

Аспекты теплотехнического расчета легких ограждающих конструкций

И. Ю. Шалагин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Тюменский государственный архитектурно-строительный университет.

Аннотация: В статье рассмотрен теплотехнический расчет легких ограждающих конструкций, показано действие фильтрации воздуха на распределение температуры на внутренней поверхности ограждения.

Ключевые слова: Воздухопроницаемость, температурное поле, легкие ограждающие конструкции, высокопористые утеплители, влажность материала.

Наружные ограждения любых зданий должны предохранять помещения от непосредственных атмосферных воздействий [1].

В зимнее время наружное ограждение разделяет воздушные среды с различными температурами и, как правило, с различными барометрическими давлениями [2]. В результате возникающей разницы давлений с обеих сторон ограждающей конструкции происходит перемещение воздуха из области большего давления в область меньшего. Процесс перемещения воздуха через материал ограждения называется воздухопроницаемостью. Воздухопроницание существенно влияет на теплопередачу через ограждения, а также на теплопотери и тепловой режим помещений [1].

Влияние воздухопроницаемости на температурный режим ограждающих конструкций стало приобретать более значимый характер в связи с переходом на каркасно-монолитное строительство. При этом виде строительства стены зданий перестали выполнять несущие функции и, как следствие, стали менее массивными. Для строительства стали применять высокопористые теплоизоляционные материалы с меньшим коэффициентом теплопроводности, но, как выяснилось, с большим коэффициентом воздухопроницаемости. В индивидуальном строительстве широкое применение получила технология каркасного или каркасно-щитового домостроения.

При расчете температурных полей таких ограждающих конструкций применение существующих компьютерных программ будет некорректным ввиду того, что используемые в этих программах дифференциальные уравнения теплопроводности (1.1) не учитывают коэффициент фильтрации воздуха материала ограждения.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q(T) - c(T)\rho \frac{\partial T}{\partial T} \quad (1)$$

где: T – температура, К; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); q – удельная мощность тепловыделения, Вт/м²; $c(T)$ – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала, кг/м³.

Ф. В. Ушковым [2] была разработана методика расчета температурных полей плоской пористой стенки при наличии фильтрации воздуха. Автор данной методики в своей работе, предлагает следующее дифференциальное уравнение:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial z} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \pm c_v W \frac{\partial t}{\partial x} \quad (2)$$

где c – удельная теплоемкость материала ограждения, Вт·ч/(кг·°С); ρ – плотность материала ограждения, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·°С); c_v – удельная теплоемкость воздуха, Вт·ч/(кг·°С); W – количество фильтрующегося воздуха, кг/(м²·ч).

В условиях постоянной наружной и внутренней температуры в стационарных условиях производная по времени в уравнении (2) будет равна нулю и дифференциальное уравнение распространения тепла в плоской стенке при фильтрации воздуха приобретет вид:

$$\lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \pm c_v W \frac{\partial t}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

Решение уравнения (3) дает формулу для определения температуры в любой плоскости ограждения [9]:

$$t_x = t_n + (t_s - t_n) \cdot \frac{e^{\pm c_s W R_x} - 1}{e^{\pm c_s W R_o} - 1}, \quad (4)$$

где t_x - температура в любой плоскости ограждения, °С; t_n , t_s - температура наружного и внутреннего воздуха, °С; R_x - термическое сопротивление ограждения от наружного воздуха до рассматриваемой плоскости при отсутствии фильтрации воздуха, м·°С/Вт; R_o - сопротивление теплопередаче всего ограждения при отсутствии фильтрации воздуха, м²·°С/Вт; W - количество фильтрующегося воздуха, кг/(м²·ч).

Для исследования влияния воздухопроницаемости на изменение теплотехнических характеристик ограждающих конструкций были проведены исследования индивидуального жилого дома.

Объектом исследований являлся двухэтажный коттедж (рис. 1).



Рис. 1. – Коттедж, Тюменская область, деревня Метелево

Конструкция и характеристики материалов стены испытываемого объекта представлены на рис. 2 и в таблице 1.

