

УДК 728:697.112.3

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УЗЛА ОПИРАНИЯ ПЕРЕКРЫТИЯ НА НАРУЖНУЮ СТЕНУ ЖИЛОГО ДОМА

В.А. Езерский, П.В. Монастырев, М.В. Монастырева

*Белостокский политехнический институт, Республика Польша;
ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический
университет», г. Тамбов; Администрация г. Тамбова*

Рецензент В.В. Леденев

Ключевые слова и фразы: адекватность модели; кирпичная трехслойная стена; математическая модель; метод случайного баланса; плита перекрытия; стеновой элемент; существенные факторы; температура внутренней поверхности стены.

Аннотация: Произведен теплотехнический анализ узла опирания перекрытия на наружную стену жилого дома путем выявления всех влияющих на температурное поле факторов и выделения существенных из них методом случайного баланса. Построена регрессионная модель зависимости температуры на внутренней поверхности стены от существенных факторов, и произведена оценка ее адекватности.

В последние годы получили распространение кирпичные трехслойные стены, состоящие из несущего, теплоизоляционного и защитно-декоративного слоев.

При проектировании многоэтажных зданий требуется не только обеспечить связь наружного и внутреннего слоев стены, но и разгрузить защитно-декоративный слой, для чего используют горизонтальные железобетонные стеновые элементы, которые проходят насквозь через теплоизоляционный материал, создавая тем самым термические включения (рис. 1). Подобные решения осложняются опирающимися на стеновой элемент плитами перекрытия, которые вносят дополнительную неодно-

Езерский В.А. – доктор технических наук, член-корреспондент МИА, заведующий кафедрой «Основы строительства и строительная физика» Белостокского политехнического института, г. Белосток, Республика Польша; Монастырев П.В. – доктор технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги» ТамбГТУ; Монастырева М.В. – ведущий специалист Администрации г. Тамбова.

целевой функции и принимать оптимальные решения. Этот подход и использован в настоящей работе.

На основе анализа конструктивного решения выбранного узла (см. рис. 1) установлены 12 факторов, которые могут влиять на температурное поле рассматриваемой стены (табл. 1). Выбор значений уровней факторов осуществлялся с учетом возможных вариантов конструктивного решения, для которых при соблюдении условий прочности, долговечности, теплозащиты и т.д. могли быть применены те или иные материалы с конкретными их свойствами и размерами. В соответствие с этим принципом толщина несущей части стены изменялась от 0,25 до 0,38 м в предположении, что она могла быть выполнена из каменной кладки с коэффициентом теплопроводности 0,76 Вт/(м·°С).

Толщина теплоизоляционного слоя принималась от 0,14 до 0,27 м. Предполагалось, что он может быть выполнен из пенополистирола, минераловатных плит или монолитного пенобетона. Коэффициент теплопроводности данных материалов изменяется в пределах от 0,042 до 0,12 Вт/(м·°С).

Таблица 1

Факторы, влияющие на температурное поле наружной стены

Обозначение фактора	Наименование фактора	Натуральные значения факторов $X_{i \min}$ и $X_{i \max}$, соответствующие кодированным значениям	
		$X_i = -1$	$X_i = +1$
<i>Несущий слой стены из силикатного кирпича на цементно-песчаном растворе</i>			
$\delta_{ст} (X_1)$	Толщина, м	0,25	0,38
<i>Теплоизоляционный слой стены</i>			
$\delta_{ут} (X_2)$	Толщина, м	0,14	0,27
$\lambda_{ут} (X_3)$	Коэффициент теплопроводности теплоизоляционного слоя стены, Вт/(м·°С)	0,042	0,12
<i>Стеновой элемент</i>			
$h_{эл} (X_4)$	Высота элемента, м	0,065	0,22
$b_{пер} (X_5)$	Ширина перемычек стенового элемента, м	0,12	0,25
$l_{пер} (X_6)$	Шаг перемычек в стеновом элементе, м	0,40	1,20
$\lambda_{эл} (X_7)$	Коэффициент теплопроводности материала стенового элемента, Вт/(м·°С)	0,76	1,92
$\lambda_{вкл} (X_8)$	Коэффициент теплопроводности вкладыша в стеновой элемент, Вт/(м·°С)	0,042	0,12
<i>Железобетонное перекрытие</i>			
$\delta_{пер} (X_9)$	Толщина плиты перекрытия, м	0,12	0,22
$l_{оп} (X_{10})$	Ширина площадки опирания, м	0,12	0,19
$\delta_{твкл} (X_{11})$	Толщина термовкладыша, м	0,00	0,06
$t_n (X_{12})$	Температура наружного воздуха, °С	-20	-36

