

УДК 725 (075.8)

Л.В. ПАВЛОВА

кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и геодезического сопровождения строительства Самарский государственный архитектурно-строительный университет

КАЧЕСТВО И НАДЕЖНОСТЬ ТЕПЛОЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ*QUALITY AND RELIABILITY OF THERMAL PERFORMANCE OF BUILDINGS*

Рассматриваются вопросы качества и надежности теплозащиты зданий в современных условиях проектирования и эксплуатации в соответствии с новыми требованиями строительных норм и правил в свете сбережений топливно-энергетических ресурсов и экономики. Приводится теория теплотехнического расчёта ограждающих конструкций зданий с применением вероятностного метода.

Ключевые слова: качество, надёжность, вероятностный метод, теплотехнический расчёт, сбережение топливно-энергетических ресурсов.

Ученые и проектировщики, увеличив требования к теплозащитным качествам наружных стен и покрытий более чем в три раза, возлагали большую роль на ограждающие конструкции при решении проблемы энергосбережения в строительстве. Нормирование теплозащитных качеств наружных стен из условий энергосбережения стал основным при выборе наружных конструкций зданий. В основных районах строительства России, где расчетная зимняя температура ниже минус 20 °C, наружные стены вынуждены проектировать многослойными.

Каждая ограждающая конструкция здания должна обладать требуемым термическим сопротивлением R (м² °C/Вт), установленным СНиП 23-02-2003 "Тепловая защита зданий". Но если рассматривать различные по этажности, по объемно-планировочному и конструктивному решению здания, то можно выявить существенные различия в перераспределении тепла, уходящего через ограждающие конструкции здания. Тепловая нагрузка на различные ограждающие конструкции кирпичного здания для города Самары представлена в табл. 1 на основе рис. 1, исследованная с применением известной формулы теплового потока Q :

$$Q = \frac{(t_{\text{int}} - t_{\text{ext}})}{R_o} \cdot F, \quad (1)$$

The issues of quality and reliability of thermal performance of buildings in the current conditions, the design and operation in accordance with the new requirements of building regulations in the light of saving fuel and energy resources and the economy. We present the theory of heating calculation of building envelopes using probabilistic methods.

Key words: quality, reliability, probabilistic method, thermal engineering calculations, savings of fuel and energy resources.

где t_{int} - внутренняя температура помещения, для жилых зданий, равная 20 °C; t_{ext} - температура наружного воздуха (для Самары равна минус 28 °C); R_o - термическое сопротивление ограждающей конструкции; F - площадь ограждения.

Термические исследования показали, что нагрузка тепла на наружные стены многоэтажного здания увеличена больше чем в два раза. Перераспределение количества тепла в одноэтажном доме через другие ограждения снижают поток тепла через наружные стены (табл. 1). В силу этих причин с недавних пор в новом СНиП "Тепловая защита зданий" были учтены эти обстоятельства и здание стали рассматривать не как совокупность отдельных ограждающих конструкций, а как единый целый объект, теряющий тепло. Разработан бланк теплоэнергетического паспорта с подробным описанием расчета его составляющих. Этим достигнут положительный момент в процессе науки "Строительная теплофизика". Ученые пытаются в своих исследованиях уточнить при расчете теплопотерь влияние влаги, пара, ветра и воздухопроницаемости. Введен в расчет потенциал влажности.

Однако возникают вопросы, которые касаются, с одной стороны, сбережения топливно-энергетиче-