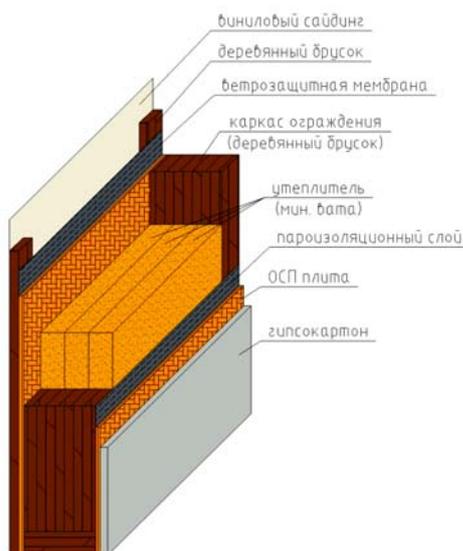


Рис. 2. – Конструкция стены

Таблица №1

Характеристики материалов ограждения

№ п/п	Наименование	Толщина, мм	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Плотность, кг/м ³
1	Гипсокартон	12,5	0,15	800
2	ОСП панель	9,5	0,15	1000
3	Пароизоляция «Изоспан В»	0,25		
4	Минвата «ROCKWOOL Лайт БАТТС Скандик»	150	0,039	32
5	Дерево (сосна)	-	0,292	600
6	Ветрозащитная пленка «Изоспан А»	0,45		
7	Виниловый сайдинг	1,02	0,19	

Для определения фактического сопротивления теплопередаче испытуемой конструкции на внутреннюю поверхность устанавливался измеритель плотности тепловых потоков ИТП-МГ4.03 «ПОТОК» на период 96 часов с периодом фиксации значений плотности теплового потока равным

5 минут. В результате измерений среднее значение плотности теплового потока составило $7,9 \text{ Вт/м}^2$. Средние температуры внутреннего и наружного воздуха соответственно составили $22,6 \text{ }^\circ\text{C}$ и минус $11,6 \text{ }^\circ\text{C}$. При расчете фактического сопротивления теплопередаче согласно (ГОСТ 26254-84) примем температуры внутренней и наружной поверхностей ограждений равными температурам внутреннего и наружного воздуха. Тогда сопротивление теплопередаче составит:

$$R = \frac{(t_{в} - t_{н})}{q_{ф}} = \frac{(22,6 + 11,6)}{7,9} = 4,3 (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт} \quad (5)$$

Расчетное значение сопротивление теплопередаче рассматриваемой конструкции в зоне расположения утеплителя составило:

$$R = \frac{1}{8,7} + \frac{0,012}{0,15} + \frac{0,01}{0,15} + \frac{0,15}{0,039} + \frac{0,01}{0,15} + \frac{1}{23} = 4,22 (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт} \quad (6)$$

Требуемое сопротивление теплопередаче для условий г. Тюмени, определяемое по (СНиП 23-02-2003), составляет $3,54 (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$. Отсюда следует, что обследуемая ограждающая конструкция соответствует требованиям (СНиП 23-02-2003).

Для получения полей температур на внутренних поверхностях ограждающих конструкции было выполнено тепловизионное обследование в соответствии (ГОСТ Р 54852-2011). Исследование было проведено в отопительный период, когда температура внутреннего воздуха составляла $22,3^\circ\text{C}$, а относительная влажность внутреннего воздуха составляла $24,2 \%$. Температура наружного воздуха на момент обследования составляла минус $8,6^\circ\text{C}$. На рис. 3 представлено температурное поле фрагмента стенового ограждения.

