

Розрахунок температурних процесів, що відбуваються в захисній оболонці АЕС при авіакатастрофі

Розглядається задача про поведінку захисної оболонки ядерного реактора після інтенсивного температурного впливу, що реалізується з причини падіння літака. Актуальність задачі полягає у вирішенні проблеми мінімізації руйнівних наслідків випадкової авіакатастрофи або терористичних актів. Розроблені підходи дають змогу моделювати наслідки інших впливів: вибухових і динамічних навантажень, промислових аварій тощо. Числові розв'язання подібних задач дозволяють отримувати кількісні оцінки теплостійкості бар'єрів безпеки ядерного реактора.

С. І. Азаров, Г. А. Сорокін

Расчеты температурных процессов, происходящих в защитной оболочке АЭС при авиакатастрофе

Рассматривается задача о поведении защитной оболочки ядерного реактора после интенсивного температурного влияния, которое реализуется вследствие падения самолета. Актуальность задачи заключается в решении проблемы минимизации разрушительных последствий случайной авиакатастрофы или террористических актов. Разработанные подходы позволяют моделировать последствия других воздействий: взрывных и динамических нагрузок, промышленных аварий и т. п. Численные решения подобных задач дают количественные оценки теплостойкости барьеров безопасности ядерного реактора.

Дослідження техногенних аварій (вибухів та пожеж) на АЕС показує, що будівельні конструкції, розраховані без урахування вибухо- та вогнестійкості, в умовах важкої аварії можуть дуже швидко втратити несучу здатність. Загальну стійкість головного корпусу АЕС звичайно визначає цілісність захисної оболонки (ЗО), оскільки вона є основним несучим елементом. Тому збереження несучої здатності ЗО протягом необхідного часу є дуже важливим.

Відповідно до ДСТУ 2272-93 [1], *вогнестійкістю* будівельних конструкцій і елементів називається властивість зберігати несучу здатність, чинити опір утворенню крізьних отворів і прогріванню до критичних температур, а також перешкоджати розповсюдженню вогню.

Границя теплостійкості — інтервал часу від початку вогняного випробування зразків до виникнення одного з граничних станів елементів і конструкцій за вогнестійкістю: втрата несучої здатності; втрата теплоізолювальної здатності; втрата цілісності.

Розрахунок границі теплостійкості складається з двох частин: теплофізичної і статичної. Теплофізичний розрахунок проводять для визначення температурного поля в перерізах конструкції. За ознакою втрати теплоізолювальної здатності границю вогнестійкості конструкції визначають тільки теплофізичним розрахунком. Статичним розрахунком визначають несучу здатність нагрітої конструкції за допомогою рівнянь рівноваги і деформацій з використанням даних про зміну фізико-механічних характеристик будівельних матеріалів при високих температурах.

Аналізу несучої здатності бетонних і сталобетонних будівельних конструкцій цивільних будівель при силових і температурних впливах, визначенню фізико-механічних характеристик бетону в умовах складного напруженого стану присвячено низку робіт [2–4]. Однак складність і відповідальність конструкції будівлі ядерного реактора та його захисної оболонки накладає найвищі вимоги на математичні моделі та програмне забезпечення для числового моделювання руйнування або ушкодження будівельних конструкцій при зовнішніх динамічних термосилових навантаженнях. Згідно із сучасними вимогами до забезпечення безпеки АЕС [5], необхідно виключити будь-яку можливість розвитку запроектої аварії.

Призначення найвідповідальнішої будівельної конструкції атомної станції — захисної оболонки будівлі реактора — не допустити виходу радіоактивності у зовнішнє середовище в разі максимальної проектої аварії, обмежити викиди у разі запроектованих аварій, а також захистити обладнання та внутрішні конструкції будівлі реактора від можливих зовнішніх впливів. Як будівельна конструкція оболонка відноситься до першої категорії за безпекою та до першої категорії за сейсмостійкістю, як механічна система — до локалізуючої системи безпеки другої категорії та служить для запобігання або обмеження виділення радіоактивних речовин або випромінювань в оточуюче середовище [6].

Аналізуючи процеси пізнього навантаження контайменту при авіакатастрофі, особливу увагу слід приділити дослідженню поведінки ЗО, оскільки можливі сценарії розвитку аварій припускають значні перевищення динамічних і теплових впливів над проектними. Необхідно визначити значення надлишкового тиску та температур, за котрих виникають такі ушкодження ЗО, що впливають на її герметичність та міцність:

тріщини на зовнішній поверхні оболонки та крізьні тріщини в оболонці;
пластичні деформації у зовнішніх шарах арматури.

Тому мета дослідження даної статті — отримання залежності ймовірності руйнування захисної оболонки при зовнішньому температурному впливі в разі падіння повітряного судна на будівлю ядерного реактора.