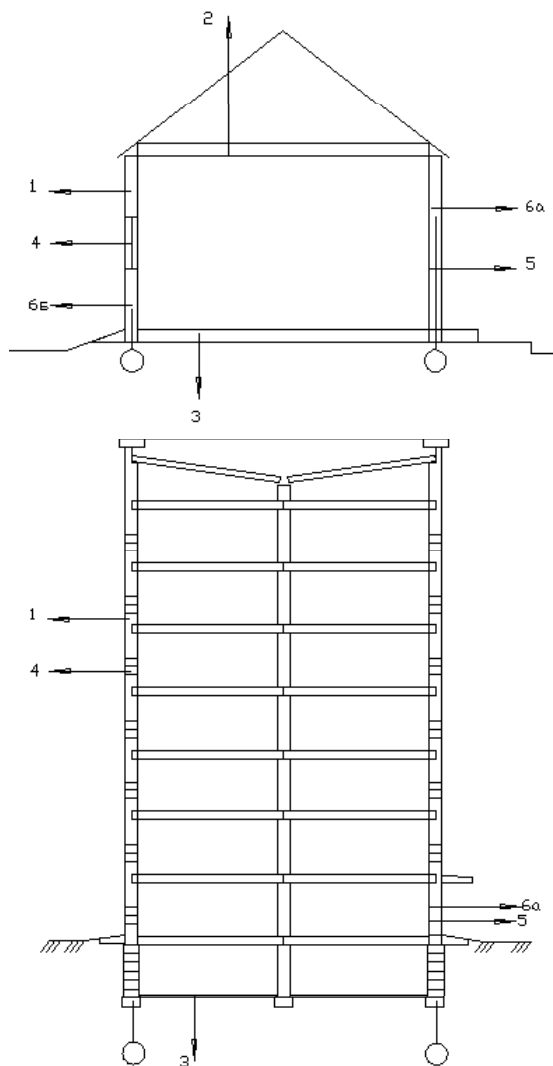


Рис. 1. Теплотери в зданиях: а – одноэтажных; б – многоэтажных; 1 – через наружные стены; 2 – через чердачные перекрытия; 3 – через полы по грунту или холодные надподвальные перекрытия; 4 – через окна; 5 – через входные двери; 6 – через открывающиеся проемы

Таблица 1

Теплотери зданий в зависимости от этажности

Показатель	Теплотери, %	
	1-эт. дом	9-эт. дом
Ограждающие конструкции		
Поле стены	25	59
Чердачное перекрытие	23	6
Полы надподвального перекрытия	9	5
Окна	24	20
Двери	2	
Притворы проемов и открывающиеся проемы	17	10

ских ресурсов и проектирования многослойной тепловой стены, с другой – долговечности, огнестойкости и качества этой сложной в креплении конструкции утепления. Если она недолговечна (как показывает опыт), то затраты на замену конструкции утепления могут перекрыть стоимость топлива. Встает вопрос и о периодичности замены.

Проведенные автором теоретические исследования зависимости теплотерь (рис. 2) от увеличения толщины утеплителя в конструкции нагрузкой кирпичной стены толщиной 0,51м, утепляемой эффективным утеплителем с $\lambda = 0,06$ в Самаре, показали, что кривая зависимости (рис. 3) – уравнение регрессии в форме гиперболы – имеет вид:

$$y = a + b/x. \quad (2)$$

Гиперболические зависимости характерны для связей, когда результирующий признак имеет односторонний предел, а нормальные уравнения метода наименьших квадратов для гиперболы имеют вид:

$$\begin{cases} na + b \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} = \sum_{i=1}^n y_i, \\ a \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} + b \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i^2} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{x_i}. \end{cases} \quad (3)$$

Из табл. 2 и по рис. 3 видно, что при толщине утеплителя 2 см стена достигает уровня санитарно-гигиенического состояния внутренней поверхности,

т.е. R_o – требуемого сопротивления теплоотдачи.

Система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} 15a + 3.3143b = 341.56, \\ 3.3143a + 1.58b = 102.15. \end{cases}$$

Решение системы уравнений дает значения показателей

$$a = 15.817, \quad b = 31.462.$$

Уравнение регрессии имеет вид

$$y = 15.817 + \frac{31.462}{x},$$

где x измеряется в сантиметрах.

При приведенном сопротивлении теплопередаче $R_o^{np} = 3.19 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Bm}$ с $\delta_{yt} = 130$ мм, теплотери Q составят 15 Вт/ч. Гиперболическая зависимость и табл. 2 показывают, что при увеличении R_o^{np} с 2,19 до $3,19 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Bm}$ теплотери стены уменьшаются только на 15 %. Это не оправдывает чрезмерное уве-

