

Басок Б.І., чл.-кор. НАН України, докт. техн. наук, проф.
Давиденко Б.В., докт. техн. наук, с.н.с.,
Новіков В.Г., канд. техн. наук, **Гончарук С.М.**, канд. техн. наук
 Інститут технічної теплофізики НАН України, Україна

ВПЛИВ ЗОВНІШНЬОГО ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ НА ТЕРМОМЕХАНІЧНІ НАПРУЖЕННЯ В ОГОРОДЖУВАЛЬНІЙ КОНСТРУКЦІЇ БУДІВЛІ

Будівельні конструкції в процесі експлуатації зазнають деформацій, наслідком яких є виникнення механічних напружень. Деформації стін та перекриттів відбуваються як під впливом власної ваги, так і внаслідок нерівномірного розподілу температури по її об'єму [1]. Температурні деформації та напруження призводять до пошкодження поверхонь огорож, які можуть бути причиною виникнення тріщин. Тріщини в огорожах не тільки погіршують зовнішній вигляд будівлі, але й знижують її конструктивну надійність. Дієвим засобом зменшення температурних деформацій стінових конструкцій і продовження терміну експлуатації будівлі є ефективна теплоізоляція, яка зменшує значення градієнтів температури всередині несучих стін.

Для з'ясування питання щодо впливу зовнішнього теплоізоляційного шару на температурні напруження в стінових конструкціях розглядається розподіл температури по об'єму зовнішньої стіни приміщення з одним вікном та одним нагрівальним пристроєм (панельним радіатором). Елемент стінової конструкції (бетонна панель), що жорстко закріплена торцями з сусідніми панелями, має висоту $H=3$ м та ширину $B=3$ м. Товщина стіни $\delta_{ст}=0,25$ м. Панель має віконний проріз висотою 1,5 м та шириною 1,8 м. Радіатор розташований під вікном з правої сторони від його середини.

Для визначення температурного поля зазначеної бетонної панелі розв'язується рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$$

з граничними умовами:

$z=0$ (внутрішня поверхня стіни за винятком ділянки біля радіатора):

$$k_6 \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_b (T - T_b)$$

$z=0$ (внутрішня поверхня стіни на ділянці біля радіатора):

$$k_6 \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_b (T - T_b) + c_0 \varepsilon_{\text{в}} \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_b}{100} \right)^4 \right]$$

$z = \delta_{ст}$ (зовнішня поверхня стіни):

$$-k_6 \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_3 (T - T_3),$$

де T, K – температура; x, y, z, m – прямокутні координати; $\alpha_b, \alpha_3, \text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ – коефіцієнти тепловіддачі на внутрішній та зовнішній поверхнях стіни відповідно; $k_6, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки; $\varepsilon_{\text{в}}$ – приведений коефіцієнт чорноти поверхонь стіни та радіатора.

На торцевих поверхнях бетонної панелі, а також на поверхнях віконного прорізу, приймаються умови теплоізоляції.

Результати розрахунку температурного поля бетонної панелі для випадку $t_b=20\text{ }^\circ\text{C}$; $t_s=-10\text{ }^\circ\text{C}$; $t_0=60\text{ }^\circ\text{C}$ наведені на рис. 1. Для розрахунків приймалися значення $k_6=1,0\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\alpha_b=8,6\text{ Вт/(м}^2\text{К)}$; $\alpha_s=23\text{ Вт/(м}^2\text{К)}$. На рис. 1а представлено розподіл температури по внутрішній поверхні стіни ($z=0$), а на рис. 1б - по зовнішній поверхні стіни ($z=\delta_{\text{ст}}=0,25\text{ м}$). Як видно з рисунків, найвища температура внутрішньої поверхні стіни спостерігається в області, біля якої розташовується радіатор. Максимальна температура в цій області становить $+27\text{ }^\circ\text{C}$. За межами цієї зарядаторної ділянки температура різко спадає і становить $\sim+11,5\text{ }^\circ\text{C}$. На зовнішній поверхні стіни максимальна температура в області зарядаторної ділянки складає $\sim-4\text{ }^\circ\text{C}$, а на іншій частині зовнішньої поверхні $\sim-5\text{...}-6\text{ }^\circ\text{C}$.