Постановка задачі

Захисні оболонки споруджуються з попередньо напруженого бетону і являють собою замкнутий геометричний об'єм, який складається з вертикального циліндра, купольної частини і стилобата. Купольна й циліндрична частини сполучаються через опорне кільце. Циліндрична частина при сполученні з верхньою плитою стилобата має потовщення, яке називають вугтом.

Попереднє напруження ЗО забезпечується системою гелікоїдального армування циліндричної частини і ортогонально-петльового купольної частини. За напружувану арматуру використовують сталеві канати, які складаються з 450–456 паралельних високоміцних дротів діаметром 5 мм. Канати розташовують у поліетиленових трубах усередині залізобетонних конструкцій ЗО. Загалом кількість канатів в циліндричній частині дорівнює 96, а в купольній — 36. Канати натягують потужними домкратами, після чого фіксують спеціальними анкерними пристроями.

Система попереднього напруження призначена для обтиснення ЗО з метою забезпечення її тріщиностійкості при аварійних навантаженнях. Крім напруження канатів, конструкція оболонки передбачає армування внутрішньої і зовнішньої поверхонь ЗО в меридіональному і кільцевому напрямках арматурою періодичного профілю класу А-III діаметром 20–40 мм. Бетонування здійснюється із застосуванням бетону класу В30. Для забезпечення герметичності внутрішній об'єм оболонки облицьовують листовою сталлю марки ВстЗсп5 завтовшки 8 мм (рис. 1).

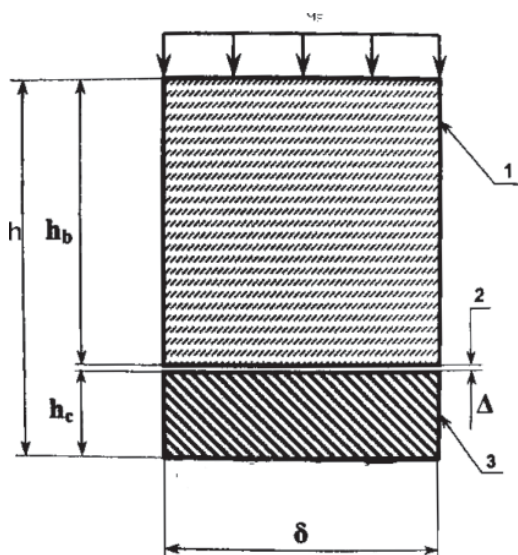


Рис. 1. Поперечний переріз ЗО:

1 — бетон; 2 — повітряний прошарок; 3 — сталевий лист

У загальному випадку геометричні розміри ЗО такі: висота — 53 м; діаметр циліндричної частини — 46 м; товщина стінки циліндричної частини — 1,2 м; радіус купольної частини — 35 м; товщина стінки купольної частини — 1,1 м.

У процесі проектування ЗО розраховується на сприйняття найнесприятливішої комбінації навантажень на випадок аварії.

У проекті ЗО враховано такі екстремальні впливи [7]:

максимальний розрахунковий землетрус потужністю 8 балів за шкалою МСК-64, спектр відгуку на ґрунті за нормами RG 1,60;

удар летючого тіла масою 200 кг зі швидкістю 50 м/с;

навантаження від торнадо класу F3 за шкалою Фуджити, яке включає максимальний вітровий тиск, максимальне падіння атмосферного тиску та удари летючих тіл, які несе вихор (автомобіль масою 1800 кг, снаряд 125 кг);

навантаження від повітряної ударної хвилі з тиском на фронті 10 кПа та тривалістю фази стискання 1 с (це навантаження відповідає можливим джерелам вибухової небезпеки всередині площадки АЕС);

екстремальні вітрові і снігові навантаження, а також екстремальні температури;

механічний удар без ушкодження при падінні повітряного судна масою до 10 т зі швидкістю 150 м/с.

До проведення випробувань різноманітні комбінації навантажень моделюються за допомогою розрахункових програм (таких як SCAD та ANSYS) з метою подальшого порівняння з результатами натурних досліджень.

Аналіз методів розрахунку границь теплостійкості залізобетонних перекриттів промислових будівель, що використовуються в нашій країні та за кордоном, показав [8] існування кількох підходів, заснованих на втраті або теплоізоляційної властивості, або цілісності, або несучої здатності.

Розв'язуючи задачу прогріву сталобетонної конструкції, враховують зміну теплофізичних властивостей бетону і арматури при нагріві шляхом скінченнорізницевого розрахунку з використанням ЕОМ.

Під час аналізу випадкового падіння літака на будівлю АЕС для визначення ураження будівельних конструкцій звичайно розглядають механічний (ударний) вплив без урахування сукупних фізичних явищ, таких як вибух та горіння авіаційного палива (АП).

Моделюючи фізичні процеси виникнення й розвитку аварії, слід враховувати такі фактори:

разове або неперервне витікання й розливання авіаційного палива;

масу горючих речовин, що потрапляють на зовнішню поверхню ЗО;

інтенсивність теплового випромінювання;

зміну границі міцності матеріалу ЗО при впливі високих температур (границя міцності на розтягування, границя текучості, модуль пружності).

