Езерский В.А., член-корр. МИА, д.т.н. (г. Белосток, РП)
Монастырев П.В., к.т.н. (г. Тамбов, РФ)
Федоров С.В., к.т.н. (г. Омск, РФ)

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ НАРУЖНЫХ СТЕН ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ФАСАДОВ

С большой точностью приведенное сопротивление теплопередаче стены с неоднородными участками можно определить численными методами с помощью математического моделирования трехмерной задачи на электронно-вычислительных машинах. Данный метод требует наличия соответствующих программ, а также навыков работы у проектировщика со сложным программным продуктом.

Для доступности методики расчета и сокращения времени в практике проектирования разработан инженерный метод определения приведенного сопротивления теплопередаче (R_0, м$^{2.0}$С/Вт) наружных стен, ослабленных термическими включениями [1]. Данный метод сводится к определению R_0 по формуле:

$$R_0 = R_0^{усл} \cdot r, \quad (1)$$

где $R_0^{усл}$ – сопротивление теплопередаче стен без учета теплопроводных включений, м$^{2.0}$С/Вт; r – коэффициент теплотехнической однородности.

Очевидно, что точность значений приведенного сопротивления теплопередаче, вычисляемого по формуле (1), определяется точностью подбора соответствующего коэффициента теплотехнической однородности, который в свою очередь находится в зависимости от параметров исследуемого фрагмента ограждающей конструкции.

В настоящее время использование такого подхода к расчету R_0 для наружных стен вентилируемых фасадов дает весьма приблизительный результат, так как вопрос о влиянии крепежных элементов таких стен на коэффициент теплотехнической однородности малоизучен. В связи с этим проведено исследование зависимости коэффициента теплотехнической однородности от влияющих факторов, характеризующих свойства материалов крепежных элементов и их геометрические параметры.

Выбор факторов выполнен с учетом проведенного ранее исследования [2], которое показало, что крепежные элементы стен вентилируемых фасадов понижают температуру внутренней поверхности наружной стены (τ^*, ^{0}C) в точке находящейся на одной оси с анкером крепежного каркаса. Там же установлено, что из пятнадцати изученных факторов статистически значимое влияние оказывают: толщина ($\delta_{ст}$, м) и коэффициент теплопроводности ($\lambda_{ст}$, Вт/(м·^{0}C)) несущей части стены, глубина заложения ($h_{ан}$, м) анкерного болта, коэффициент теплопроводности ($\lambda_{кр}$, Вт/(м·^{0}C)) крепежного каркаса и расстояния (L, м) между анкерами. В связи с тем, что приведенное сопротивление теплопередаче и распределение температуры на внутренней поверхности ограждающей конструкции находятся в тесной взаимной зависимости, в данном исследовании в качестве существенно влияющих на коэффициент теплотехнической однородности рассматривались те же самые факторы. Уровни варьирования факторов и кодированные их значения приведены в табл.1. Пределы варьирования факторов подробно обосновывались в работе [2].

Таблица 1

Обозначение факторов и пределы их варьирования

Обозначение фактора	Наименование фактора	Натуральное значение факторов, соответствующее кодированным значениям:	
		- 1	+ 1
Несущая конструкция стены			
X_1	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·^{0}C)	0,33	0,81
X_2	Толщина, м	0,25	0,51
Крепежный каркас			
X_3	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·^{0}C)	58	221
X_4	Расстояние между анкерами горизонтальное, м	0,4	1,2
X_5	Расстояние между анкерами вертикальное, м	0,5	2,0
X_6	Глубина заложения анкерного болта, м	0,05	0,15