В умовах суттєвої неоднорідності температурного поля, в стіні утворюються значні позитивні та негативні температурні напруження. Позитивні напруження призводять до розтягування матеріалу бетонної панелі і сприяють виникненню тріщин. Для оцінки рівнів позитивних та негативних механічних напружень вирішується задача термонапруженого стану стіни, яка полягає у розв'язанні системи рівнянь

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] = \frac{\partial}{\partial x} [\beta_T (3\lambda + 2\mu)(T - T_0)];$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] = \frac{\partial}{\partial y} [\beta_T (3\lambda + 2\mu)(T - T_0)];$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right] = \frac{\partial}{\partial z} [\beta_T (3\lambda + 2\mu)(T - T_0)];$$

де u, v, w, m - переміщення в напрямках осей OX, OY та OZ відповідно; $\beta_T, 1/\text{К}$ - коефіцієнт лінійного теплового розширення; $\mu; \lambda, \text{Па}$ - коефіцієнти Ламе; T_0 - температура, при якій стіна знаходиться в недеформованому стані.

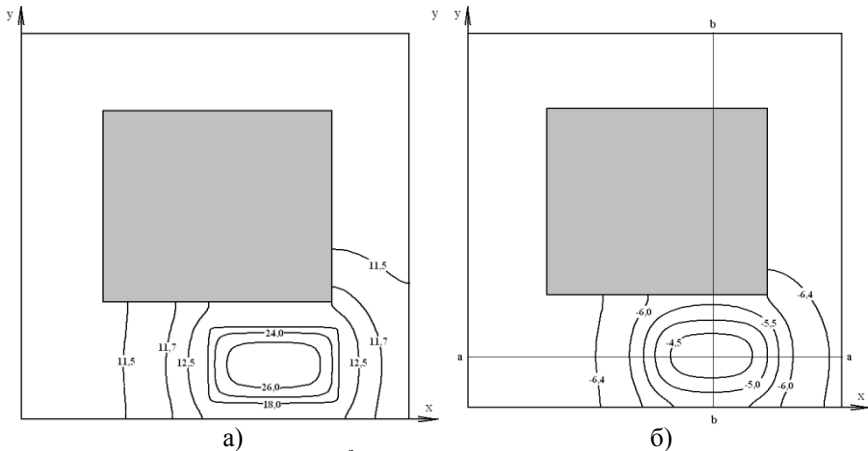


Рис. 1 Розподіл температури ($^\circ\text{C}$) по внутрішній (а) та по зовнішній (б) поверхнях стіни

Наведена система рівнянь розв'язується за умов, що на торцевих поверхнях бетонної панелі всі переміщення вважаються нульовими, тобто торці вважаються закріпленими. На вільних поверхнях $z=0$ та $z=\delta_{ст}$ нормальні σ_z , а також дотикові τ_{zx} ; τ_{zy} напруження дорівнюють нулю. На лівій та правій поверхнях віконного прорізу нульові значення приймають нормальні напруження σ_x , а на його верхній та нижній поверхнях нульові значення мають нормальні напруження σ_y .

З розв'язання даної системи визначаються переміщення u , v , w , а за їх значеннями – термічні напруження. Нормальні і дотикові напруження розраховуються за формулами:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \beta_T (3\lambda + 2\mu)(T - T_0); \\ \sigma_{yy} &= \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \beta_T (3\lambda + 2\mu)(T - T_0); \\ \sigma_{zz} &= \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} - \beta_T (3\lambda + 2\mu)(T - T_0); \\ \tau_{xy} &= \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right); \quad \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right); \quad \tau_{yz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right).\end{aligned}$$

Розподіли нормальних σ_x та σ_y напружень вздовж ліній а-а та б-б (рис. 1б) по зовнішній та внутрішній поверхнях стіни за умов, що температура, при якій температурні деформації відсутні дорівнює $t_0=15^\circ\text{C}$, наведено на рис. 2. Лінія а-а паралельна осі OX і проходить через середину зарядаторної ділянки. Лінія б-б паралельна осі OY і також проходить через середину зарядаторної ділянки. Як видно з рис. 2а, нормальні σ_x та σ_y напруження на внутрішній поверхні стіни вздовж лінії а-а суттєво знижуються в межах зарядаторної ділянки (до $-3,5$ МПа). На інших ділянках внутрішньої поверхні вони змінюються в межах $-1,0 \dots +2,0$ МПа. На зовнішній поверхні зазначені нормальні напруження – позитивні і змінюються в межах $+6,0 \dots +8,0$ МПа. Такі достатньо високі значення позитивних (розтягуючих) напружень можуть наближаються до межі міцності матеріалу стіни.

