

УДК 699.86

В. А. Пашинский, О. А. Плотников

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МЕТОДИКА АНАЛИЗА ТЕПЛОВОЙ НАДЕЖНОСТИ УЗЛОВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

UDC 699.86

V. A. Pashynskiy, O. A. Plotnikov

PROBABILISTIC METHOD FOR ANALYZING THERMAL RELIABILITY OF UNITS OF ENCLOSING STRUCTURES

Аннотация

Разработана методика оценивания показателей тепловой надежности узлов ограждающих конструкций зданий, учитывающая реальную конструкцию узла, тепловые характеристики материалов, а также случайный характер изменений температуры наружного и внутреннего воздуха. Статистические характеристики температуры внутренней поверхности ограждающих конструкций в зонах повышенной теплопроводности определяются исходя из статистических характеристик случайных процессов температуры воздуха и двумерных температурных полей узлов, рассчитанных методом конечных элементов.

Ключевые слова:

узлы стен, тепловая надежность, вероятностная оценка.

Abstract

The methodology was developed to estimate parameters of thermal reliability of units of enclosing structures for buildings, which takes into account the actual design of a unit, thermal characteristics of materials, as well as the random nature of changes in the temperature of outdoor and indoor air. The statistical characteristics of the temperature of internal surfaces of enclosing structures in the areas of increased thermal conductivity are determined based on the statistical characteristics of random processes in air temperature and the two-dimensional temperature fields of units calculated by the finite element method.

Key words:

components of walls, thermal reliability, probabilistic assessment.

Введение

Наиболее опасными с точки зрения тепловой надежности являются зоны повышенной теплопередачи в узлах ограждающих конструкций. Проведенный в [1] анализ узлов стен жилых зданий по методике норм проектирования [2] позволил выявить узлы, в которых может образоваться конденсат в результате падения температуры внутренней поверхности ниже точки росы. Естественная статистическая изменчивость большинства расчетных

факторов побуждает к оценке тепловой надежности ограждающих конструкций вероятностными методами. При этом следует учесть статистические характеристики случайного процесса изменений температуры атмосферного воздуха и тепловые характеристики ограждения.

Основная часть

Разработанный метод вероятностного оценивания уровня тепловой надежности стен жилых и общественных зданий по критерию образования



конденсата базируется на следующих предпосылках:

- температура наружного воздуха τ_n является квазистационарным случайным процессом или последовательностью нормально распределенных случайных величин, соответствующих отдельным месяцам года;

- температура внутреннего воздуха в помещении τ_e является случайной величиной с экспериментально определенными статистическими характеристиками;

- коэффициенты внутренней α_e и внешней (наружной) теплоотдачи α_n считаются детерминированными величинами и устанавливаются по нормам [2];

- температурный режим узлов стен определяется путем построения двумерных тепловых полей с использованием программного обеспечения, которое реализует расчеты методом конечных элементов;

- в качестве показателя тепловой надежности используется продолжительность состояния теплового отказа в течение года, или относительная продолжительность состояния теплового отказа. Этот показатель является физически понятным и наглядно отражает степень комфорта здания.

Отказ по критерию образования конденсата на внутренней поверхности ограждающей конструкции возникает в результате падения температуры внутренней поверхности ограждения τ_C ниже температуры точки росы τ_P . Условие надежности по критерию образования конденсата можно записать в виде предельного неравенства

$$\tau_C - \tau_P \geq 0. \quad (1)$$

С учетом случайного характера обеих температур, математическое ожидание и стандарт резерва тепловой надежности (1)

$$M = M_C - M_P; \quad S = \sqrt{S_C^2 + S_P^2}, \quad (2)$$

где M_C и S_C – математическое ожидание и стандарт случайной величины температуры внутренней поверхности стены; M_P и S_P – математическое ожидание и стандарт температуры точки росы.