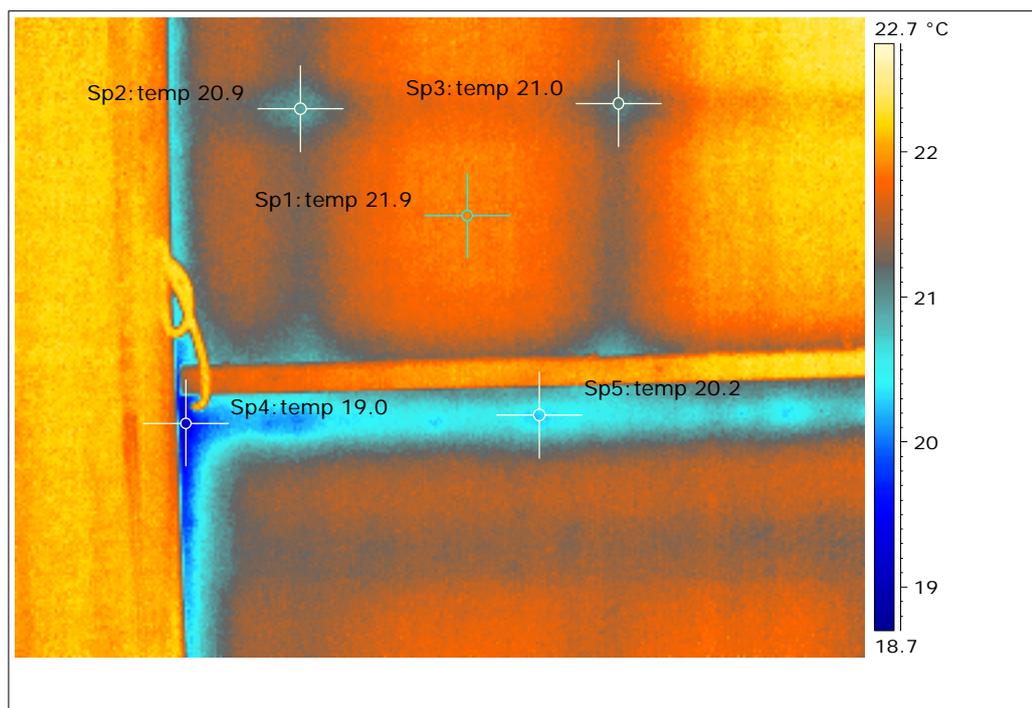


Рис. 3. – Температурное поле фрагмента стены

Как видно из рис. 3, в местах расположения вертикальных и горизонтальных брусков имеются зоны пониженных температур (до 18,7°С), что свидетельствует о сниженных теплозащитных свойствах смонтированного ограждения. Зоны пониженных температур в местах расположения деревянных брусков обусловлены тем, что материал брусков имеет непосредственный контакт с внутренней и наружной поверхностями ограждающей конструкции. Иными словами, деревянные бруски выполняют функции мостиков холода шириной 50 мм. Такой температурный режим ограждающих конструкций удовлетворяет требованиям (СНиП 23-02-2003) по условию максимального перепада (4°С) между температурой внутреннего воздуха (22,3°С) и внутренней поверхности стены (19°С). Следует отметить, что согласно (СНиП 23-02-2003), при расчете нормативного сопротивления теплопередаче принимается средняя температура наружного воздуха для периода со среднесуточной температурой не более 8 °С, которая для условий г. Тюмени составляет минус 7,2°С (СНиП 23-01-99).

Для сравнения фактических полей распределения температур был выполнен расчет данной конструкции в программе Elcut 6.1. При выполнении расчета теплопроводность материала дерева была принята равной $0,457 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$ при влажности материала дерева не более 30% [3].

Расчетное температурное поле представлено на рис. 4.