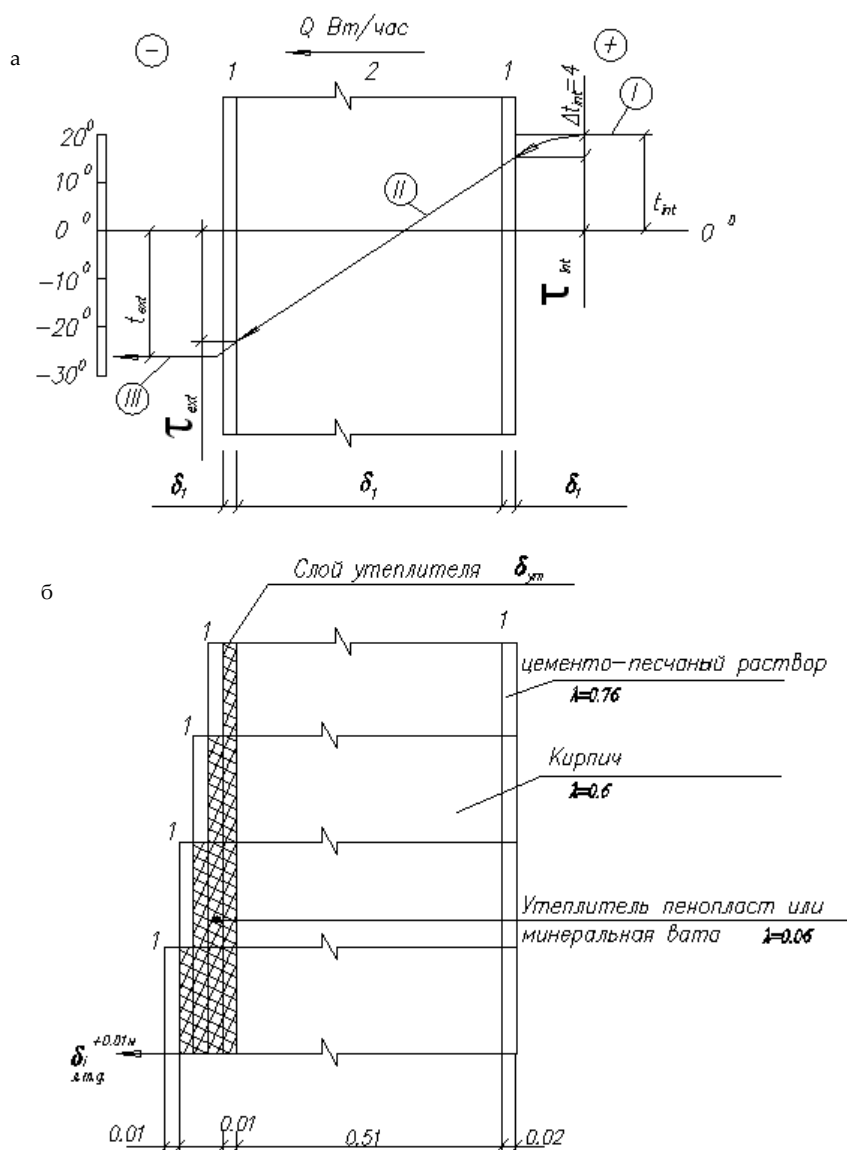


Рис. 2. Расчетная схема стены: а – теплопередача через наружную стену; б – расчетная схема теплопотерь при увеличении толщины утеплителя бут на 0.01 м последовательно; I – тепловосприятие внутренней поверхности; II – теплопроницание через ограждение; III – теплопередача наружному воздуху

личение слоя теплоизоляции, что ниже энергозатрат на отопление и горячее водоснабжение и затрат на капитальные ремонты недолговечных стен [2].

Поиск наиболее приемлемой методики тепло-технического расчета наружных стен по критериям санитарно-технического состояния стены и сбережения топливно-энергетических ресурсов можно вести, отказавшись от детерминированного метода в пользу вероятностного, при котором среднее значение температуры наружного воздуха t_{ext} заменяется статистическим рядом её значений за отопительный период. С точки зрения математической статистики задача выяснения расчетной t_{ext} и периода её дей-

ствия является задачей определения уровня выброса случайной функции с заранее заданной длительностью выброса.

Анализ t_{ext} предлагается провести по данным гидрометфонда Самарской губернии за 40-50 лет.

Построив графики изменения температур наружного воздуха за отопительные периоды за определенные года и наложив их друг на друга, можно проанализировать результаты и сделать предварительные выводы (рис. 4).