Статистические характеристики температуры внутренней поверхности стены вычисляются по формулам, полученным в [3], которые в результате подстановки общего для всех стен значения коэффициента внутренней теплоотдачи $\alpha_e = 8,7$ Вт/(м²·К) принимают вид:

$$M_C = \frac{0,115}{R_0} [M_B (8,7R_0 - 1) + M_H];$$

$$S_C = \frac{0,115}{R_0} \sqrt{S_H^2 + S_B^2 (8,7R_0 - 1)^2}, \quad (3)$$

где R_0 – сопротивление теплопередаче стены; M_B и S_B – математическое ожидание и стандарт температуры внутреннего воздуха в помещении; M_H и S_H – математическое ожидание и стандарт температуры наружного атмосферного воздуха в данном месяце года.

Температура точки росы τ_P может быть определена по психрометрическим таблицам в зависимости от конкретных значений температуры и относительной влажности воздуха. С учетом экспериментальных данных [4] об изменчивости температуры и влажности внутреннего воздуха в жилых помещениях, установлены следующие значения математического ожидания и стандарта случайной температуры точки росы: $M_P = 10,6$ °С; $S_P = 1,7$ °С.

Статистические характеристики (2) позволяют оценить продолжительность состояния теплового отказа как вероятность пребывания случайной величины резерва тепловой надежности (1) ниже нуля. Соответствующая продолжительность состояния теплового отказа в течение одного i -го месяца года (в днях)

$$Q_i = t_i F_i(0), \quad (4)$$



где $F_i(0)$ – функция нормального распределения резерва тепловой надежности с числовыми характеристиками (2) для i -го месяца года; t_i – количество дней в i -м месяце года.

При действии квазистационарного случайного процесса температуры наружного воздуха, заданного последовательностью из 12-ти случайных величин, продолжительность теплового отказа для каждого из месяцев года определяется по формуле (4), а суммарная относительная продолжительность теплового отказа

$$Q = \frac{1}{365} \sum_{i=1}^{12} Q_i. \quad (5)$$

В качестве примера проанализируем относительную продолжительность теплового отказа по критерию образования конденсата на внутренней поверхности кирпичной стены в климатических условиях различных регионов Украины. Стена жилого здания (типовой «хрущевки», построенной во второй половине XX в.) в проектном виде состоит из кирпичной кладки толщиной

510 мм и внутренней штукатурки из известково-песчаного раствора толщиной 20 мм. Утепленная стена термомодернизована путем устройства скрепленной фасадной системы из пенополистирольных плит и отделочно-защитного наружного слоя. Толщина пенополистирола рассчитана в соответствии с требованиями норм [2] для температурной зоны, в которой эксплуатируется здание. Сопротивления теплопередаче проанализированных стен приведены в табл. 1.

Относительные продолжительности состояния теплового отказа по критерию образования конденсата на плоских участках стен определены по вышеизложенной методике. Статистические характеристики температуры наружного воздуха в различных регионах Украины установлены по [5, 6]. Математическое ожидание температуры внутреннего воздуха принято равным нормативному значению по [2] $M_B = 20$ °С, а стандарт $S_B = 0,6$ °С – по результатам экспериментальных исследований [4]. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Табл. 1. Показатели тепловой надежности плоского участка кирпичной стены

Область Украины	В проектном состоянии		В утепленном состоянии	
	$R_0, \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	Q	$R_0, \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	Q
Волынская	0,81	$2,66 \cdot 10^{-04}$	2,71	$1,06 \cdot 10^{-06}$
Кировоградская	0,81	$3,22 \cdot 10^{-04}$	2,71	$1,11 \cdot 10^{-06}$
Сумская	0,81	$5,44 \cdot 10^{-04}$	2,71	$1,43 \cdot 10^{-06}$
Закарпатская	0,81	$1,92 \cdot 10^{-04}$	2,44	$9,40 \cdot 10^{-07}$
Херсонская	0,81	$1,57 \cdot 10^{-04}$	2,44	$8,50 \cdot 10^{-07}$

Из таблицы видно, что относительная продолжительность теплового отказа неутепленных стен достаточно сильно возрастает с юга к северу Украины. Абсолютные значения, полученные умножением (5) на продолжительность года в часах, изменяются в пределах от 1,4 ч в Херсонской области до 4,8 ч в Сумской

области. Следовательно, образование конденсата на внутренней поверхности неутепленной стены – не частое, но вполне возможное явление.