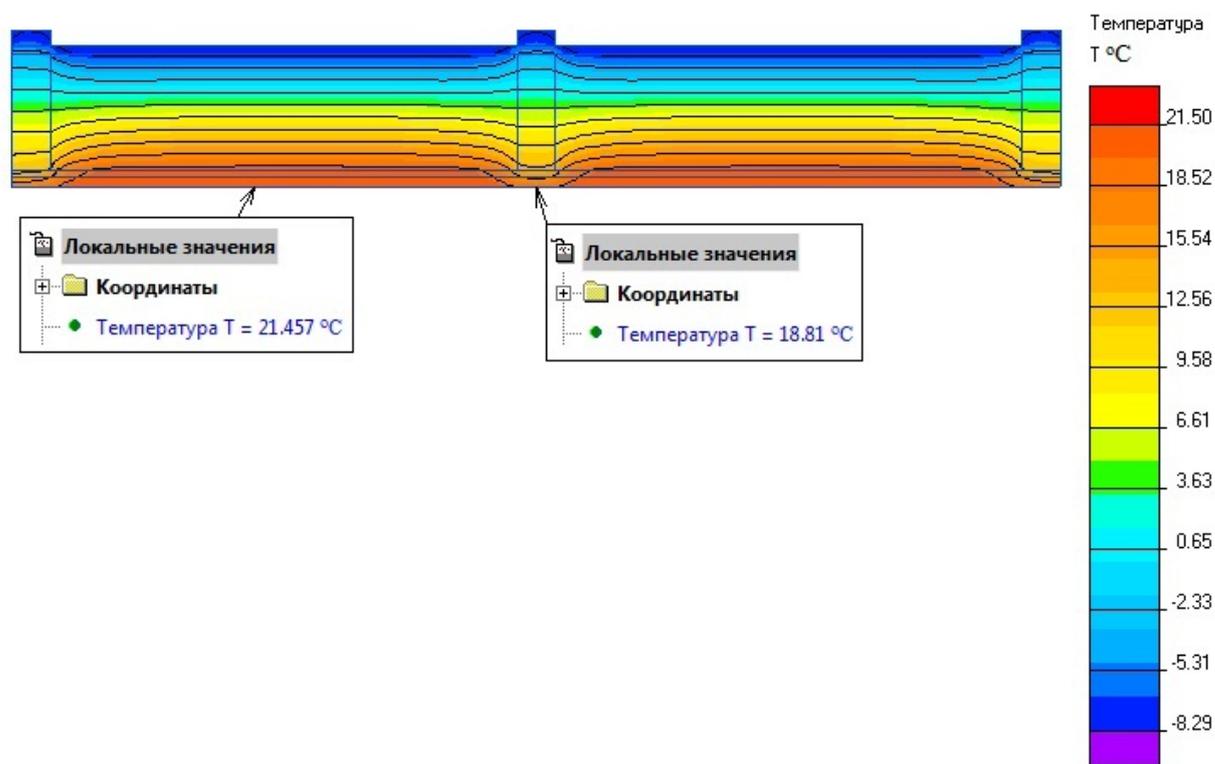


Рис. 4. – Температурное поле по сечению стены

Сравнительный анализ рис. 3 и 4 показал высокую сходимость расчетных и экспериментальных значений. Значения расчетных температур на внутренней поверхности ограждения были получены при температуре наружного воздуха равной минус $8,6\text{°C}$ и температуре внутреннего воздуха равной $22,3\text{°C}$. При проверке ограждающих конструкций на соблюдение нормируемого температурного перепада между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности стены, следует обратить внимание на то, что перепад температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности стены (СНиП 23-02-2003) определяется при средней наружной температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92.

Температура наиболее холодной пятидневки для г. Тюмени составляет минус 38°C (СНиП 23-01-99). В связи с этим был выполнен пересчет наиболее низкой температуры на внутренней поверхности ограждения в соответствии с формулой (2) прил. 7 (ГОСТ 26254-84) на расчетную наружную температуру минус 38°C , внутреннюю 20°C . Также был выполнен расчет распределения температур по сечению ограждающей конструкции. Расчетная температура внутренней поверхности, полученная по формуле (2) прил. 7 (ГОСТ 26254-84) составила $13,45^{\circ}\text{C}$. Температурное поле ограждения при температуре наружного воздуха минус 38°C представлено на рис. 5.