Предположительно за отопительный период резкое понижение зимой температуры наружного воздуха в среднем можно наблюдать три-четыре

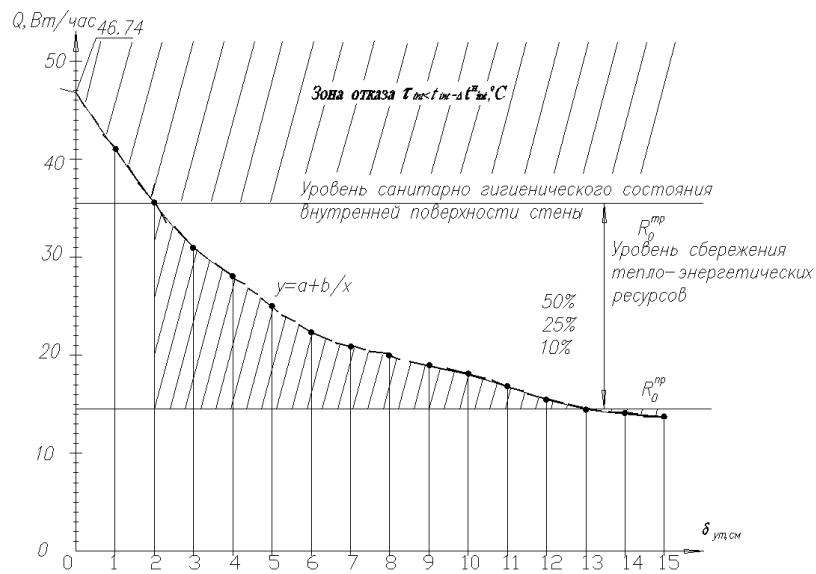


Рис. 3. Зависимость теплопотерь от увеличения толщины утеплителя в наружной стене

Таблица 2

Зависимость теплопотерь от увеличения толщины утеплителя в наружной стене

$\frac{y}{x}$	X^2	X	$\delta_{ут},$ см	$R_{ут}$	$R_{стены}$	Теплопотери Q, Вт/ч		Примечание
						y	значение	
42,3	1	X1	0		1,027	Y1	46,74	Отказ при $R_{тр}=1,38$ $Q=34,78$
17,7	4	X2	1	0,166	1,193	Y2	42,3	
10,48	9	X3	2	0,33	1,357	Y3	35,4	
7,8	16	X4	3	0,5	1,527	Y4	31,43	
5,16	25	X5	4	0,67	1,69	Y5	28,4	Обеспечение качества теплозащиты
3,93	36	X6	5	0,83	1,86	Y6	25,8	
3,13	49	X7	6	1	2,027	Y7	23,6	
2,54	54	X8	7	1,16	2,19	Y8	21,92	
2,11	21	X9	8	1,33	2,36	Y9	20,34	
1,78	100	X10	9	1,5	2,527	Y10	19	
1,52	121	X11	10	1,67	2,69	Y11	17,84	
1,32	144	X12	11	1,83	2,86	Y12	16,78	
1,15	169	X13	12	2	3,027	Y13	15,86	
1,02	196	X14	13	2,17	3,19	Y14	15	
0,91	225	X15	14	2,33	3,36	Y15	14,29	При $R_{пр} = 3,19$ $Q=15,0$ перерасход тепла
102,15		X16	15	2,5	3,53	Y16	13,6	

раза. На графике они обозначены y_1 , y_2 и y_3 . Продолжительности таких понижений не более двух-четырех суток обозначены как τ_1 , τ_2 и τ_3 соответственно. Само обозначение τ говорит об отказе стенового ограждения, который наступает при понижении температуры на внутренней поверхности τ_{int} ниже предельно допустимой

$$\tau_{int} \leq t_{int} - \Delta t^H, ^\circ C. \quad (4)$$

$$\tau_{int} \leq \tau_{росы}.$$

Количество отказов N_i за срок эксплуатации ограждения можно определить по формуле, предложенной Ю.Д. Суховым (ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР):

$$N_i = \sum_{j=1}^T \sum_{j=1}^i Q_j \cdot H_{i-j}, \quad (5)$$

где Q_j - вероятность отказа на j -м году эксплуатации; $N_0=1$; $H_{i-j} = H_{i-j} / (1 + E)^i$ - коэффициент приведения разновременных затрат по СН 509-78 [3];

