ABTOP



МАТЧЕНКО П.Т. Молодший науковий співробітник, Державний науковотехнічний центр з ядерної та радіаційної безпеки

КРИТЕРІЇ РУЙНУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРОТЯГОМ ЗІТКНЕННЯ З ПАДАЮЧИМ ЛІТАКОМ

УДК 624.015:624.023: 620.19

АНОТАЦІЯ

При зіткненні літака з конструкцією швидкість деформування і руйнування матеріалу в мільйони разів перевищує швидкість деформування зразка при визначенні міцності матеріалу. Таким чином, класична теорія міцності не може бути застосована в цьому випадку. У даній роботі запропоновані енергетичні критерії крихкого і в'язкого руйнування ізотропного матеріалу і залізобетону внаслідок зіткнення літака з конструкцією. Критерії враховують три види крихкого руйнування, втрату обсягу матеріалу і зміну форми тіла. В якості характеристик ударної міцності матеріалів запропоновано застосовувати ударну в'язкість матеріалів і питому ударну роботу руйнування, процедури визначення яких стандартизовані.

At the collision of an aircraft with a civil structure, the rate of material strain and destruction is million times greater than the rate of sample deformation during the material strength test. Thus the classical theory of strength under stresses is not applicable in this case. In this paper the energy criteria for the brittle and ductile fracture of isotropic material and reinforced concrete during aircraft collision with a structure are proposed. The criteria take into account three types of brittle fracture, the material volume loss and the body shape change. It is suggested to use the impact toughness of materials and specific fracture energy, which are determined by a standardized procedure, as the characteristics of the impact strength of materials.

КЛЮЧОВІ СЛОВА

критерії руйнування, АЕС, падіння літака

вступ

У відповідності з вимогами п.1.8 ПиН АЭ 5.6 [1] «1.8. Конструкции зданий и сооружений 1 категории необходимо рассчитывать с учетом следующих особых воздействий: ... 1.8.6. Падение самолета». Схема реакторного відділення за мить до зіткнення з літаком показана на рис. 1.



Рис.1. Схема реакторного відділення за мить до зіткнення з літаком: 1 - обладнання реакторного відділення, 2 - захисна оболонка. Точки 1 і 2 – точки можливого зіткнення з літаком.

Аналіз сучасного стану методів розрахунку споруд АЕС на дії навантажень і впливів при падінні літака викладено в [2].

Зазначимо, що теорія міцності будівельних конструкцій в напруженнях не може бути застосована при швидкостях падіння літака.

По перше. При випробуванні зразків на статичний розтяг при кімнатній температурі (ГОСТ 1497-84), при пониженій температурі (ГОСТ 11150-84), при підвищеній температурі (ГОСТ 9651-84) визначають: межу текучості фізичну от, МПа, або межу текучості умовну $\sigma_{0.2}$, МПа; тимчасовий опір σ_{B} , МПа; відносне видовження після розриву зразка (на п'ятикратних зразках) А або σ_5 , %; відносне звуження після розриву зразка, Z, φ , %. Таким чином характеристики (σ_T , σ_B) теорії міцності в напруженнях визначають на підставі статичних випробувань зразків. При статичних випробуваннях зразків захвати, що утримують зразки, переміщуються зі швидкістю ≈ 0,1...0,5 мм/с або 0,0001...0,0005м/с. При інших швидкостях переміщення захватів, що утримують зразок, діаграма деформування буде мати інший вигляд і значення от, ов будуть іншими. При падінні літака або його уламків на споруду швидкість руху літака в мить до зіткнення може становити 150...200 м/с. Якщо припустити, що відразу у мить зіткнення почалося руйнування будівельної конструкції, тоді швидкість руйнування перевищує швидкість випробування зразків ≈ в 1,5 мільйона разів. Експериментально, шляхом розриву зразка, неможливо визначити значення в'язкої міцності матеріалу зі швидкістю прикладення навантаження 150 м/с. При такій відмінності швидкостей неможливо визначити значення σ_T , σ_B будівельних матеріалів шляхом екстраполяції значень, що отримані при статичних випробуваннях.

По друге. У відповідності з даними [10] при ударі двигуна літака Boeing 474-400 в захисну оболонку реакторного відділення АЕС його маса становить 4300 кг, діаметр 0,91 м, швидкість руху на початку удару становить 150 м/с. Товщина захисної оболонки PB становить 1,5 м. Таким чином, час t_l , що може буде витрачений на прибивання захисної оболонки або на руйнування двигуна під час удару, дорівнює $t_1 = 1,5/150 = 0,01$ с. Якщо швидкість розповсюдження поперечної сейсмічної хвилі в бетоні дорівнює приблизно 2500 м/с і якщо вважати, що швидкість розповсюдження деформацій близька до швидкості розповсюдження поперечної сейсмічної хвилі, тоді відстань від місця удару двигуна до опор реакторного відділення (приблизно дорівнює 60м), деформаційна хвиля пройде за час $t_2 = 60/2500 = 0,024$ с. Таким чином руйнування захисної оболонки може відбутися раніше, ніж почнуть працювати рівняння рівноваги зовнішніх зусиль та внутрішніх реакцій системи. Інакше кажучи, теорія міцності в напруженнях може бути застосована у випадку, коли $t_1 \gg t_2$.