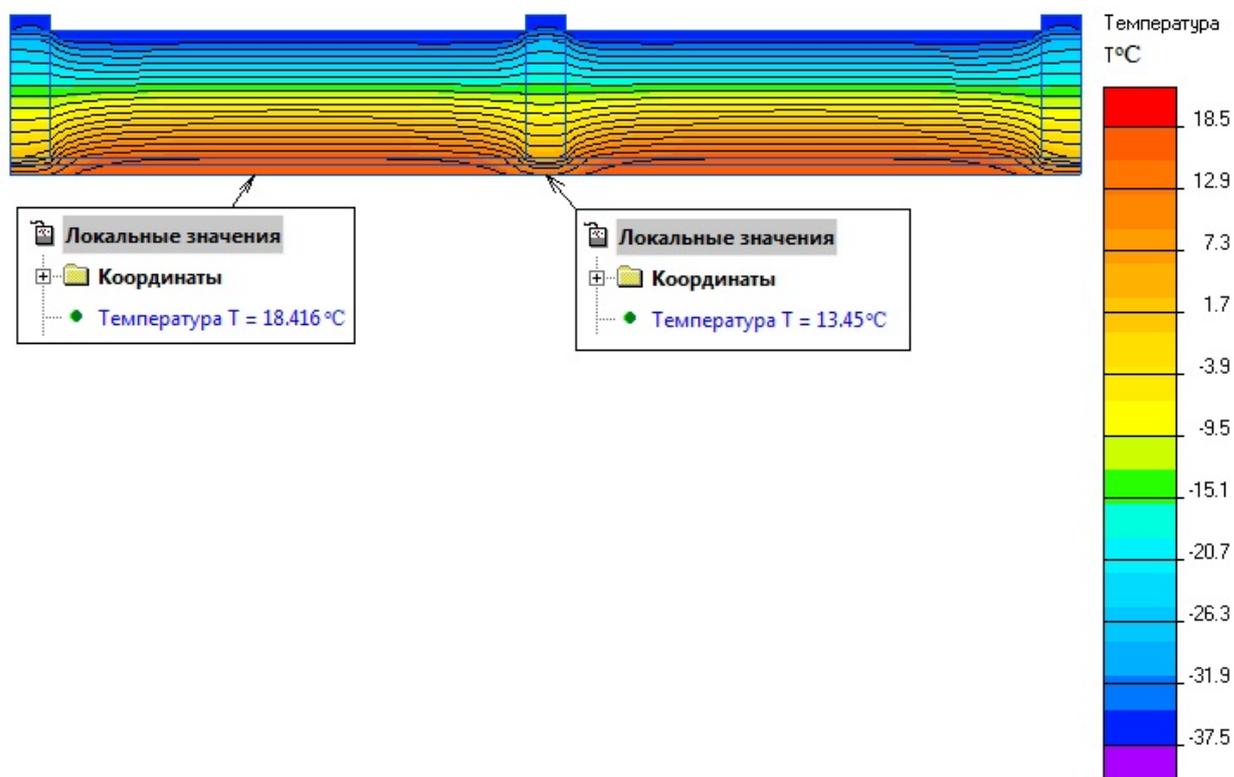


Рис. 5. – Температурное поле по сечению стены.

Как видно из рис. 5, значение температуры внутренней поверхности ограждения в зоне расположения вертикальной стойки и значение температуры, полученной по формуле (2) прил. 7 (ГОСТ 26254-84) в достаточной степени сходятся. Анализ температур внутренней поверхности, рассчитанных на условия температуры наружного воздуха наиболее

холодной пятидневки, показал, что температурный режим ограждений не будет удовлетворять нормативным значениям (СНиП 23-02-2003) ввиду превышающего перепада температур (7°C) внутреннего воздуха и внутренней поверхности стены. При дальнейшей эксплуатации здания, в результате высыхания материала древесины, объемная эксплуатационная влажность для условий г. Тюмени будет не более 12 %. В соответствии с [3] при объемной влажности 12% и средней плотности материала (сосна обыкновенная) 600 кг/м^3 при отрицательных температурах теплопроводность составит $0,292 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$. Расчетное поле температур при теплопроводности древесины $0,292 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$ представлено на рис. 6.