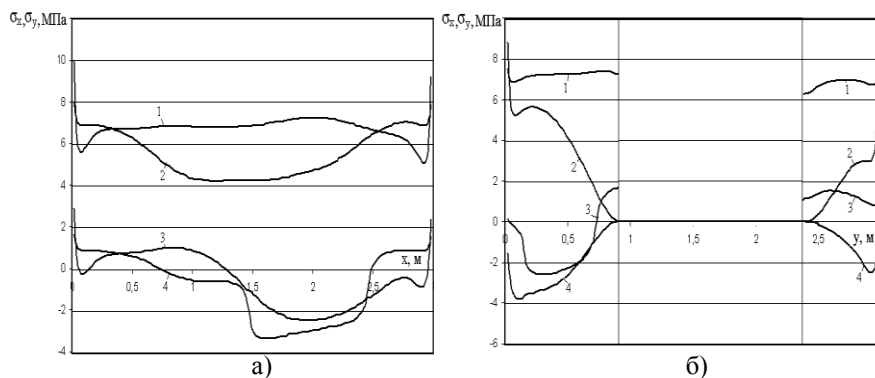


Рис. 2. Розподіли нормальних σ_x та σ_y напругень на внутрішній та зовнішній поверхнях стіни вздовж ліній a-a (а) та b-b (б): 1 – σ_x на зовнішній поверхні; 2 – σ_y на зовнішній поверхні; 3 – σ_x на внутрішній поверхні; 4 – σ_y на внутрішній поверхні.

Вздовж лінії b-b (рис. 2б) характер розподілу нормальних напругень у цілому аналогічний. Їх абсолютні значення також виявляються подібними. Лише біля нижньої та верхньої границь віконного порізу напругення σ_y спадають до нуля як на зовнішній, так і на внутрішній поверхнях стіни, що є умовою для розв'язання даної задачі на вільних торцевих поверхнях віконного прорізу.

Інша картина розподілу температури та термічних напругень буде спостерігатися при наявності утеплювача на зовнішній поверхні огорожувальної конструкції будинку. Розглянемо випадок наявності на зовнішній поверхні бетонної стіни теплоізоляційного шару з мінеральної вати, що має коефіцієнт теплопровідності $k_i=0,041$ Вт/(м·К). Товщина шару складає $\delta_i=10$ см. Зовнішні та внутрішні температурні умови такі ж самі, як у випадку, що розглядався вище. Для розв'язання задачі теплопровідності в даному випадку застосовуються умови

$$z = \delta_{ст} \text{ (зовнішня поверхня стіни):}$$

$$-k_6 \frac{\partial T}{\partial z} = -k_i \frac{\partial T}{\partial z},$$

$$z = \delta_{ст} + \delta_i \text{ (зовнішня поверхня теплоізоляційного шару):}$$

$$-k_i \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_3 (T - T_3)$$

Розподіл температури по зовнішній і внутрішній поверхнях бетонної стіни для випадку наявності теплоізоляційного шару на її зовнішній поверхні відображено на рис. 3.

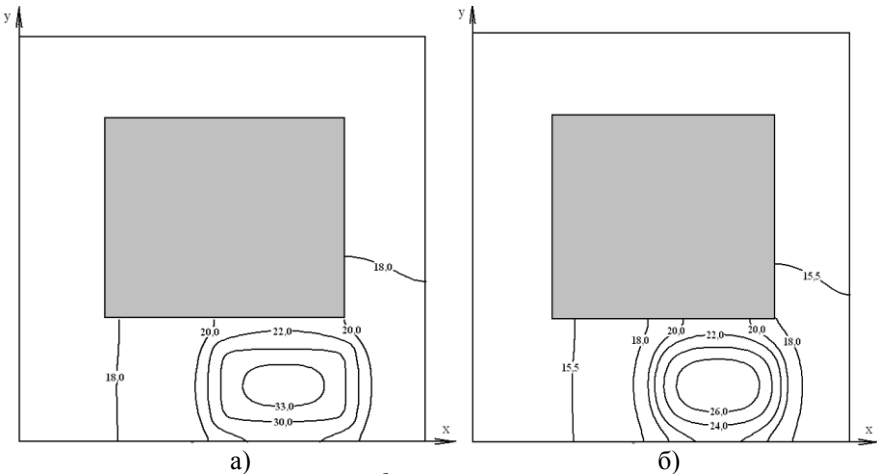


Рис. 3 Розподіл температури (°C) по внутрішній (а) та по зовнішній (б) поверхнях стіни за умов наявності теплоізоляційного шару