Относительные продолжительности теплового отказа утепленных стен получены на два порядка меньше и не так резко меняются по территории бла-



годаря различным значениям сопротивления теплопередаче для различных температурных зон Украины. Продолжительность состояния теплового отказа в пределах от 27 до 45 с в год указывает на практическую невозможность образования конденсата на внутренних поверхностях стен, прошедших термомодернизацию согласно требованиям норм [2].

Гораздо большей может быть опасность возникновения тепловых отказов по критерию образования конденсата в узлах стен с зонами повышенной теплопередачи (мостиками холода), где температуры внутренней поверхности ограждения могут быть значительно ниже, чем на плоских участках стены. Такие зоны могут быть достаточно малыми, поэтому их можно выявить только путем построения и анализа двумерных тепловых полей. Эта задача решается в среде разработанного в лаборатории Лоуренса Беркли Калифорнийского университета США программного комплекса THERM, реализующего метод конечных элементов. Для расчета нужно задать конструкцию узла, тепловые характеристики материалов, детерминированные значения температуры наружного и внутреннего воздуха, а также условия теплообмена между конструкцией и средой в виде коэффициентов теплоотдачи. Результаты расчета могут быть представлены в виде изотерм и локальных температур в отдельных точках конструкции, которые и необходимо определить для выполнения дальнейших расчетов.

Наличие температур наружного t_H и внутреннего t_B воздуха, а также соответствующей им температуры в критической точке узла позволяет определить условное значение сопротивления теплопередачи R_{ef} , которое соответствует конкретной точке внутренней поверхности в конкретном узле стены:

$$R_{ef} = \frac{\tau_B - \tau_H}{\alpha_B (\tau_B - \tau_C)}, \quad (6)$$

где α_B – коэффициент внутренней теплоотдачи, $\alpha_B = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Формула (6) получена из известного уравнения строительной теплотехники, которое описывает изменения температуры по толщине стены.

Статистические характеристики температуры поверхности в критической зоне узла с пониженной температурой вычисляются по формулам (3), в которые вместо сопротивления теплопередачи плоского участка стены R_0 следует подставить условное сопротивление теплопередачи R_{ef} (6). Далее по формуле (4) определяются длительности состояния теплового отказа в течение каждого из месяцев года и относительная продолжительность теплового отказа по критерию образования конденсата в критической точке выбранного узла (5).

Результаты расчетов для изображенного на рис. 1 узла примыкания боковой грани деревянного окна к кирпичной стене приведены в табл. 2. Критической точкой узла является внутренний откос в месте примыкания оконной коробки (точка I), где реализуется самая низкая локальная температура внутренней поверхности. Расчеты выполнены для стены в проектном состоянии и термомодернизированной стены с фасадным утеплением согласно нормам [2]. Толщина утеплителя равна 70 мм – для первой температурной зоны и 60 мм – для второй.

Полученные результаты указывают на явно недостаточный уровень тепловой надежности узла в проектном состоянии, для которого возможная продолжительность состояния теплового отказа меняется от 2,9 до 8,9 сут в год. Настолько большая продолжительность состояния теплового отказа обусловлена низким значением условного сопротивления теплопередачи в зоне теплопроводного включения $R_{ef} = 0,47 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ по сравнению с сопротивлением теплопередачи плоского участка стены $R_0 = 0,81 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.