Таблица 3

Значения x_i и y_i для решения системы уравнений

x_i	y_i	$\frac{1}{x_i}$	x_i^2	$\frac{1}{x_i^2}$	$\frac{y_i}{x_i}$
0	46,74		0		
1	42,3	1	1	1	42,3
2	35,4	0,5	4	0,25	17,7
3	31,43	0,333	9	0,11	10,48
4	28,4	0,25	16	0,625	7,1
5	25,8	0,2	25	0,04	5,16
6	23,6	0,17	36	0,03	3,93
7	21,92	0,13	49	0,02	3,13
8	20,34	0,125	64	0,016	2,54
9	19	0,11	81	0,012	2,11
10	17,84	0,1	100	0,01	1,78
11	16,78	0,09	121	0,0083	1,52
12	15,86	0,8333	144	0,007	1,32
13	15	0,08	169	0,006	1,15
14	14,29	0,07	196	0,005	1,02
15	13,6	0,06	225	0,0044	0,91
	341,56	3,314		1,58	102,15

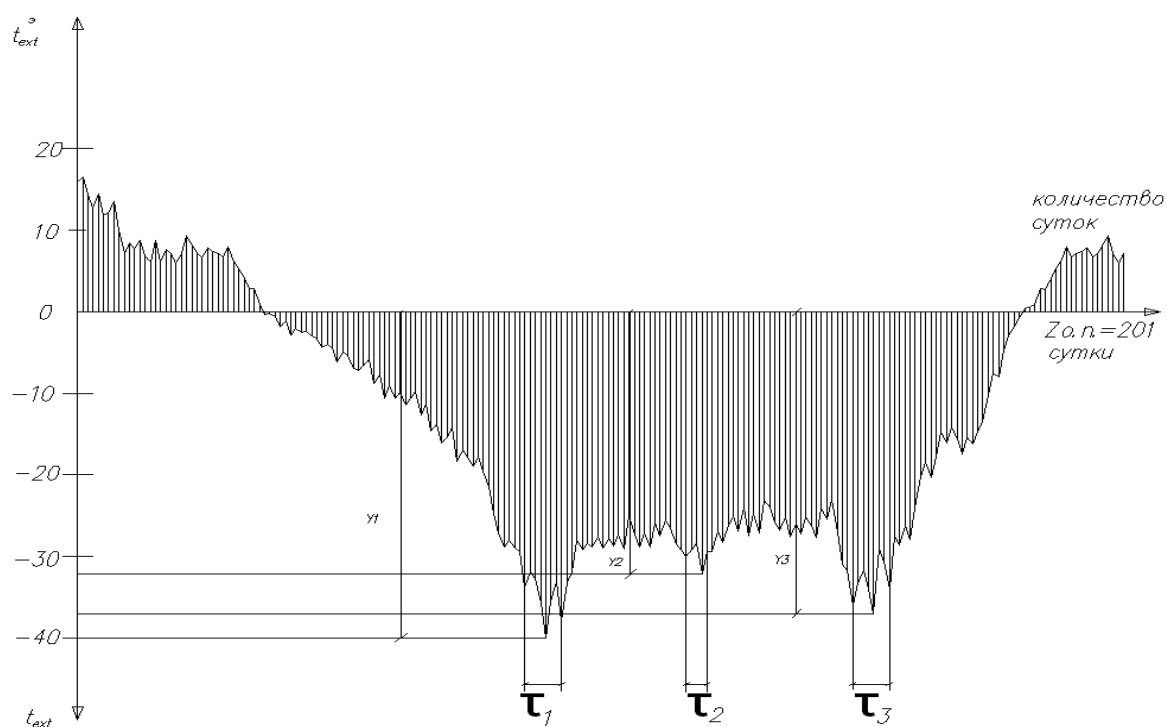


Рис. 4. График изменения $t_{ext}^y = f(Z_{o.п.})$ за определенный отопительный период, где t_{ext}^y - эксплуатационные значения температур наружного воздуха; $Z_{o.п.}$ - количество дней отопительного периода

$$Q_j = 1 - S / (j^u + S),$$

где $S = W_0 / (1 - W_0)$; $S_T = W_T / (1 - W_T)$;

$$U = \frac{1}{\ln T} \ln(S / S_T),$$

здесь W_0 и W_T - коэффициенты надежности конструкции соответственно в начале и в конце эксплуатации.

Распределение температур t_{ext} можно описать экстремальным законом Гумбеля (двойным экспоненциальным):

$$y = e^{-a(u-t)} - e^{-a(u-t)}, \quad (6)$$

где $a = 1.28255 / \sigma_t$; $u = 0.5745 / a$ - параметры распределения Гумбеля;

$t = t_{ext}^3$, σ_t - среднее квадратическое отклонение распределения t_{ext}^3 .