Кожне з уражень будівельних конструкцій є сукупністю різних видів руйнування, таких як: крихке руйнування з утворенням та розвитком тріщин трьох видів, втратою обсягу матеріалу внаслідок відколювання і випарювання, зміною форми тіла, в'язким руйнуванням.

Існуючі на сьогодення теорії міцності в напруженнях розглядають тільки в'язке руйнування матеріалу в умовах статичної рівноваги, коли робота зовнішніх сил на їх переміщеннях дорівнює енергії внутрішньої деформації. За визначенням: в'язке руйнування – руйнування, яке супроводжується утворенням пластичних деформацій і, як правило, відбувається повільно (ДБН В.2.6-163:2010); крихке руйнування – Варіант 1. Руйнування, яке виникає внаслідок зростання тріщини критичного розміру для рівня існуючих напружень зі швидкістю, близькою до швидкості розповсюдження хвилі в матеріалі. Варіант 2. Руйнування без слідів пластичних деформацій на поверхні злому матеріалу. Варіант 3. Руйнування (як правило, раптове), що супроводжується утворенням малих деформацій, яке виникає, зазвичай, за наявності концентраторів напружень, низьких температур і ударних впливів (дій) (ДБН В.2.6-163:2010). Варіант 4. Руйнування без слідів пластичних деформацій в матеріалі (ДСТУ 2825-94).

Існуючі теорії міцності не описують крихке руйнуванні матеріалів; не описують руйнування з швидкостями, близькими до швидкості розповсюдження хвилі; не придатні для моделювання процесу враження в умовах зміни в часі усіх видів енергії, що описують стан матеріалу в конструкції в процесі зіткнення та після нього.

Ціль роботи – визначити критерії міцності будівельних матеріалів у випадку зіткнення з падаючим літаком або з його уламками протягом і після зіткнення. Пов'язати ці критерії зі стандартними методами випробувань зразків на ударну в'язкість і динамічний розрив.

У 1904 р. М. Т. Губер висловив припущення [3,4]: «Руйнування за умов складного напруження відбувається, коли питома пружня енергія зміни форми дорівнюватиме або перевищуватиме питому енергію зміни форми в мить руйнування зразка з того самого матеріалу за одновісного розтягу або стиску». Це ствердження виконується в умовах силової рівноваги, сумісності деформацій і у випадку, коли робота зовнішніх сил на їх переміщеннях дорівнює енергії внутрішньої деформації.

В загальному випадку умову енергетичної рівноваги твердого деформованого тіла можна записати у вигляді [5]:

$$U + K + F - P - W - G = 0,$$

де U - повна енергія деформації; K - кінетична енергія, що потрапляє в зону взаємодії тіл; F - робота, яку виконують статичні сили, що розташовані на поверхні тіла під час взаємодії тіл при руйнуванні і деформуванні; P - робота пластичного деформування матеріалу тіла; W - робота, яка витрачена на руйнування матеріалу тіла; G - теплова енергія, яка потрапляє з зону взаємодії тіл, що вилучається під час пластичного деформування і під час руйнування і розсіюється в матеріалі і на поверхні тіла.



ЕНЕРГЕТИЧНІ КРИТЕРІЇ ЯКІСНОГО СТАНУ [6]

Гриффітс передбачив, що тріщина буде зростати лише в тому випадку, якщо вивільнена при цьому енергія пружної деформації достатня для забезпечення всіх затрат енергії, що пов`язані з цим ростом. З огляду на те, що Гриффітс працював із скляними пластинками [7, 8], крихким матеріалом з досить високим модулем пружності, в цьому випадку переважали затрати енергії на утворення нових поверхонь тріщин. Критерій страгування тріщини прийняв вигляд:

$$\frac{dU}{dS} \ge \frac{dW}{dS} , \qquad (1)$$

де *S* – площа нових поверхонь тріщини.

Для рішення задач механіки крихкого руйнування прийнято розглядати три різновиди крихкого руйнування, що показані на рис. 2, а.





б - ураження залізобетонної конструкції у вигляді відколювання матеріалу і втраті його об'єму. в - руйнування внаслідок зміни форми (пластичних деформацій).