Маса АП, що потрапила на поверхню ЗО при аварії, надійшла самопливом, обчислюється як [9]

$$\left\{ m = \int_0^{t_k} G(t) dt = G_p t_{розп} + \frac{\pi d_T^2}{4} (\delta \rho), \right.$$

де $G(t)$ — витрата АП, що витікає з літака; $G_p = \frac{\pi d_T^2}{4} \sqrt{2\rho \Delta P_p}$;

$\Delta P_p = h_T \rho g$ — напір об'єму АП; h_T — висота об'єму АП;

g — прискорення вільного падіння; $t_{розп}$ — час, протягом якого АП витікає з літака; d_T — діаметр крізних тріщин в оболонці; δ — товщина ЗО; ρ — густина АП.

Швидкість вигорання АП можна оцінити за формулою

$$m_{\text{виг}} = \frac{K\rho Q_p^H}{L_{\text{вип}}}$$

де $K = 1,25 \cdot 10^{-6}$ м/с; Q_p^H — нижча теплота згорання АП; $L_{\text{вип}}$ — теплота випаровування АП.

Інтенсивність теплового випромінювання обчислюється за формулою [10]

$$q = E_f E_q K_T,$$

де E_f — середньоповерхнева густина теплового випромінювання полум'я; E_q — кутовий коефіцієнт опромінення; K_T — коефіцієнт пропускання атмосфери.

Розміри пожежі і швидкість її розповсюдження залежать від ступеня руйнування паливної системи, кількості палива в баках, характеру покриття (грунт, бетон, асфальт), на яке воно виливається. Приблизна площа, яка може бути охоплена вогнем при розливанні палива, визначається за формулою [10]

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{шт}} &= 0,7l(12+d), & d \leq 20 \\ S_{\text{шт}} &= 0,7l(30+d), & d > 20 \end{aligned} \right\}$$

де l — довжина літака, м; d — діаметр мідельового перетину фюзеляжу літака, м.

Знаючи масу палива і площу пожежі, можна визначити тривалість пожежі [11]:

$$\tau = M / (U_M S_{\text{кр}}),$$

де M — маса АП на початку пожежі, кг; U_M — питома масова швидкість вигорання, кг/(м²с); $S_{\text{кр}}$ — площа пожежі, м².

Час τ , визначений за наведеною формулою для різних типів літака, змінюється в широкі межі — від 5 до 40 хв. Натурний експеримент зі спалювання списаного літака з 20 т пального показав, що після закінчення 17 хв літак майже повністю згорів [10].

Розрахунок теплостійкості захисної оболонки при зовнішніх температурних впливах, спричинених падінням літака на АЕС

Розглянемо сталобетонну статично визначену ЗО, яка перебуває під дією рівномірно розподіленого навантаження і температури, що змінюється уздовж осі y за законом стандартного горіння (рис. 2).

Для розв'язання задачі, що стосується прикладання температурно-інерційної сили, складемо систему диференціальних рівнянь руху ЗО, до правої частини якої введемо

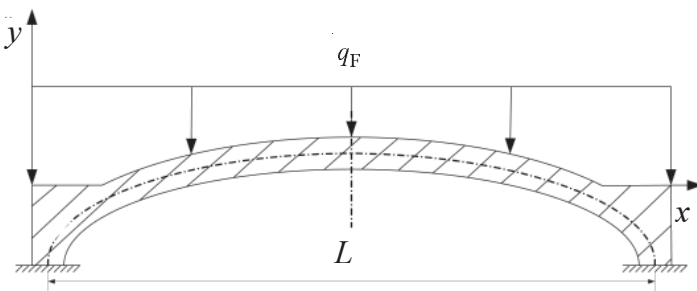


Рис. 2. Схема розрахунку механічного та температурного впливів на сталобетонну ЗО

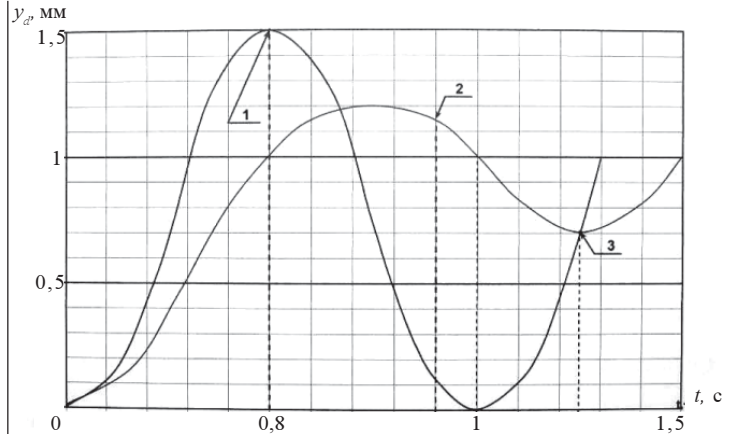


Рис. 3. Динамічний ефект ЗО:
1 — $\tau = 0$; 2 — $\tau = 0,25t_0$; 3 — $\tau = t_0$

функцію поширення температури, що залежить від координат і часу.