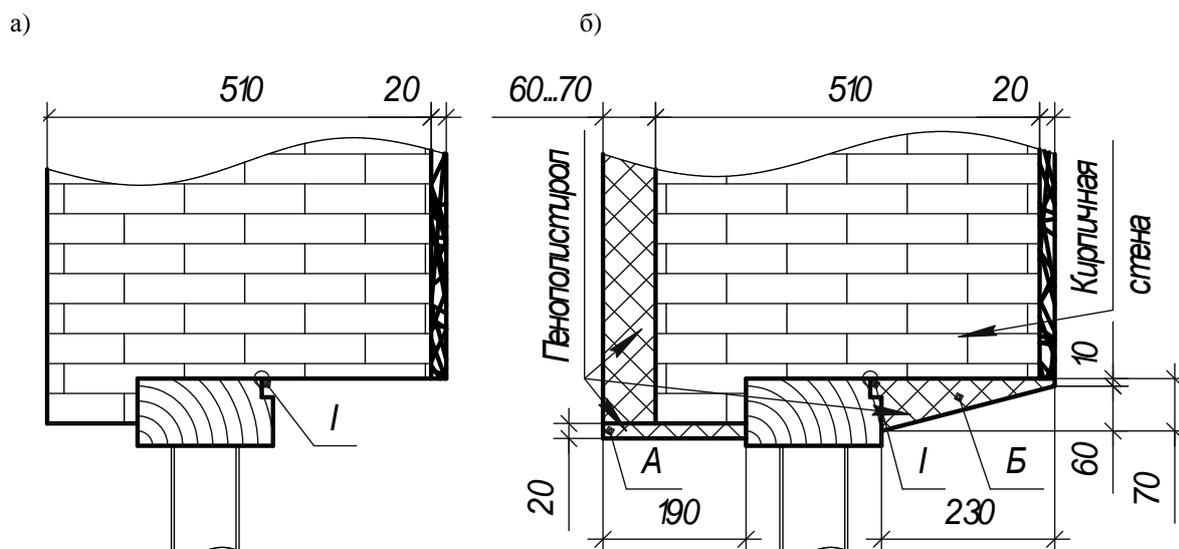


Рис. 1. Конструкция примыкания боковой грани окна к кирпичной стене: а – без утепления в проектном состоянии; б – с дополнительным локальным утеплением (размеры приведены в сантиметрах)

Табл. 2. Показатели тепловой надежности узла примыкания боковой грани окна к кирпичной стене

Область Украины	В проектном состоянии		В утепленном состоянии	
	R_{ef} , м ² ·К/Вт	Q	R_{ef} , м ² ·К/Вт	Q
Волынская	0,47	$1,33 \cdot 10^{-02}$	0,71	$6,82 \cdot 10^{-04}$
Кировоградская	0,47	$1,56 \cdot 10^{-02}$	0,71	$8,29 \cdot 10^{-04}$
Сумская	0,47	$2,43 \cdot 10^{-02}$	0,71	$1,41 \cdot 10^{-03}$
Закарпатская	0,47	$9,52 \cdot 10^{-03}$	0,67	$7,41 \cdot 10^{-04}$
Херсонская	0,47	$8,02 \cdot 10^{-03}$	0,67	$6,01 \cdot 10^{-04}$

Фасадное утепление стены существенно повышает уровень тепловой надежности узла, но продолжительность состояния теплового отказа в пределах от 5,3 до 12,4 ч в год также является слишком большой и может привести к образованию конденсата в месте примыкания оконной коробки к стене.

Повышение уровня тепловой надежности рассматриваемого узла возможно путем дополнительного локального утепления согласно схеме из рис. 1, которая предусматривает три варианта:

- 1) утепление наружного откоса деталью А;
- 2) утепление внутреннего откоса

деталью Б;

- 3) утепление обоих откосов деталями А и Б.

Результаты оценки относительной продолжительности теплового отказа узла с дополнительным локальным утеплением по трем указанным вариантам приведены в табл. 3.

Из таблицы видно, что варианты А и Б обеспечивают практически одинаковый уровень тепловой надежности, при котором продолжительность состояния теплового отказа изменяется в пределах от 1,4 до 4,2 ч в год. Следовательно, дополнительное локальное утепление по варианту А или Б уменьшает продолжительность состояния теплово-



го отказа, по сравнению с равномерным фасадным утеплением стены, примерно

втрое, что делает образование конденсата маловероятным.