Защитно-декоративный слой выполнен из кирпичной кладки на цементно-песчаном растворе толщиной в полкирпича (0,12 м) с коэффициентом теплопроводности 0,76 Вт/(м·°С).

Стеновой элемент может изготавливаться из железобетона (2400 кг/м³) или конструктивного керамзитобетона (1400 кг/м³) с коэффициентами теплопроводности соответственно 1,92 и 0,76 Вт/(м·°С).

В зависимости от материала, шага размещения стенового элемента по высоте стены, толщины теплоизоляционного материала и т.д., такие геометрические параметры, как высота и ширина перемычки, а также шаг перемычек в стеновом элементе, могут изменяться в значительных пределах. Поэтому в расчетах приняты следующие пределы изменения данных параметров: высота стенового элемента – 0,065...0,22 м; ширина перемычки стенового элемента – 0,12...0,25 м; шаг перемычек в стеновом элементе – 0,40...1,20 м. В эти пределы варьирования попадают почти все возможные варианты геометрии стенового элемента.

Пустоты в стеновом элементе могут заделываться пенополистиролом или пенобетоном. Данные материалы имеют коэффициент теплопроводности соответственно 0,042 и 0,12 Вт/(м·°С).

В качестве плит перекрытий используются железобетонные плиты толщиной 0,12...0,22 м, имеющие ширину площадки опирания на стеновой элемент 0,12...0,19 м. Торцевые поверхности плит перекрытия могут быть изолированы термовкладышами толщиной до 0,06 м.

Граничные условия для исследуемого участка стены принимались следующими:

– для внутренней поверхности стены коэффициент теплоотдачи и температура внутреннего воздуха соответственно $\alpha_{в} = 8,7$ Вт/(м²·°С) и $t_{в} = +20$ °С;

– для наружной поверхности стены коэффициент теплоотдачи наружной поверхности стены для зимних условий эксплуатации принят равным $\alpha_{н} = 23$ Вт/(м²·°С), а температура наружного воздуха $t_{н}$ варьировалась от –20 до –36 °С, что позволяло моделировать температурный режим исследуемого узла в различных климатических условиях и ввести в исследование двенадцатый фактор X_{12} ;

– тепловой поток в направлении, перпендикулярном поперечному сечению узла, – $q = 0$ Вт/м².

В качестве отклика принята наиболее характерная температура τ (°С) в месте опирания перекрытия на стеновой элемент (см. рис. 1).

Расчеты выполнялись с использованием компьютерной программы «TEMPER-3D» [1], позволяющей моделировать трехмерные температурные поля методом конечных элементов.

Оценка значимости рассматриваемых факторов выполнялась на основе специальной математической процедуры. В частности, использован метод случайного баланса с планированием вычислительного эксперимента на сверхнасыщенном плане $2^{12} // 26$ [2]. План и результаты вычислений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сверхнасыщенный план $2^{12} // 26$ и результаты вычислений температуры \hat{Y} на внутренней поверхности стен в зависимости от факторов X_1, X_2, \dots, X_{12}