Рівняння руху балки з розподіленою масою і нескінченним числом степенів вільності виглядатиме так [12]:

$$v_T \frac{\partial^2 (y_d + y_s)}{\partial t^2} + EJ \frac{\partial^4 (y_d + y_s)}{\partial x^4} + Ea \frac{\partial^2 M_T}{\partial x^2} = 0,$$

де v_T — коефіцієнт Пуассона матеріалу ЗО; $y_d = \frac{aT_0 L}{\omega} \sin(\omega t)$ —

динамічне переміщення маси ЗО внаслідок сил інерції; y_s — прогин балки від статично прикладеної температури; EJ — жорсткість ЗО; E — модуль пружності; J — момент інерції; t — час; a — коефіцієнт лінійного розширення матеріалу ЗО; M_T — згинальний момент; T_0 — температура навколишнього середовища; L — довжина прольоту ЗО; ω — частота власних коливань ЗО.

Динамічні переміщення маси ЗО обчислюють в інтервалі часу від $t = 0$ до $t = \tau$. Якщо τ перевищуватиме половину періоду власних коливань y_d , виникатиме динамічне переміщення ЗО в процесі зростання температури. Із зменшенням часу зростання температури пожежі динамічний ефект у вигляді зміни переміщень збільшуватиметься. На рис. 3 показано розраховану зміну переміщення ЗО для $\tau = 0$, $\tau = 0,25t_0$ та $\tau = t_0$, де t_0 — період, що характеризує власні коливання ЗО.

Якщо $t \rightarrow 0$, то $\sin(\omega t | 2/0,5 \omega t) \rightarrow 1$ (оскільки $y_d = \frac{aT_0 L}{\omega} \sin(\omega t)$), і найбільше динамічне переміщення матиме вигляд

$$y_d^{\text{max}} = 2aT_0 L \left[1 + \frac{\sin(\omega t/2)}{\omega t/2} \right] = 2aT_0 L.$$

З рис. 3 видно, що при $\tau = 0$ динамічний ефект ЗО максимальний.

Розглядаючи рівняння руху ЗО, спричиненого впливом статично прикладеної температури, можна записати [13] такий вираз:

$$\frac{\partial^4 y_s}{\partial x^4} = -Ea \frac{\partial^2 M_T}{\partial x^2}.$$

Тоді одержимо рівняння

$$EJ \frac{\partial y_d}{\partial x^4} + \nu \frac{\partial^2 y_d}{\partial t^2} = \nu \frac{\partial y_s}{\partial t^2},$$

Функції розподілу температури по товщині сталі можуть бути різними. Наприклад, якщо температура поверхні ЗО міняється за гармонічним законом, то температура усередині ЗО дорівнюватиме

$$T(x) = T_0 \exp\left(-L \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_T}}\right) \cos\left[\omega t - \varepsilon - L_0 \left(\frac{\omega}{2\alpha_T}\right)^2\right],$$

де $\alpha_T = \lambda_T / (\rho_T c_T)$; $L_0 = L/2$ — відрізок ЗО, на якому розраховуються прогин та згинальний момент; λ_T — коефіцієнт теплопровідності; ρ_T — густина бетону й металу; c_T — питома теплоємність матеріалу ЗО; ε — внутрішня деформація ЗО внаслідок впливу температури.

Розподіл температури у ЗО можна описати формулою

$$T(x) = \frac{q_F}{2\sqrt{\pi\alpha_T t}} \left[1 - \exp\left(-\frac{L_0^2}{\alpha_T t}\right) \right] \exp(L-x)\alpha_T t,$$

де x — глибина нагрітого шару ЗО; q_F — теплове навантаження на ЗО.

Згинальний момент може бути визначений за формулою

$$M_T = \int_{-h/2}^{h/2} EaT(x) dx = \frac{EJQa}{2\lambda_T} \left\{ 1 - \frac{96}{\pi^4} \sum_{n=1,3,5}^N \frac{\exp\left(-\pi^2 n^2 \frac{\alpha_T}{h^2} t\right)}{n^2} \right\}.$$

Узагальнені інтегральні модулі деформації стиснутої та розтягнутої зон перетину ЗО при $T \geq 473$ К мають такий вигляд [14–16]:

$$\begin{cases} E_b = 3 \sum_{z=1}^z A_z (\varepsilon'_b)^{(z-1)/(z+2)}, \\ E_t = 3 \sum_{z=1}^z A_{tz} (\varepsilon'_c)^{(z-1)/(z+2)}, \end{cases}$$

де A_z, A_{tz} — коефіцієнти, що визначаються з умов мінімуму квадратичних відхилень експериментально отриманих значень деформацій; ε_b — коефіцієнт деформації бетону; ε_c — коефіцієнт деформації сталі.