Зависимость (6) позволяет определить значение минимальной температуры за период эксплуатации T стены:

$$t_T = u - \frac{\ln(T)}{a}. \quad (7)$$

При этом стандарт распределения t_h^3 остаётся неизменным.

Распределение значений t_{int} можно получить при различных толщинах утеплителя ограждения при разных значениях λ , t_{ext}^3 и t_T .

Вероятность проявления отказа Q и надежность W ограждения по функции "теплозащита" вычисляются по формулам:

$$Q = \int_{-\infty}^{16} \frac{1}{\sigma_t \sqrt{\pi}} \cdot e^{-\frac{(\bar{\tau} - \tau_i)^2}{2\sigma_t^2}} d\tau, \quad (8)$$

$$W = 1 - Q. \quad (9)$$

Затем можно вычислить количество отказов H_i по формуле (5) за T лет эксплуатации.

Приведенные затраты Π_i с учетом количества отказов H_i за срок эксплуатации определяются по формуле

$$\Pi_i = C_i + N \cdot 3n_i + E_H \cdot K_i + \mathcal{E}_1 / E_H + \mathcal{E}_2 + C_y \cdot H, \quad (10)$$

где C_i - себестоимость осуществления проектного решения, р./м²; N - норматив отчислений в фонд общественного потребления ($N=0.4$); $3n_i$ - заработная плата в себестоимости единицы продукции строительного производства, р./м²; E_H - нормативный коэффициент сравнительной эффективности 0,12 1/год; K_i - капитальные вложения в основные и оборотные фонды строительных организаций и сопряженные отрасли производства строительных конструкций, р. * год/м²; \mathcal{E}_1 - годовые эксплуатационные расходы, р. / год/м²; \mathcal{E}_2 - затраты на топливо, р./м²; C_y - стоимость ущерба от отказа конструкции, р./м²;

$$C_y = C_y^{cmp} + C_y^{постор}, \quad (11)$$

где C_y^{cmp} - строительный ущерб в результате отказа конструкции; $C_y^{постор}$ - посторонний ущерб, нанесенный отказом конструкции (ценные книги, картины, находившиеся у отказавшей стены и испортившиеся в результате отсыревания).

Учет экономических последствий выражается коэффициентом экономической ответственности

$$\beta = \frac{C_y}{C_i + N \cdot 3n_i + E_H \cdot K_i}. \quad (12)$$

Из отношения термического сопротивления оптимизированной конструкции к требуемому термическому сопротивлению теплопередаче получаем коэффициент надежности по теплозащите K_H , который можно выразить формулой

$$K_H = a + b \cdot \ln \beta. \quad (13)$$

Данная формула графически будет иметь обратную гиперболическую зависимость.

Предложенная методика может обосновать с наивысшей вероятностью назначение вероятностного требуемого сопротивления теплопередаче с учетом экономических последствий, причем есть и математическое обоснование проблемы.

Следует сказать, что теплотери здания зависят еще и от качества строительных работ. Некачественно выполненные стыки между полем стены и оконными блоками, технологические завышения плотности материала стен, первоначально завышенная влажность могут существенно увеличить



Рис. 5. Теплотехнические дефекты наружных стен

теплопотери здания, несмотря на тщательно обоснованные толщины слоев и соответствующие коэффициенты материалов этих слоев (рис. 5).

Проблему следует рассматривать комплексно со стороны качества и теплозащиты здания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Строительная теплотехника: актуальные вопросы нормирования [Текст] // Труды I Всероссийской научно-технической конференции. – СПб.: СПб. ЗНИИПИ, 2008. – 214 с.

2. Ананьев, А.И. Об уровне теплозащиты [Текст] / С.А. Байкова, М.Н. Ефименко // К вопросу нормирования теплопроводности материалов и теплозащитных свойств наружных ограждающих конструкций зданий. – М., 2003. – С. 26-30.

3. Павлова, Л.В. Современные энергосберегающие ограждающие конструкции зданий. Стены: учебное пособие [Текст] / Л.В. Павлова; Самарск. гос. арх.-строит. универ. – Самара, 2011. – 64 с.

© Павлова Л.В., 2013