N_r	X_1 ($\delta_{ст}$)	X_2 ($\delta_{вт}$)	X_3 ($\lambda_{вт}$)	X_4 ($h_{эл}$)	X_5 ($b_{пер}$)	X_6 ($l_{пер}$)	X_7 ($\lambda_{эл}$)	X_8 ($\lambda_{вкл}$)	X_9 ($\delta_{пер}$)	X_{10} ($l_{оп}$)	X_{11} ($\delta_{твкл}$)	X_{12} (t_n)	\check{Y}_i	\hat{Y}_i
1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	16,98	17,26
2	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	17,28	17,62
3	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	17,50	17,36
4	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	18,55	18,12
5	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	17,42	17,50
6	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	18,81	18,88
7	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	18,62	18,36
8	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	16,20	16,00
9	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	14,29	14,38
10	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	17,72	18,08
11	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	18,45	18,92
12	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	18,04	17,98
13	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	17,46	17,12
14	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	17,55	17,12
15	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	17,17	17,16
16	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	18,43	18,52
17	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	17,34	17,20
18	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	16,60	16,42
19	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	15,94	16,12
20	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	18,18	18,54
21	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	16,96	17,14
22	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	17,40	17,56
23	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	16,92	16,28
24	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	18,48	18,24
25	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	12,35	12,74
26	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	19,32	19,38

Обработка результатов вычислительного эксперимента включала итерационную процедуру поочередного включения и исключения факторов. Критерием степени влияния факторов и эффектов их взаимодействия являлись величины парного коэффициента корреляции и критерия Стьюдента. Всего рассматривалось и оценивалось 79 эффектов (1 – свободного члена уравнения регрессии, 12 – линейных членов, 66 – парных взаимодействий факторов).

На первом этапе выбирались факторы с максимальным коэффициентом корреляции, и для них строились линейные уравнения регрессии. При этом остатки вычислялись посредством вычитания значений \hat{Y}_i из параметра оптимизации \check{Y}_i . На втором этапе вычислялись парные коэффициенты корреляции между взаимодействиями факторов и остатками предыдущего этапа. При выполнении итераций появляющиеся незначимые по t -критерию факторы заменялись новыми факторами, максимально закодированными с остатками.

Таблица 3

**План вычислений температур \hat{Y}_q и \hat{Y}_q на внутренней поверхности стены для расчета дисперсий неадекватности
в контрольных точках 1...5**

N_r	X_1 ($\delta_{ст}$)	X_2 ($\delta_{ст}$)	X_3 ($\lambda_{ст}$)	X_4 ($h_{ст}$)	X_5 ($b_{пер}$)	X_6 ($l_{пер}$)	X_7 ($\lambda_{ст}$)	X_8 ($\lambda_{векл}$)	X_9 ($\delta_{пер}$)	X_{10} ($l_{от}$)	X_{11} ($\delta_{векл}$)	X_{12} (t_n)	\hat{Y}_q	\hat{Y}_q	S_q^2
1	-0,54 (0,28)	-0,54 (0,17)	-0,5 (0,0615)	-0,54 (0,1)	-0,08 (0,18)	0 (0,8)	0 (1,34)	0 (0,081)	+0,6 (0,20)	+0,43 (0,17)	+0,67 (0,04)	+0,5 (-32)	17,03	17,42	0,1521
2	+0,54 (0,35)	+0,54 (0,24)	+0,5 (0,1005)	+0,48 (0,18)	-0,08 (0,18)	0 (0,8)	0 (1,34)	0 (0,081)	-0,6 (0,14)	-0,43 (0,14)	-0,67 (0,01)	-0,5 (-24)	17,59	17,66	0,0049
3	-0,08 (0,31)	-0,08 (0,2)	0 (0,081)	-0,03 (0,14)	-0,54 (0,15)	+0,5 (1,0)	-0,5 (1,05)	+0,5 (0,1005)	0 (0,17)	-0,14 (0,15)	0 (0,03)	0 (-28)	17,41	17,81	0,1600
4	-0,54 (0,28)	+0,54 (0,24)	-0,5 (0,0615)	+0,48 (0,18)	-0,08 (0,18)	0 (0,8)	0 (1,34)	0 (0,081)	-0,6 (0,14)	+0,43 (0,17)	-0,67 (0,01)	+0,5 (-32)	17,52	17,45	0,0049
5	-0,08 (0,31)	-0,08 (0,2)	0 (0,081)	-0,03 (0,14)	-0,08 (0,18)	0 (0,8)	0 (1,34)	0 (0,081)	0 (0,17)	-0,14 (0,15)	0 (0,03)	0 (-28)	17,18	17,43	0,0625