У випадку одиночного вигину балки ширина розтягнутої (h_1) і стиснутої (h_2) зон визначатимуться умовами

$$\int_{-h_c}^{h_b} \sigma_b dy + \int_{-L_1}^{L_2} \sigma_c dy = 0, \quad l_1 = l_2 + h_s,$$

де σ_b — деформація стиснення бетону; σ_c — деформація сталі.

За відсутності тріщин у перетині сталобетонної балки з наведених вище умов одержимо наступне рівняння відносно невідомих відстаней h_{cp} [17]:

$$\overline{h_{cp}} = \frac{\left[\varepsilon_b \int_0^{h_{cp}} \beta_b(T_h) y dy - \beta_c(T_0) \frac{h_c^2}{2} \right]}{\left[\varepsilon_b \beta_b(T_h) h_b + \beta_c(T_0) h_c \right]},$$

де T_h — температура на верхній частині ЗО, що не піддається вогневому впливу.

Умови відсутності руйнування бетону відносно деформації стиску [18, 19]:

$$\frac{E_b(T_h) QL^2 + 24M_T}{1 - \nu_b^2} \beta_b(T) h_b < R_b(T) \gamma_b(T),$$

де $\beta_b(T), \gamma_b(T)$ — проектні характеристики бетону в залежності від температури (наведені в [15]); $R_b(T)$ — критичне напруження на стиснення бетону; D — коефіцієнт жорсткості балки.

Умови відсутності руйнування сталевго листа (пластична деформація та втрата несучої здатності) і збереження міцнісних властивостей [20]:

$$\sigma_c(T) = \frac{E_c(T_h) QL^2 + 24M_T}{1 - \nu_c^2} \beta_c(T_h) h_c < \sigma_T(T_h) \gamma_c(T).$$

Параметри $\beta_c, \gamma_c, \sigma_T$ наведені в [15].

$$\text{Розв'язок диференційного рівняння } EJ \frac{\partial y_d}{\partial x^4} + \nu \frac{\partial^2 y_d}{\partial t^2} = \nu \frac{\partial y_s}{\partial t^2}$$

для захищеної по обидва боки ЗО

$$y_s = \frac{Q}{24D} x^2 (x - L_0)^2 + \frac{M_T}{2D} x (x - L_0).$$

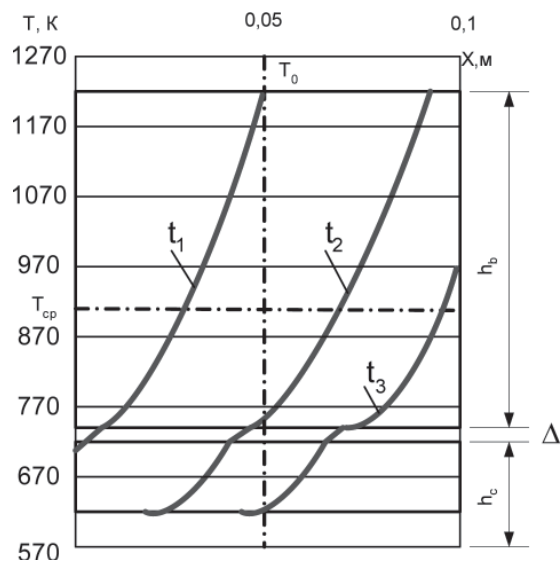


Рис. 4. Розподіл температур у перетині сталобетонної ЗО у різні моменти часу після аварії [12]: $t_1 = 10$ с; $t_2 = 100$ с; $t_3 = 1000$ с

Найбільша кривизна вигину досягатиметься на середині ЗО при $x = L_0$:

$$P = \max y_s'' = \frac{QL^2}{24D} - \frac{M_T}{D}.$$

Результати розрахунків за отриманими формулами наведені на рис. 4.

Залежності міцнісних характеристик бетону і сталі від температури при розрахунках бралися за [15, 16]. Бетон був представлений трифазним середовищем: твердий несучий матеріал (кістяк), сукупність рідких включень у порах і газ у порах. Коефіцієнти Пуассона і теплового розширення a_b важкого бетону в діапазоні температур 293÷973 К вважалися постійними: $\nu_b = 0,2$, $a_b = 1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. При температурах понад 973 К коефіцієнт a_b збільшувався до $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Для сталі $\nu_c = 0,3$, $a_c = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Числові значення міцнісних характеристик бетону і сталі при кімнатній температурі приймалися згідно з [16].