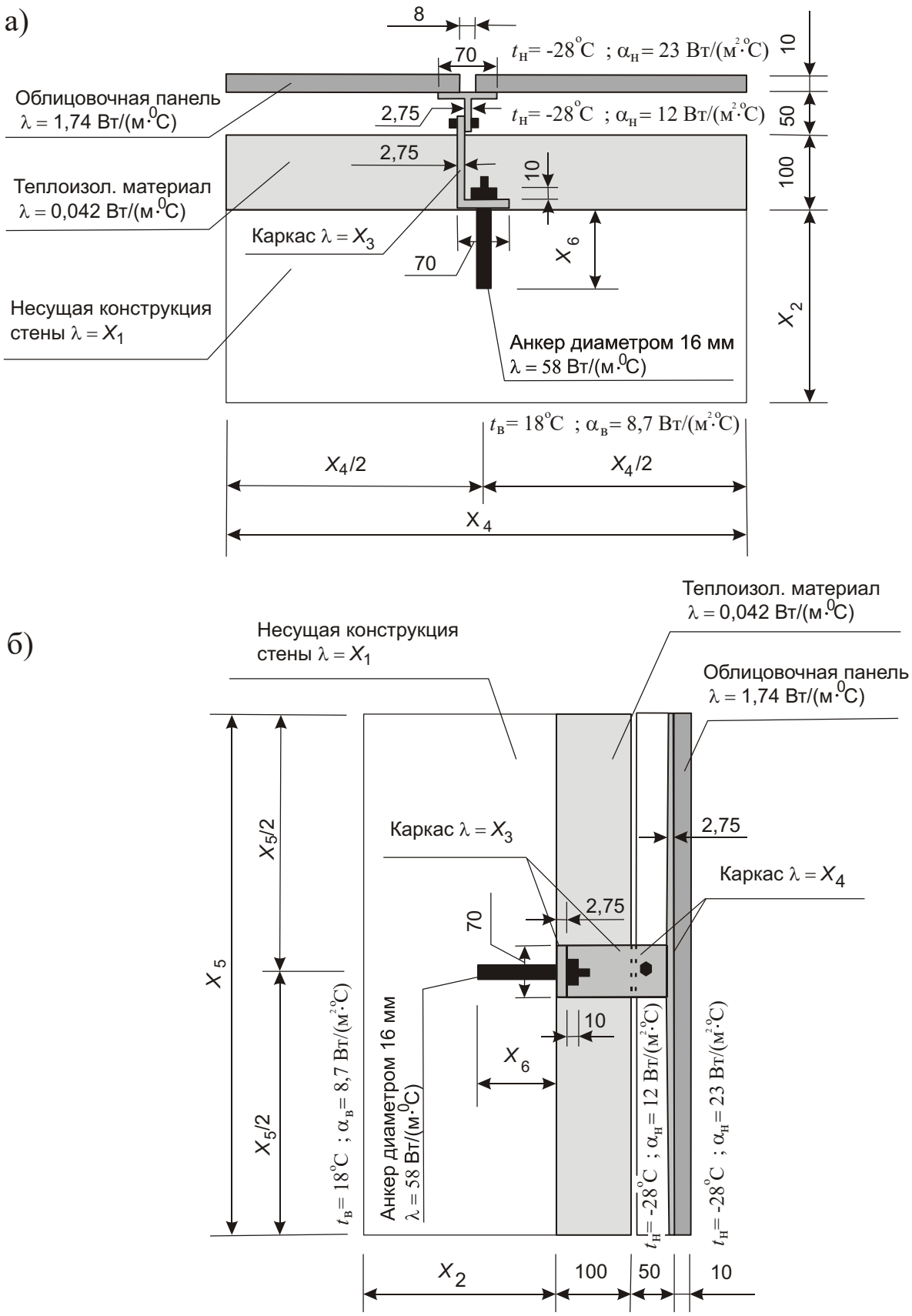


Рис.1. Параметры конструктивного узла для определения коэффициента теплотехнической однородности наружной стены вентилируемого фасада: а) горизонтальный разрез; б) вертикальный разрез

Исследование проведено на основе вычислительного эксперимента на ЭВМ с использованием программного комплекс "TEMPER-3D" [3], позволяющим производить расчеты распределения температур в любом сечении ограждающей конструкции здания и определять ее приведенное сопротивление теплопередаче в объемной постановке задачи методом конечных элементов. Проводились расчеты величины сопротивления теплопередаче стены с учетом (в качестве приведенного) и без учета теплопроводных включений. Далее с помощью зависимости (1) рассчитывались значения коэффициента теплотехнической однородности. Расчеты выполнены для узла, представленного на рис.1. Там же указаны параметры исследуемой конструкции, а также граничные условия.

Для описания поверхности отклика $Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6)$ проведен шестифакторный вычислительный эксперимент по плану первого порядка. При этом использован двухуровневый план, включающий 64 опыта. План и результаты эксперимента (фрагментарно) приведены в табл.2.

Для изучения исследуемого свойства строилась модель вида:

$$\hat{Y} = b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3+b_4X_4+b_5X_5+b_6X_6+b_7X_1X_2+$$
$$+b_8X_1X_3+b_9X_1X_4+b_{10}X_1X_5+b_{11}X_1X_6+b_{12}X_2X_3+b_{13}X_2X_4+b_{14}X_2X_5+b_{15}X_2X_6+b_{16}X_3X_4+$$
$$+ b_{17}X_3X_5+b_{18}X_3X_6+b_{19}X_4X_5+b_{20}X_4X_6 + b_{21}X_5X_6 .$$

