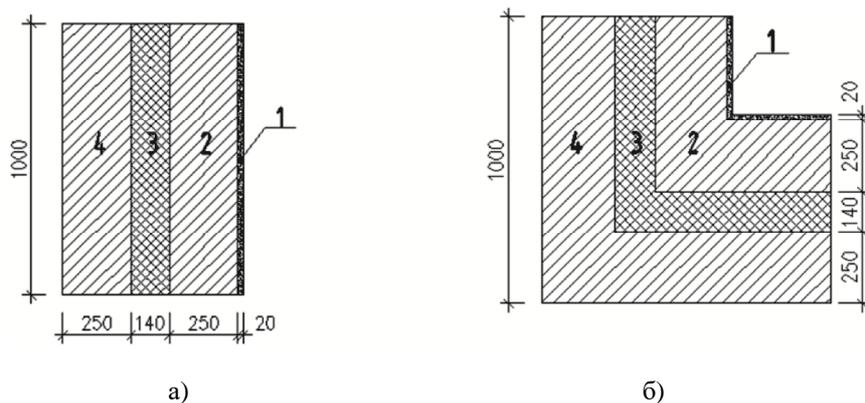


Рис. 1. Расчетная схема конструкции: а) по глади стены, б) угловое сопряжение стены:
 1 – штукатурка из цементно-песчаного раствора; 2 – кирпич глиняный пустотелый;
 3 – плиты пенополистирольные; 4 – красный полнотелый кирпич

Для решения задачи были применены тепло-влажностные и расчетные характеристики используемых строительных материалов, взятые из СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» (табл. 1).

Таблица 1

Тепло-влажностные характеристики материалов, используемых в расчете наружных ограждающих конструкций

Материал	Плотность материала в сухом состоянии ρ_0 , кг/м ³	Влажность W, %		Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м ² С)		Коэффициент паропроницаемости μ , кг/(м ² чПа)
		А	Б	А	Б	
Условия эксплуатации		А	Б	А	Б	А, Б
Кирпич глиняный пустотелый	1600	2	4	0,58	0,7	$4,17 \cdot 10^{-11}$
Плиты пенополистирольные	25	2	10	0,038	0,044	$1,39 \cdot 10^{-11}$
Красный полнотелый кирпич	1800	1	2	0,7	0,81	$3,06 \cdot 10^{-11}$
Штукатурка из цементно-песчаного раствора	1800	2	4	0,76	0,93	$2,50 \cdot 10^{-11}$

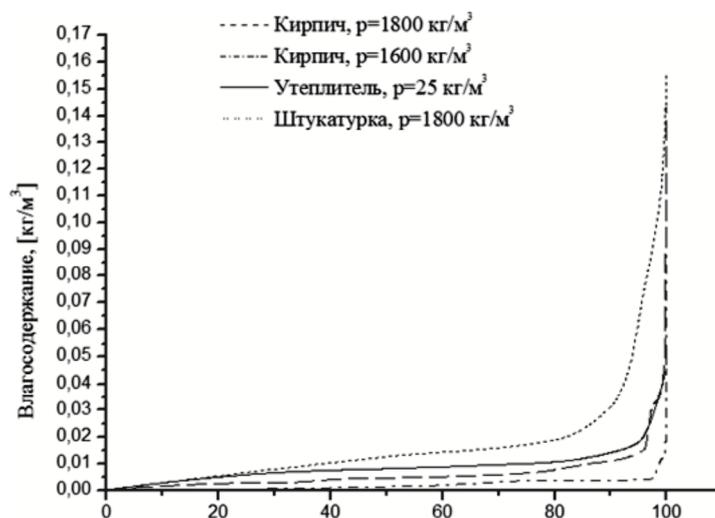


Рис. 2. График зависимости влагосодержания материалов от относительной влажности

На рис. 2-3 приведены значения сорбционной влажности от влажности воздуха и теплопроводности в зависимости от сорбционной влажности, полученные с Фраунгоферского института строительной физики. В качестве реальных эксплуатационных условий были выбраны значения парциального давления водяного пара и средняя температура для самого холодного месяца (января) согласно СП 131.13330.2012 «Строительная климатология».

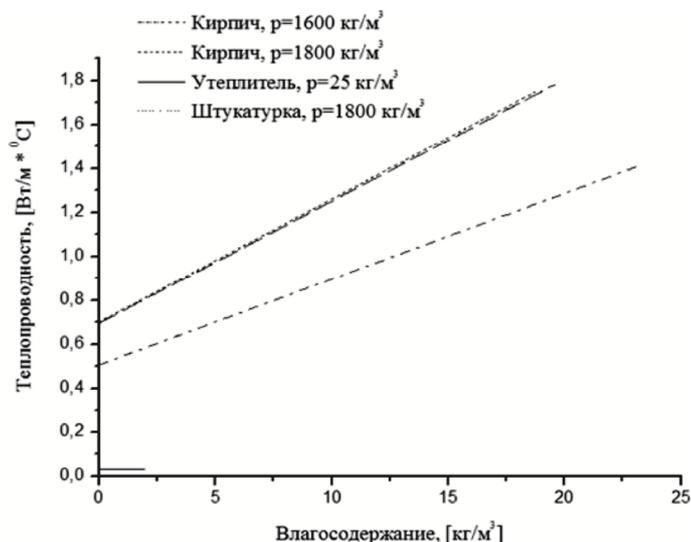


Рис. 3. График зависимости теплопроводности материалов от влагосодержания

Граничные условия, используемые в расчете, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Граничные условия, используемые в расчете