Час втрати несучої спроможності ЗО t_0 , с, розраховувався за формулою

$$\text{erf}\left(\frac{\Delta x}{2\sqrt{at_0}}\right) = \frac{T_{\text{п}} - T_{\text{кр.п}}}{T_{\text{п}} - T_0},$$

де $\text{erf}\left(\frac{\Delta x}{2\sqrt{at_0}}\right)$ — табульована функція інтеграла помилок;

$T_{\text{п}}$ — температура поверхні перекриття з боку осередку пожежі, яку вважатимемо постійною впродовж часу $t < t_{\text{п}}$ та рівною $T_{\text{п max}}$, К; $t_{\text{п}}$ — тривалість горіння (до моменту локалізації); T_0 — початкова температура перекриття ($T_0 = 300 \text{ K}$); $T_{\text{кр.п}}$ — критична температура для розтягнутих елементів конструкцій перекриття ($T_{\text{кр.п}} = 700 \text{ K}$); a — температуропровідність бетону при 700 К ($a = 2,83 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$); Δx — товщина захисного шару бетону, м.

Значення $T_{\text{п max}}$ при об'ємній пожежі досягається при $t = t_{\text{п}}$ та оцінюється за формулою [14, 22]

$$T_{\text{п max}} = 915 \exp\left(5 \cdot 10^3 (q_k - 30)\right).$$

Отримане з теплового розрахунку значення t_0 збільшують для статично невизначених конструкцій (монолітних перекриттів) в 1,5 раза, якщо на опорах немає підсилення несучих конструкцій, або в 2,5 раза при збільшенні площини арматури на опорах удвічі. Оцінки показують, що вогнестійкість ЗО реакторного залу може досягати 1,5 год, що не перевищує тривалості можливих пожеж.

Розрахунки, отримані за цією методикою, добре погоджуються з результатами методики роботи [16]. Похибка розрахунків по всьому діапазону вихідних даних не перевищує 25 %.

Оцінку границі теплостійкості ЗО за втратою цілісності можна також визначити за критерієм крихкого руйнування [23]:

$$F = \frac{K(a_{bt} + a_{ct})(E_{bt} + E_{ct})(\bar{\rho}_b + \bar{\rho}_c)}{k_1(\lambda_b(t) + \lambda_c(t))\Pi} W_0,$$

де $K = 1,16 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{5/2} \cdot \text{кг}$; a_{bt} , a_{ct} — коефіцієнти лінійної температурної деформації бетону і сталі, K^{-1} ; E_{bt} , E_{ct} —

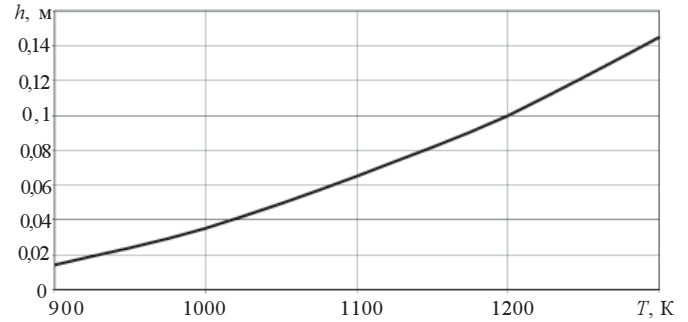


Рис. 5. Зміна товщини осипання бетону ЗО за 1 год в залежності від температури нагріву

модуль пружності бетону і сталі, $\text{МН}/\text{м}^2$; $\bar{\rho}_b$, $\bar{\rho}_c$ — середня щільність бетону і сталі, $\text{кг}/\text{м}^3$; k_1 — коефіцієнт інтенсивності напружень першого роду, $\text{МН} \cdot \text{м}^{-3/2}$; λ — коефіцієнт теплопровідності бетону і сталі, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{C})$; Π — пористість бетону; W_0 — об'ємна вологість бетону.

На рис. 5 наведено розраховану зміну товщини осипання бетону ЗО за 1 год в залежності від температури нагріву.

Таким чином, після двогодинного прогріву при температурі 1270 К міцність ЗО може складати близько 40 %, причому при температурі 1420 К відбувається втрата пружності і починається пластична деформація; при температурі 1500 К пластична деформація ЗО досягає 30 %. При температурі 1300 К модуль пружності дорівнює 15 %, коефіцієнт пружності 0,15 від руйнівного навантаження, коефіцієнт лінійного розширення $10,4 \cdot 10^{-6}$, коефіцієнт теплопровідності $1,6 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

Проведені розрахунки за останньою формулою показали, що при $F < 5,0$ границя теплостійкості залізобетону ЗО за втратою пружності не перевищує 2 год.

Зв'язок між діючим термонапруженням та розмірами мікротріщин, на межі котрих концентрація термонапружень досягає критичної величини, визначається рівнянням Грифітса [8]:

$$\sigma(T) = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{E\nu_T l a}{S_T H_b^2}} \int_0^{\tau} \int_{h_{b1}}^{h_{b2}} [T(\tau) - T_0(\tau)] h_b dh_b d\tau,$$

де E — модуль пружності матеріалу ЗО; ν_T — коефіцієнт Пуассона; l — лінійний розмір мікротріщини; a — коефіцієнт температуропровідності; S_T — площа мікротріщини; h_b — товщина сталобетонного матеріалу ЗО; $T(\tau)$ — температура на зовнішній поверхні ЗО в момент часу τ ; $T_0(\tau)$ — температура навколишнього середовища всередині ЗО в момент часу τ .