По результатам эксперимента (табл.2) построена регрессионная модель, которая обладала необходимой точностью, но имела достаточно громоздкий вид, так как включала 22 коэффициента. Вслед за этим была выполнена оценка значимости коэффициентов модели. При этом принималось во внимание, что дисперсия ошибки наблюдений σ^2 не известна и в каждой точке плана проводилось одно наблюдение. Для такого случая доверительный интервал для коэффициентов модели с доверительной вероятностью $P = 0{,}95$ определяется из выражения [4]:

$$\left| \hat{a}_i - \bar{a}_i \right| \le S_i \cdot \varepsilon, \qquad (2)$$

где: $\hat{a}_i$ – значение i-того коэффициента модели; $\bar{a}_i$ – истинное значение i-того коэффициента модели; S_i^2 – оценка дисперсии $\hat{a}_i$; ε – граничное значение критической области χ^2 – распределения.

Из (2) следует, что при $\left|\hat{a}_i\right| \le S_i \cdot \varepsilon$, коэффициент $\hat{a}_i$ следует считать незначимым.

Оценки S_i^2 рассчитывались по формуле: $S_i^2 = c_{ii} S^2_{\text{ост}}$,

где c_{ii} – элементы главной диагонали дисперсионной матрицы $(X^{\mathrm{T}} \cdot X)^{-1}$;

$S^2_{\text{ост}}$ – остаточная дисперсия, рассчитываемая по формуле:

$$S^2_{ост} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (y_i - \hat{y}_i)^2}{N - d},$$

с $f = N - d$ степенями свободы.

Таблица 2

Матрица планирования и результаты вычислительного эксперимента по определению коэффициента теплотехнической однородности (***r***) наружной стены вентилируемого фасада

№ опыта	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	Сопротив. теплоперед. без учета мостиков холода $\boldsymbol{R_0^{усл}}$	Сопротивление теплопередаче $\boldsymbol{R_0}$	Коэф. теплотехнической однородности ***r***		Квадраты остатков $\boldsymbol{(Y_i^{набл} - \hat{Y}_i^{мод})^2}$
									вычислен.	по модели $\hat{\boldsymbol{Y}}$	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	3,3368	2,3638	**0,7084**	**0,7058**	0,0000066
2	+1	-1	-1	-1	-1	-1	2,8879	1,7562	**0,6081**	**0,6061**	0,0000037
3	-1	+1	-1	-1	-1	-1	4,1247	3,1503	**0,7638**	**0,7348**	0,0008357
4	+1	+1	-1	-1	-1	-1	3,2089	2,0766	**0,6471**	**0,6352**	0,0001405
5	-1	-1	+1	-1	-1	-1	3,3368	2,1079	**0,6317**	**0,6388**	0,0000506
6	+1	-1	+1	-1	-1	-1	2,8879	1,3856	**0,4798**	**0,5003**	0,0004209
7	-1	+1	+1	-1	-1	-1	4,1247	2,8944	**0,7017**	**0,6678**	0,0011437
8	+1	+1	+1	-1	-1	-1	3,2089	1,7060	**0,5317**	**0,5293**	0,0000054
…	…	…	….	….	….	….	……	……..	……..	…..	……
57	-1	-1	-1	+1	+1	+1	3,3368	3,1985	**0,9586**	**0,9440**	0,0002113
58	+1	-1	-1	+1	+1	+1	2,8879	2,7262	**0,9440**	**0,9375**	0,0000414
59	-1	+1	-1	+1	+1	+1	4,1247	3,9878	**0,9668**	**0,9731**	0,0000400
60	+1	+1	-1	+1	+1	+1	3,2089	3,0478	**0,9498**	**0,9666**	0,0002834
61	-1	-1	+1	+1	+1	+1	3,3368	3,1297	**0,9379**	**0,9219**	0,0002549
62	+1	-1	+1	+1	+1	+1	2,8879	2,6103	**0,9039**	**0,8765**	0,0007461
63	-1	+1	+1	+1	+1	+1	4,1247	3,9209	**0,9506**	**0,9510**	0,0000002
64	+1	+1	+1	+1	+1	+1	3,2089	2,9331	**0,9141**	**0,9056**	0,0000714

В результате оценки оказалось, что более половины коэффициентов полной модели незначимы. Отсеяние их выполнялось поэтапно, при этом на каждом этапе исключалось по одному коэффициенту. Преследовалась цель добиться адекватного математического описания с высоким качеством приближения к данным наблюдений.

Об адекватности модели, когда отсутствуют повторные наблюдения в каждой точке плана и нет возможности получить оценку дисперсии воспроизводимости эксперимента, обычно судят косвенным образом. При этом анализируется сумма квадратов остатков, остаточная дисперсия $S^2_{ост}$, число коэффициентов в модели, коэффициент детерминации R^2, правдоподобность выводов по модели с точки зрения их физического смысла. Процедура построения модели сводиться к подбору такой регрессионной зависимости, которая обеспечивает достаточно высокую точность, т.е. дает малое $S^2_{ост}$, близкое к единице значение R^2 и при этом содержит минимальное количество коэффициентов.