На каждом этапе вычислялась остаточная дисперсия и проверялась адекватность уравнения регрессии. Эта процедура продолжалась до достижения адекватности модели. Полученная таким образом модель включала 12 эффектов из 79 возможных. При этом пять из рассматриваемых факторов (X_1 – толщина несущего слоя стены; X_6 – шаг перемычек в стеновом элементе; X_9 – толщина плиты перекрытия; X_{10} – ширина площадки опирания плиты перекрытия и X_{11} – толщина термовкладыша) в рассматриваемом диапазоне изменения значений оказались незначимыми и не были включены в окончательный вид модели:

$$\hat{Y} = 17,19 + 0,65X_2 - 0,53X_3 - 0,21X_4 - 0,45X_5 - 0,47X_7 - 0,41X_8 - 0,60X_{12} + 0,10X_2X_7 - 0,37X_3X_{10} + 0,20X_4X_6 - 0,46X_4X_7. \quad (1)$$

Адекватность полинома при решении аппроксимационных задач проверялась для точек факторного пространства, не входящих в план эксперимента. Для проверки адекватности проведены пять дополнительных расчетов в выбранных точках (табл. 3). При этом использовался критерий Кохрена об однородности оценок дисперсий неадекватности [3]:

$$G = \frac{\max[S_q^2]}{\sum_{q=1}^k S_q^2},$$

где $S_q^2 = (\ddot{Y}_q - \hat{Y}_q)^2$ – дисперсия неадекватности для контрольной точки q ; k – число контрольных точек.

Для полученной модели расчетное значение критерия Кохрена оказалось равным $G = 0,4162$ и не превышало критического значения $G_{0,05;1;5} = 0,8412$.

Следовательно, можно принять гипотезу об однородности дисперсий, и тогда оценка генеральной дисперсии неадекватности равна

$$S^2 = \frac{\sum_{q=1}^k S_q^2}{k} = 0,3844 / 5 = 0,0769.$$

Качество аппроксимации данных полученным уравнением можно оценить, сравнив остаточную дисперсию S_0^2 и дисперсию относительно среднего S_y^2 по критерию Фишера F :

$$F = S_y^2 / S_0^2;$$

$$S_0^2 = \sum_{q=1}^N (\ddot{Y}_q - \hat{Y}_q)^2 / (N - l) = 0,1488;$$

$$S_y^2 = \sum_{q=1}^N (\ddot{Y}_q - \bar{Y})^2 / (N - 1) = 2,1120.$$

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f_1 = N - 1 = 26 - 1 = 25$, $f_2 = N - l = 26 - 12 = 14$ оказалось, что расчетное

значение критерия $F = 14,19$ превышает табличное значение $F_{0,05;25;14} = 2,34$, т.е. рассеяние относительно полученного уравнения регрессии почти в 6 раз меньше рассеяния относительно среднего. Это подтверждает эффективность полученного уравнения регрессии и его пригодность для дальнейшей оптимизации конструктивного решения узла.

Список литературы

1. Программный комплекс TEMPER-3D [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [<http://www.temper3d.ru>].
2. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов / Л. Хартман [и др.] / Под ред. Э.К. Лецкого. – М. : Мир, 1987. – 522 с.
3. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования / В.А. Веников, Г.В. Веников. – М. : Высшая школа, 1984. – 439 с.

Thermoanalysis of Slab Support Connection on Exterior Wall of Domestic Building

V.A. Ezersky, P.V. Monastyrev, M.V. Monastyreva

*Belostok Polytechnic Institute, Poland;
Tambov State Technical University, Tambov*

Key words and phrases: adequacy of the model; brick three-layer wall; mathematical model; method of occasional balance; slab; wall element; significant factors; temperature of interior wall surface.

Abstract: Thermoanalysis of slab support connection on exterior wall of domestic building is carried out through identification of all factors influencing temperature field as well as determination of the most significant one by occasional balance technique. Regressive model of interior wall surface temperature dependence on essential factors is built; the adequacy of the model is evaluated.

© В.А. Езерский, П.В. Монастырев, М.В. Монастырева, 2007