Якщо прикладене теплове навантаження викликає появу полів термонапружень, то всі мікротріщини з площею $S_{\text{max}} \gg S$ почнуть рости і їхню кількість можна визначити за формулою [25].

$$D_K = K_0 \int_S^{\infty} \exp(-V_K^2) dS,$$

де K_0 — постійна, що характеризує структуру поверхневого шару ЗО; V_K — постійний коефіцієнт з розмірністю $1/\text{м}^2$, що залежить від фізико-математичних властивостей поверхневого шару ЗО та визначає його густину.

Розраховану за наведеними формулами загальну кількість утворених мікротріщин у поверхневому шарі ЗО в залеж-

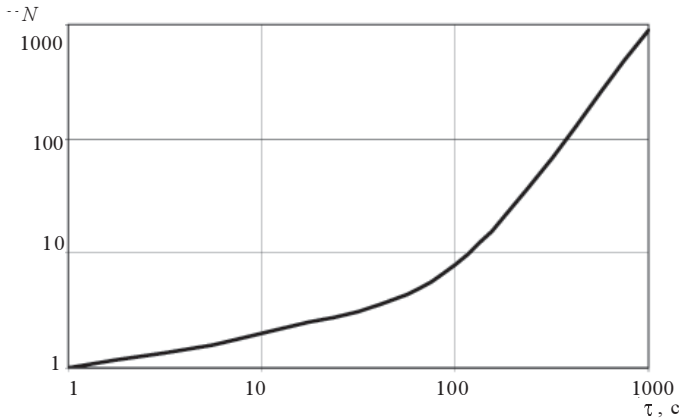


Рис. 6. Загальна кількість утворених мікротріщин в поверхневому шарі ЗО в залежності від часу впливу теплових потоків на залізобетон

ності від часу впливу теплових потоків на залізобетон показано на рис. 6.

Імовірність втрати цілісності ЗО (крихке руйнування залізобетону) можна представити у вигляді [26, 27]

$$Q(t) = Q(S < S_d),$$

де $S_d = R - L$, $S_d > 0$ — резерв узагальненого опору ЗО у граничному стані; R — узагальнена стійкість ЗО до аварійних впливів; L — узагальнене теплове навантаження на ЗО.

Перехід ЗО при запроєктній аварії з одного стану в інший можна описати як процес Пуассона з дискретним станом і неперервним часом:

$$Q(t) = 1 - Q(T_n > t) = 1 - \sum_{m=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^m \exp(-\lambda t)}{m!},$$

де λ — інтенсивність відмов ЗО.

Залежність імовірності відмов ЗО від температурного впливу при падінні літака матиме вигляд

$$Q(P, T) = F \left[\ln \left(\frac{\Delta P}{P_m} \right) \left(\frac{T}{T_m} \right) C_\Sigma \right],$$

де $F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ — функція Гауса; C_Σ — ко-

ефіцієнт варіації вихідних даних (в розрахунку $C_\Sigma = 0,3$); $P_m \geq 150$ кПа — максимальний надлишковий тиск; $T_m \geq 1473$ К — максимальна температура на поверхні ЗО.

Висновки

1. Для визначення ймовірності відмови ЗО при впливі інтенсивних теплових потоків внаслідок падіння літака на АЕС викладено різні підходи та розроблено методики розрахунку на герметичність та втрату несучої властивості. Проведено числові дослідження сталобетонної рівномірно напруженої оболонки при нерівномірному нагріві з урахуванням утворення мікротріщин у розтягнутій зоні бетону. Показано, що в розрахунку поля температур за товщиною оболонки необхідно додатково врахувати процеси фазових переходів та вводити температурний коефіцієнт середовища,

тобто розглядати залізобетон як пористе багатофазне середовище з різними температурами фаз.

2. Аналіз отриманих результатів з дослідження процесу локальних руйнувань ЗО при теплових впливах показав складність характеру руйнування. Як правило, характер локальних руйнувань встановлюється з умов мінімуму несучої здатності конструкції ЗО, що визначається серед можливих схем її руйнування. При цьому можлива як моментна, так і локальна схема руйнування конструкції ЗО у вигляді утворення тріщин на поверхні ($T = 1100$ К) або складних тріщин (наприклад, $T = 1400$ К). Для раціонального використання запасу міцності оболонки необхідні додаткові теплові екрани або захист покриття. В подальших проєктах необхідно виконувати ЗО з двох циліндричних ЗО: внутрішньої металічної, розрахованої на максимальний надлишковий тиск 0,2 МПа і температуру 1270 К під час аварії, та зовнішньої із залізобетону без попереднього напруження, розрахованої на екстремальні зовнішні впливи (температура $T = 1470$ К).