Окончательный вид модели был принят после исключения 10 незначимых коэффициентов b_7, b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{15}, b_{16}, b_{18}, b_{20}, b_{21}:

$$\hat{Y} = 0{,}8083 - 0{,}0362X_1 + 0{,}0145X_2 - 0{,}0320X_3 + 0{,}0716X_4 + 0{,}0918X_5 - 0{,}0098X_6 - 0{,}0097X_1X_3 + 0{,}0099X_1X_4 + 0{,}0134X_1X_5 + 0{,}0112X_3X_5 - 0{,}0274X_4X_5. \quad (3)$$

В таком виде модель обеспечила: сумму квадратов остатков $S_K = 0{,}01359$; остаточную дисперсию $S^2_{ост} = 0{,}00026$; коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}988$ (для полной модели с 22 коэффициентами эти величины составляли $S_R = 0{,}00148$; $S^2_{ост} = 0{,}0000353$; $R^2 = 0{,}997$). Важным было также то, что полученная на десятом шаге модель во всем факторном пространстве давала величины коэффициента теплотехнической однородности, не превышающие 1, что обеспечивало согласие с его физическим смыслом. В таком виде модель была принята для дальнейшей разработки инженерного метода расчета приведенного сопротивления теплопередаче наружной стены, ослабленной теплопроводным включением в виде элементов крепежного каркаса вентилируемого фасада.

Таблица 3

Справочная таблица для определения коэффициента теплотехнической однородности (*r*) наружной стены вентилируемого фасада

Коэф. теплопровод. крепежного каркаса, Вт/(м·^{0}C)	Несущая часть стены		Глубина заложен. анкера, м	Расстояние между анкерами, м		**Коэф. теплотехн. однородности, *r***
	коэф. теплопровод., Вт/(м·^{0}C)	толщина, м		горизон.	вертик.	
58 (сталь)	0,41 (керамзитобетон, γ_0 = 1000 кг/м^3)	0,300	0,05	0,4	0,5	**0,6948**
					1,0	**0,7608**
					1,5	**0,8269**
				0,8	0,5	**0,7872**
					1,0	**0,8350**
					1,5	**0,8827**
				1,2	0,5	**0,8796**
					1,0	**0,9091**
					1,5	**0,9386**
			0,10	0,4	0,5	**0,6850**
					1,0	**0,7510**
					1,5	**0,8171**
				0,8	0,5	**0,7774**
					1,0	**0,8252**
					1,5	**0,8729**
				1,2	0,5	**0,8698**
					1,0	**0,8993**
					1,5	**0,9288**
		0,400	0,05	0,4	0,5	**0,7059**
					1,0	**0,7720**
					1,5	**0,8380**
				0,8	0,5	**0,7983**
					1,0	**0,8461**
					1,5	**0,8939**
				1,2	0,5	**0,8907**
					1,0	**0,9202**
					1,5	**0,9498**
			0,10	0,4	0,5	**0,6961**
					1,0	**0,7622**
					1,5	**0,8282**
				0,8	0,5	**0,7885**
					1,0	**0,8363**
					1,5	**0,8841**
				1,2	0,5	**0,8809**
					1,0	**0,9104**
					1,5	**0,9400**

Для упрощения определения *r* на основе результатов табулирования полинома (3) разработана справочная таблица, фрагмент которой показан в табл. 3, а также написана программа для ЭВМ «Расчет приведенного сопротивления теплопередаче наружной стены здания, ослабленной теплопроводными включениями в виде крепежного каркаса вентилируемого фасада (R-VENT)» [5].

Литература:

1. СНиП II-3-79* Строительная теплотехника. – ГУП ЦПП Госстроя России. 1998 – 28 с.
2. Езерский В.А., Монастырев П.В. Крепежный каркас вентилируемого фасада и температурное поле наружной стены // Жилищное строительство. - 2003. - №10. – С.15-18.
3. Программный комплекс TEMPER-3D. – [найдено 03.01.2002 в Интернет http://temper99.narod.ru].
4. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / Хартман К., Лецкий Э., Шеффер В. и др. / Под ред. Лецкого Э.К. – М.: Мир, 1977. – 552с.
5. Езерский В.А., Монастырев П.В., Гузачев А.Н. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче наружной стены здания, ослабленной теплопроводными включениями в виде крепежного каркаса вентилируемого фасада (R-VENT). / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2004611234. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20 мая 2004 г.