	Коэффициент теплоотдачи, α_v, α_n Вт/м ² ·°C	Температура, °C	Парциальное давление, e, Па
Внешняя	23	-16	140
Внутренняя	8,7	21	1367

Интерпретация и обсуждение результатов исследования

Для повышения достоверности определения температурно-влажностных характеристик наружных ограждающих конструкций, задача (1) решалась для геометрических размеров, представленных на рис. 1. Расчет велся для условий эксплуатации А и Б, а также для реальных условий эксплуатации при которых значение теплопроводности определялось в соответствии с температурно-влажностными полями и экспериментальными значениями приведенными на рис. 2-3. Расчет осуществлялся в программном комплексе Comsol Multiphysics 3.5a.

С целью формирования количественной оценки результатов полученные значения теплового потока и сопротивления теплопередаче для реального случая эксплуатации сравнивались с условиями А и Б.

Сопротивление теплопередаче материалов наружных ограждающих конструкций в реальных условиях эксплуатации и в условиях эксплуатации А и Б определялось с учетом актуальных тепло-влажностных характеристик по формуле (2):

$$R = \frac{\Delta T}{q}, \quad (2)$$

где ΔT – разность температур, °C;

q – плотность теплового потока, Вт/м².

Отличие сопротивления теплопередаче использованного в предложенной модели от проектной величины, представленной в СП 50.13330-2012 «Тепловая защита зданий» рассчитывалась по зависимости (3):

$$\Delta = \frac{|R_{\text{реал}} - R_{\text{А,Б}}|}{R_{\text{А,Б}}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $R_{\text{реал}}$ – сопротивление теплопередаче в реальных условиях эксплуатации, $\text{м}^2\text{°C/Вт}$; $R_{\text{А}}$ – сопротивление теплопередаче в условиях эксплуатации А, $\text{м}^2\text{°C/Вт}$; $R_{\text{Б}}$ – сопротивление теплопередаче в условиях эксплуатации Б, $\text{м}^2\text{°C/Вт}$.

Результаты вычислений сведены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты вычислений теплопроводности материалов
наружных ограждающих конструкций**

Вариант расчета	Плотность теплого потока, q , Вт/м ²	R_0 , м ² °C/Вт	Сопротивление теплопередаче материала R в различных условиях эксплуатации, м ² °C/Вт	D, %
По глади стены				
Условие эксплуатации А	7,94	4,66	4,66	1,0
Условие эксплуатации Б	9,11	4,06	4,06	14,2
Расчет в рамках предложенной модели	7,98	–	4,64	–
Угловое сопряжение				
Условие эксплуатации А	9,52	4,66	7,77	2,0
Условие эксплуатации Б	10,90	4,06	6,79	16,5
Расчет в рамках предложенной модели	9,36	–	7,91	–

Заключение

Для определения реального значения коэффициента теплопроводности было проведено численное моделирование процесса тепло- и влагопереноса через модельную стеновую наружную ограждающую конструкцию.

Полученные результаты показали, что в процессе эксплуатации зданий слои наружной ограждающей конструкции работают при различных влажностных условиях и использование для всех слоев в одной конструкции условий А и Б некорректно.

Полученные значения сопротивления теплопередаче отличаются от проектной величины, представленной в СП 50.13330.2012, на 1-16 %.

Для более точной оценки сопротивления теплопередаче необходимо использовать зависимость теплопроводности от сорбционной влажности материалов.

В тоже время не было исследовано поведение данной конструкции в экстремальных условиях, а также не было исследовано влияние теплопроводных включений в данную конструкцию, что, в свою очередь, может привести к изменению температурно-влажностных характеристик и, как следствие, вычисленных значений.

Список использованных источников

1. Гагарин В. Г., Пастушков П. П. Количественная оценка энергоэффективности энергосберегающих мероприятий // Строительные материалы. 2013. № 6. С. 7–9.
2. Гагарин В. Г. Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий, диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М. : 2000.