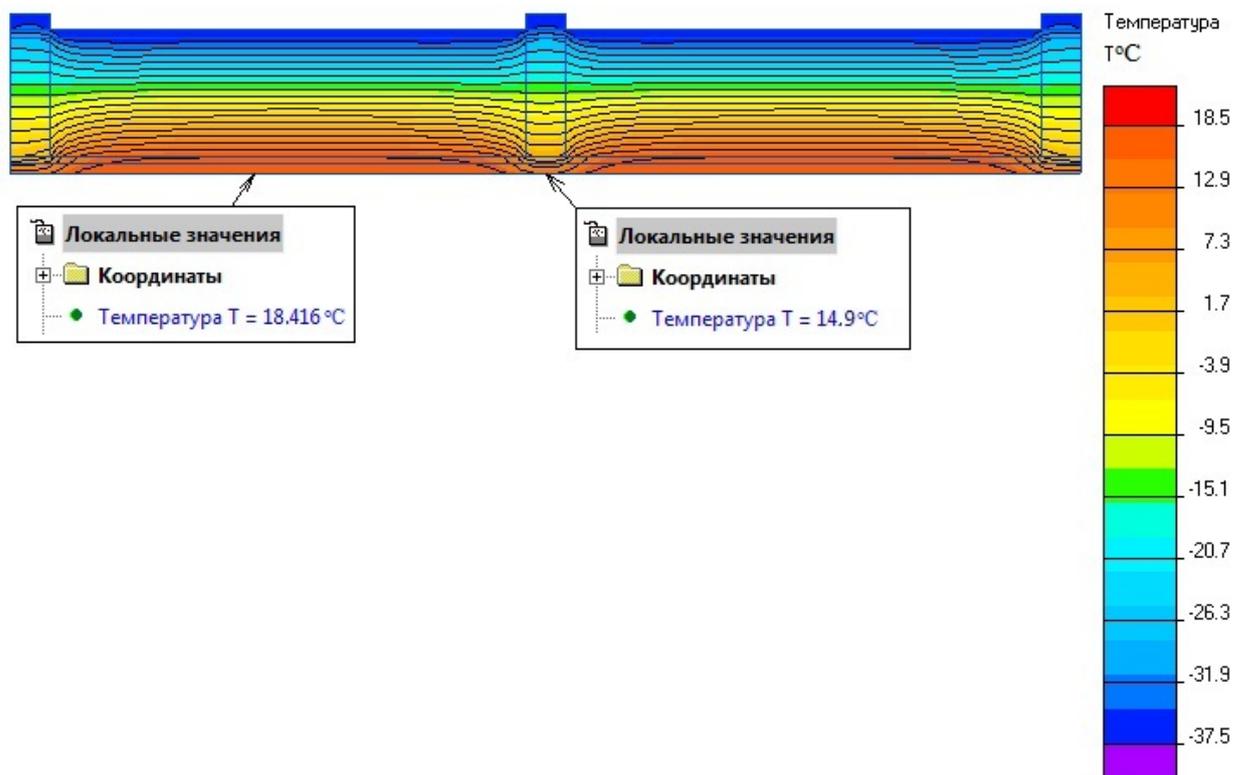


Рис. 6. – Температурное поле по сечению стены.

Анализ рис. 6 показал, что температура на внутренней поверхности обследуемой конструкции не будет удовлетворять условию допустимого перепада температур, регламентированного в (СНиП 23-02-2003). Также

значение температуры внутренней поверхности может снижаться в результате влияния различных факторов.

Температурное поле и теплотехнические качества конструкций могут существенно изменяться при совместном действии процессов передачи тепла и фильтрации воздуха через ограждения [4]. Для определения температур на внутренней поверхности в условиях фильтрации был выполнен расчет температуры в зоне расположения утеплителя по методике [2], которая составила 16,8 °С. Также определена фактическая воздухопроницаемость ограждений в соответствии с (ГОСТ 31167-2009), которая составила 6 кг/(м²·ч).

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- воздухопроницаемость в значительной степени оказывает влияние на значения температур в легких ограждающих конструкциях;
- теплотехнический расчет легких ограждающих конструкций необходимо выполнять на условия максимальных отрицательных наружных температур района строительства.