Табл. 3. Показатели тепловой надежности узла примыкания боковой грани окна к кирпичной стене с дополнительным локальным утеплением

Область Украины	Вариант А		Вариант Б		Вариант АБ	
	R_{ef} , м ² ·К/Вт	Q	R_{ef} , м ² ·К/Вт	Q	R_{ef} , м ² ·К/Вт	Q
Волынская	0,82	$2,36 \cdot 10^{-04}$	0,86	$1,61 \cdot 10^{-04}$	1,56	$4,66 \cdot 10^{-06}$
Кировоградская	0,82	$2,85 \cdot 10^{-04}$	0,86	$1,94 \cdot 10^{-04}$	1,56	$5,17 \cdot 10^{-06}$
Сумская	0,82	$4,82 \cdot 10^{-04}$	0,86	$3,26 \cdot 10^{-04}$	1,56	$7,40 \cdot 10^{-06}$
Закарпатская	0,80	$1,94 \cdot 10^{-04}$	0,80	$1,94 \cdot 10^{-04}$	1,49	$4,34 \cdot 10^{-06}$
Херсонская	0,80	$1,59 \cdot 10^{-04}$	0,80	$1,59 \cdot 10^{-04}$	1,49	$3,81 \cdot 10^{-06}$

Утепление по варианту АБ, которое заключается в установке полос из пенополистирола на внешний и внутренний откосы, кардинально повышает уровень тепловой надежности узла. Продолжительность состояния теплового отказа в пределах от 2,0 до 3,9 мин в год является достаточно низкой и позволяет утверждать, что в критической зоне узла образование конденсата возможно не чаще одного раза в течение года или вообще не будет происходить.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Разработанная вероятностная методика позволяет оценивать продолжительность состояния теплового отказа по критерию образования конденсата на плоском участке стены или в зонах повышенной теплопередачи узлов, а также выполнять сравнительную оценку уровня тепловой надежности различных ограждающих конструкций в

заданных климатических условиях эксплуатации.

2. Плоские участки стен типовых жилых зданий XX в. имеют недостаточный уровень тепловой надежности, но их термомодернизация в соответствии с требованиями действующих норм проектирования обеспечивает снижение продолжительности состояния теплового отказа практически до нулевого уровня.

3. Приведенные примеры указывают на недостаточный уровень тепловой надежности узлов по критерию образования конденсата в критических зонах повышенной теплопередачи как в проектном состоянии, так и после равномерного фасадного утепления.

4. Достаточный уровень тепловой надежности может быть обеспечен путем дополнительного локального утепления зон повышенной теплопередачи узлов стен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашинський, В. А. Підвищення енергоефективності існуючих житлових будівель шляхом додаткового фасадного утеплення / В. А. Пашинський, В. А. Настоящий, О. А. Плотніков // Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне, 2014. – Вип. 29. – С. 461–467.
2. ДБН В.2.6-31:2006. Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель. Зі зміною № 1 від 1 липня 2013 р. – Киев : Укрархбудінфо, 2013. – 66 с.



3. **Пашинський, В. А.** Методика імовірнісного оцінювання температурного режиму стін / В. А. Пашинський, О. А. Плотніков // Зб. наук. пр. Української Державної академії залізничного транспорту. – Харків, 2014. – Вип. 148, ч. 2. – С. 138–143.

4. **Пашинський, В. А.** Експериментальні дослідження теплового режиму стін житлових будинків / В. А. Пашинський, О. А. Плотніков // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне, 2013. – Вип. 27. – С. 360–366.

5. **ДСТУ-Н Б В.1.1–27:2010.** Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 131 с.

6. **Пашинський, В. А.** Температурні впливи на огорожувальні конструкції будівель / В. А. Пашинський, Н. В. Пушкар, А. М. Карюк. – Одеса : ОДАБА, 2012. – 180 с.

Статья сдана в редакцию 3 апреля 2017 года

Виктор Антонович Пашинский, д-р техн. наук, проф., Кировоградский национальный технический университет. E-mail: pva.kntu@gmail.com.

Олег Анатольевич Плотников, ассистент, Кировоградский национальный технический университет. E-mail: Plotnikov-75@mail.ru.

Victor Antonovich Pashynskiy, DSc (Engineering), Prof., Kirovograd National Technical University. E-mail: pva.kntu@gmail.com.

Oleh Anatolyevich Plotnikov, assistant lecturer, Kirovograd National Technical University. E-mail: Plotnikov-75@mail.ru.