3. Оцінка результатів розрахунку відносної глибини проникнення тріщини та товщини оболонки виявила необхідність проведення експериментальних досліджень характеру руйнування залізобетонних плит при поєднаному впливі навантажень (механічний удар і надлишковий тиск).

Список літератури

1. Державний стандарт України. Система стандартів безпеки праці. Пожежна безпека. Терміни та визначення. ДСТУ 2272-93.
2. Верюжский Ю. В. Метод интегральных уравнений в механике деформирующих твердых тел. — К.: КИСИ, 1977. — 270 с.
3. Немчинов Ю. И. Расчет пространственных конструкций (метод конечных элементов). — К.: Будівельник, 1980. — 232 с.
4. Чихладзе Э. Д. Несущая способность сталобетонных конструкций в условиях статического и динамического нагружения: Дис. ... д-ра техн. наук. — Харьков, 1985. — 481 с.
5. НП 306.1.02/1.034-2000. Загальні положення забезпечення безпеки атомних станцій (ЗПЗП-2000).
6. Реакторная установка В-320. Техническое обоснование безопасности реакторной установки 320.00.00.00.000 Д61.
7. SUSA-300DL11R-XV1. Проект углубленного анализа безопасности энергоблока № 1 ЮУАЭС (SUSA). Техногенные опасности и отчет о планировании.
8. Методические рекомендации по расчету огнестойкости и огнезащитности железобетонных конструкций (МДС 21-2.2000). — М.: НИИЖБ, 2000. — 92 с.
9. Азаров С. И., Сорокин Г. А. Моделирование пожара на АЭС при авиакатастрофе // Пром. теплотехника. — 2003. — Т.25, № 4. — С. 368–369.
10. Абдурагимов И. М. Физико-химические основы развития и тушения пожара: Уч. пособие ВИПТШ МВД СССР / Абдурагимов И. М., Говоров В. Ю., Макаров В. Е. — М., 1980.
11. Иванов Е. Н. Пожарная защита открытых технологических установок. — М.: Химия, 1975. — 200 с.
12. Азаров С. И., Сидоренко В. Л., Сорокин Г. А., Єременко С. А. Розрахунок несучої здатності бетонної балки в умовах пожежі // Проблеми пожежної безпеки. — 2007. — Вып. 21. — С. 21–27.
13. Сидоренко В. Л., Азаров С. И. Оцінка вогнестійкості будівельних конструкцій центрального зала ЯР ВВР-М // 36. наук. праць «Пожежна безпека» ЛДУ БЖД, УкрНДІПБ МНС України. — Львів, 2007. — № 10. — С. 150–156.
14. СНиП 2.0304-84. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур. — 53 с.
15. Рекомендации по расчету процессов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций / НИИЖБ. — М.: Стройиздат, 1986. — 40 с.

16. *Веричева М. А.* Исследование процесса разрушения бетонных и сталебетонных конструкций при интенсивных температурных процессах: Дис. ... канд. техн. наук. 05.23.01 – Харьков, 1998. – 138 с.
17. *Милованов А. Ф.* Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. – М.: Стройиздат, 1998. – 304 с.
18. *Яковлев А. И.* Расчет огнестойкости строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1988. – 143 с.
19. *Григор'ян Б. Б.* Огнестойкость сжатых железобетонных элементов при температурных режимах пожара, близких к реальным. Дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Харьков, 2001. – 165 с.
20. *Демчина Б. Г.* Вогнестійкість одно- і багатопарових просторових конструкцій житлових та громадських будівель: Дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Харьков, 2001.
21. *Бартелеми Б.* Огнестойкость строительных конструкций / Бартелеми Б., Крюппа Ж.: Пер. с франц. – М.: Стройиздат, 1985. – 216 с.
22. *Фомін С. Л., Григор'ян Б. Б.* Вогнестійкість залізобетонних конструкцій при реальному режимі пожежі // Будівництво України. – 2002. – № 3. – С. 33–36.
23. *Разживин А. В.* К расчету осесимметричных конструкций на температурные воздействия // Численные методы решения задач строительной механики транспортных сооружений. – М.: МИИТ, 1986. – Вып. 782. – С. 112–116.
24. *Александровский С. В.* Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. – М.: Стройиздат, 1975. – 432 с.
25. *F. P. Loss.* Prevention in the Process Industries. Volumes 1 and 2. 1980. Buitenworths, London.
26. *Коллинз Дж.* Повреждение материалов в конструкции. Анализ, предсказание, предотвращение. – М.: Мир, 1984. – 290 с.
27. *Ионов В. Н.* Динамика разрушения деформируемого тела / Ионов В. Н., Селиванов В. В. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.

Надійшла до редакції 27.02.2009.