Литература

1. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. – М.: Стройиздат, 1979. – 248 с.
2. Ушков Ф.В. Теплопередача ограждающих конструкций при фильтрации воздуха. – М.: Стройиздат, 1969. – 144 с.
3. Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов, М.: НИИ строительной физики, 1969 - 142 с.
4. Ильинский В. М. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий). – М.: Стройиздат, 1974. – 216 с.
5. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. - М.: Высшая школа, 1982. -416с.

6. Гранум Х. Оптимизация теплоизоляции зданий (Трондхеймский университет, Норвегия) // Экономия энергии при застройке городов. - М.: Стройиздат, 1983. - 304-331 с.
7. Банхиди Л. Тепловой микроклимат помещений / Пер. с венг. В. М. Беяева. Под ред. В. И. Прохорова и А. Л. Наумова. - М.: Стройиздат, 1981. - 248 с.
8. Беяев В. С., Хохлова Л. П. Проектирование энергоэкономичных и энергоактивных гражданских зданий. - М.: Высш. шк., 1991, 178 с.
9. Ш. С. Тагойбеков, З. В. Кобулиев, Ф. Х. Саидов. Экспериментальные исследования прочности и теплофизических характеристик материалов для теплотехнических расчетов ограждающих конструкций на их основе // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2170/.
10. Н. Н. Руденко, И. Н. Фурсова. Влияние нестационарных тепловых условий на определение термического сопротивления ограждения // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2079/.
11. 124. DIN 4108: Wärmeschutz in Hochbau. — 1995. — 54 p.
12. Kiefl K. Kapillarer und dampfformiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen: Dissertation Universität-Gesamthochschule Essen, 1983. — 28 p.

References

1. Bogoslovskiy V.N. Teplovoy rezhim zdaniya [The thermal regime of the building]. M.: Stroyizdat, 1979. 248 p.
 2. Ushkov F.V. Teploperedacha ograzhdayushchikh konstruktsiy pri fil'tratsii vozdukha [Heat walling when air filtration]. M.: Stroyizdat, 1969. 144 p.
-



3. Franchuk A.U. Tablitsy teplotekhnicheskikh pokazateley stroitel'nykh materialov [Tables of thermal performance of building materials]. M.: NII stroitel'noy fiziki, 1969. 142 p.
4. Il'inskiy V. M. Stroitel'naya teplofizika (ograzhdayushchie konstruksii i mikroklimat zdaniy) [Building Thermal Physics (Building envelope and the microclimate of buildings)]. M.: Stroyizdat, 1974. 216 p.
5. Bogoslovskiy V.N. Stroitel'naya teplofizika [Building Thermal Physics]. M.: Vysshaya shkola, 1982. 416 p.
6. Granum X. Optimizatsiya teploizolyatsii zdaniy [Optimizing building insulation] (Trondkheymский университет, Норвегиya). Ekonomiya energii pri zastroyke gorodov. M.: Stroyizdat, 1983. 304-331 p.
7. Bankhidi JI. Teplovoy mikroklimat pomeshcheniy [Thermal indoor climate] Per. s veng.V.M. Belyaeva. Pod red. V.I. Prokhorova i A.JI. Naumova. M.: Sgroizdat, 1981. 248 p.
8. Belyaev B.C., Khokhlova L.P. Proektirovanie energoekonomichnykh i energoaktivnykh grazhdanskikh zdaniy [Designing energy efficient public buildings i energoaktivnykh]. M.: Vyssh. shk., 1991, 178 p.
9. Sh. S. Tagoybekov, Z. V. Kobuliev, F. Kh. Saidov Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2170/.
10. N. N. Rudenko, I. N. Fursova Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2079/.
11. DIN 4108: Warmeschutz in Hochbau. 1995. 54 p.
12. Kiefil K. Kapillarer und dampfformiger Feuchtetransport in mehrschichti-gen Bauteilen: Dissertation Universitat-Gesamthochschule Essen, 1983. 28 p.