3. Гагарин В. Г., Козлов В. В. Математическая модель и инженерный метод расчета влажностного состояния ограждающих конструкций // Академия. Архитектура и строительство. 2006. № 2. С. 60–63.
4. Малявина Е. Г. Теплопотери здания: справочное пособие // «АВОК-ПРЕСС». 2007. № 4. 265 с.
5. Иванцов А. И., Куприянов В. Н. Режим эксплуатации многослойных стеновых ограждающих конструкций, как основа прогнозирования их срока службы // Известия КГАСУ. 2014. № 3 (29). С. 32–40.
6. Петров А. С., Куприянов В. Н. Переменное значение паропроницаемости материалов в условиях эксплуатации и его влияние на прогнозирование влажностного состояния ограждающих конструкций // Строительные науки. 2016. № 6 (738). С. 97–105.
7. Киселев И. Я. Влияние равновесной сорбционной влажности строительных материалов на сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций зданий // Жилищное строительство. 2013. № 6. С. 39–40.
8. Гагарин В. Г., Пастушков П. П., Реутова Н. А. К вопросу о назначении расчетной влажности строительных материалов по изотерме сорбции // Строительство и реконструкция. 2015. № 4 (60). С. 152–155.
9. Langlais C, Hyrien M, Klarsfield S. Influence of moisture on heat transfer through fibrous insulating materials // ASTM STP. 1983. № 789. P. 563–581.
10. Sandberg P. I. Thermal resistance of wet insulation materials // Swedish national testing institute. Technical report. 1986. № 229. 39 p.
11. Bomberg M. Moisture research in North America. In: Research and Development in Building Physics during the Last 25 Years. Stockholm, 1992. P. 57–94.

Dobrosmyslov Sergey Sergeyevich

researcher

E-mail: dobrosmislov.s.s@gmail.com**Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences**

The organization address: 660036, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok st., 50

Pylaeva Marina Mahmudovna

post-graduate student

E-mail: marina_khodjaeva@mail.ru**Ogoreltseva Nina Valeryevna**

post-graduate student

E-mail: xomyak1994@gmail.com**Perkova Marina Alexandrovna**

post-graduate student

E-mail: dero-gai@mail.ru**Siberian federal university**

The organization address: 660041, Russia, Krasnoyarsk, Svobodny st., 82a

Changes of thermophysical characteristics of external fencing constructions under conditions of real temperature-humidity regime**Abstract**

Problem statement. In the outer enclosing structures, due to changes in the moisture content of the materials, the thermophysical characteristics change throughout the year. The purpose of the study is to increase the reliability of calculations of heat and moisture transfer through external enclosing structures and their resistance to heat transfer, taking into account the dependence of thermal conductivity on sorption humidity.

Results. The obtained results showed that during the operation of buildings the layers of the outer enclosing structure operate under different humidity conditions and the conditions A and B for all layers in one design are not correct. According to the results of calculations, the values of thermal resistance differ from the design value, presented in SP 50.13330.2012, by 1-16 %.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry is to improve the normative documentation by increasing the accuracy of calculating the thermal conductivity and, consequently, increasing the accuracy of calculating the thermal resistance.

Keywords: thermal conductivity, sorption humidity, operating mode, external enclosing structures, resistance to heat transfer.

References

1. Gagarin V. G., Pastushkov P. P. Quantitative assessment of energy efficiency energy-saving measures // *Stroitel'nyye materialy*. 2013. № 6. P. 7–9.
2. Gagarin V. G. Theory of the state and transport of moisture in building materials and the heat-shielding properties of the enclosing structures of buildings, the thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences. M. : 2000.
3. Gagarin V. G., Kozlov V. V. Mathematical model and engineering method for calculating the moisture state of enclosing structures // *Academy. Architecture and construction*. 2006. № 2. P. 60–63.
4. Malyavina E. G. Heat loss of the building: reference book // AVOK-PRESS. 2007. № 4. 265 p.
5. Ivantsov A. I., Kupriyanov V. N. Mode of operation of multilayered walled enclosing structures, as a basis for predicting their service life // *Izvestiya KGASU*. 2014. № 3 (29). P. 32–40.
6. Petrov A. S., Kupriyanov V. N. Variable value of vapor permeability of materials under operating conditions and its influence on the prediction of the moisture state of enclosing structures // *Stroitel'nyye nauki*. 2016. № 6 (738). P. 97–105.
7. Kiselev I. Ya. Influence of the equilibrium sorption humidity of building materials on the resistance to heat transfer of external enclosing structures of buildings // *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. № 6. 2013. P. 39–40.
8. Gagarin V. G., Pastushkov P. P., Reutova N. A. On the design of the calculated moisture of building materials on the sorption isotherm // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2015. № 4 (60). P. 152–155.
9. Langlais C., Hyrien M., Klarsfield S. Influence of moisture on heat transfer through fibrous insulating materials // *ASTM STP*. 1983. № 789. P. 563–581.
10. Sandberg P. I. Thermal resistance of wet insulation materials // *Swedish national testing institute. Technical report*. 1986. № 229. 39 p.
11. Bomberg M. Moisture research in North America. In: *Research and Development in Building Physics during the Last 25 Years*. Stockholm, 1992. P. 57–94.