Як видно з рисунків, найвища температура внутрішньої поверхні стіни спостерігається в області зарядаторної ділянки. Максимальна температура в цій області за умов наявності утеплювача на зовнішній поверхні становить 34°C . За межами цієї ділянки температура знижується до $+18^{\circ}\text{C}$ (рис. 3а). На зовнішній поверхні стіни (перед утеплювачем) максимальна температура в області зарядаторної ділянки лишається порівняно високою $+22...+26^{\circ}\text{C}$, а на іншій частині зовнішньої поверхні вона складає $+15...+18^{\circ}\text{C}$ (рис. 3б). Найбільш суттєво температура спадає в області утеплювача. На його зовнішній поверхні вона становить $-8...-7^{\circ}\text{C}$. Умови, в яких знаходиться сама бетонна стіна при наявності на її зовнішній поверхні утеплювача, характеризуються більш високими значеннями температури і більш рівномірним її розподілом по об'єму стінової конструкції в порівнянні з випадком, коли утеплювач відсутній. Суттєво зменшуються при цьому густини теплових потоків, що надходять до внутрішньої поверхні стіни від внутрішнього повітря та від радіатора. Розподіл густини теплового потоку по внутрішній та зовнішній поверхнях стіни вздовж лінії а-а за умов відсутності теплоізоляції та за умов її наявності, наведено на рис. 4.

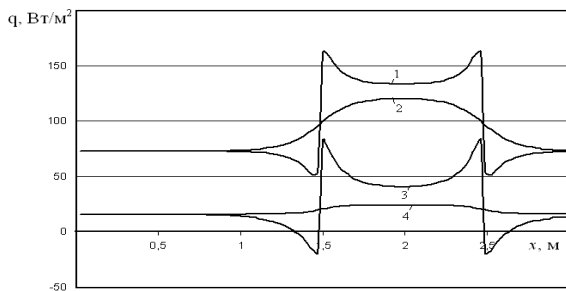


Рис. 4. Розподіли густини теплового потоку по внутрішній (1) та зовнішній (2) поверхнях стіни без теплоізоляції, та по внутрішній (3) і зовнішній (4) поверхнях стіни з теплоізоляцією

В умовах, коли температура стіни підвищується і стає на більшості її ділянок вищою за $t_0=15^{\circ}\text{C}$, при якій температурні деформації відсутні, а також в умовах більш рівномірного розподілу температури по об'єму, помітно змінюється її термонапружений стан. Нормальні σ_x та σ_y напруження на зовнішній та внутрішній поверхнях стіни зменшуються і на ряді ділянок змінюються з позитивних на негативні. Їх розподіли вздовж ліній а-а та б-б по внутрішній і зовнішній поверхнях стіни відображено на рис. 5.

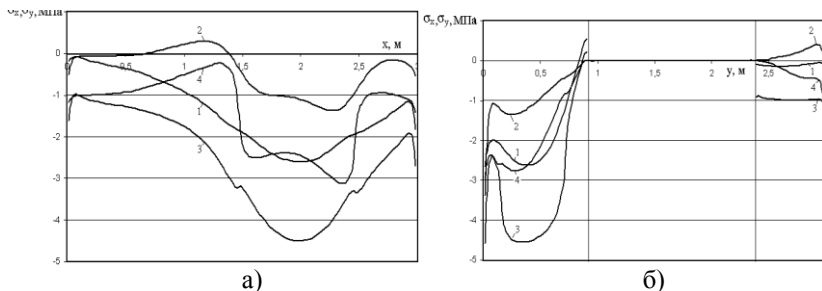


Рис. 5. Розподіли нормальних σ_x та σ_y напружень на внутрішній та зовнішній поверхнях стіни з утеплювачем вздовж ліній a-a (а) та b-b (б): 1 – σ_x на зовнішній поверхні; 2 – σ_y на зовнішній поверхні; 3 – σ_x на внутрішній поверхні; 4 – σ_y на внутрішній поверхні.

Як видно з рисунків, значення цих напружень відносно випадку, коли теплоізоляція була відсутня, знижуються і стають, головним чином, негативними (тобто стягуючими) як на внутрішній, так і на зовнішній поверхнях.

Висновок. З наведених результатів випливає, що наявність теплоізоляційного покриття на зовнішній поверхні стіни не тільки підвищує температурний рівень стіни та зменшує величини теплових потоків, але і знижує значення позитивних нормальних σ_x та σ_y напружень на її поверхнях. Це сприяє зниженню вірогідності виникнення тріщин на зовнішній поверхні стіни при її охолодженні в зимовий період та подовженню ресурсу експлуатації будівлі.

Список використаних джерел

1. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия. - М.: Стройиздат, 1966.-444 с.