Тоді можна записати $dW/dS_I = G_{Ic}$ - критичне значення інтенсивності виконаної роботи по утворенні додаткової поверхні тріщини нормального відриву в умовах плоского деформованого стану, Дж/м²; $dU/dS_1 = G_1$ - інтенсивності вивільнення енергії пружної деформації при утворенні додаткової поверхні тріщини нормального відриву в умовах плоского деформованого стану; $dW/dS_{II} = G_{II}$ - критичне значення інтенсивності виконаної роботи по утворенні додаткової поверхні тріщини поперечного зсуву в умовах плоского деформованого стану, Дж/м²; *dU/dS*_{II}=G_{II} - інтенсивності вивільнення енергії пружної деформації при утворенні додаткової поверхні тріщини поперечного зсуву в умовах плоского деформованого стану; $dW/dS_{III}=G_{III}$ - критичне значення інтенсивності виконаної роботи по утворенні додаткової поверхні тріщини поздовжнього зсуву в умовах плоского деформованого стану, Дж/м²; $dU/dS_{III}=G_{III}$ - інтенсивності вивільнення енергії пружної деформації при утворенні додаткової поверхні тріщини поздовжнього зсуву в умовах плоского деформованого стану.

В загальному випадку руйнування матеріалу в кінцевому елементі в трьохмірному ізотропному пружно-пластичному тілі може супроводжуватися прирощенням площі поверхонь тріщин (dS) (рис.2,а), зміною (як правило, зменшенням) об'єму тіла (dV) (рис. 2, б) і зміною форми тіла ($d\xi$) (рис. 2, в).

Тоді, аналогічно критерію Гриффітса, руйнування матеріалу кінцевого елементу (КЕ) відбудеться, якщо виконується один з наступних критеріїв:

$$\frac{dU}{dS_{I}} \ge \frac{dW}{dS_{I}}; \frac{dU}{dS_{II}} \ge \frac{dW}{dS_{II}}; \frac{dU}{dS_{III}} \ge \frac{dW}{dS_{III}};$$

$$\frac{dU}{dV} \ge \frac{dW}{dV}; \quad \frac{dU}{d\xi} \ge \frac{dW}{d\xi};$$

$$\sqrt{\left(\frac{\frac{dU}{d\xi}}{\frac{dW}{d\xi}}\right)^{2} + \left(\frac{\frac{dU}{dS}}{\frac{dW}{dS}}\right)^{2} + \left(\frac{\frac{dU}{dV}}{\frac{dW}{dV}}\right)^{2}} \ge 1.$$
(2)

Тут у (2) - енергія, витрачена на утворення нових поверхонь тріщини, втрату обсягу матеріалу і

> на зміну форми елементу матеріалу, що досліджується. Для нестійкого зростання тріщини, обсягу і форми КЕ, зміна характеру руйнування виникне, якщо виконується одна із умов:

$$\frac{d^{2}U}{dS^{2}} \ge 0; \ \frac{d^{2}U}{dV^{2}} \ge 0; \ \frac{d^{2}U}{d\xi^{2}} \ge 0. \ (3)$$

Таким чином в загальному випадку енергетичні рівняння, що описують якісну зміну стану матеріалу, є окремими випадками одного загального закону, який є похідною від закону збе-

реження енергії і який записується у вигляді:

$$\frac{d^{p}(A-U+...)}{d\psi^{p}} = \frac{d^{p}(W+...)}{d\psi^{p}} , \qquad (4)$$

де p – ступінь похідної функції енергії або роботи за параметром, що розглядається, p= 0, 1, 2, ..., ∞ ; Ψ – будь-який параметр (аргумент), що входить до виразу функції енергетичної рівноваги.

КРИТЕРІЇ РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ЗІТКНЕННІ З ЛІТАКОМ

Приймемо наступні умовні позначення:

 $dU(t)/dV(t) = \Omega(t)$ - інтенсивності вивільнення енергії пружної деформації при втраті обсягу матеріалу (рис. 2, б), Дж/м³.

 $dW(t)/dV(t) = \Omega_{c}(t)$ - критичне значення інтенсивності виконаної роботи по втраті об'єму матеріалу, Дж/м³;

 $dU(t)/d\xi(t) = \zeta(t)$ - інтенсивності вивільнення енергії пружної деформації при зміні форми об'єму матеріалу, Дж/ξ;

 $dW(t)/d\xi(t) = \zeta_c(t)$ - критичне значення інтенсивнос-

ті виконаної роботи по зміні форми об'єму матеріалу, Дж/ξ. Тоді критерії (2) можна записати у вигляді:

$$G_{I}(t) \geq G_{Ic}(t); G_{II}(t) \geq G_{IIc}(t); G_{III}(t) \geq G_{IIIc}(t);$$

$$\Omega(t) \geq \Omega_{C}(t); \zeta(t) \geq \zeta_{C}(t);$$

$$\sqrt{\left(\frac{G_{I}(t)}{G_{IC}(t)}\right)^{2} + \left(\frac{G_{II}(t)}{G_{IIC}(t)}\right)^{2} + \left(\frac{G_{III}(t)}{G_{IIIC}(t)}\right)^{2} + \left(\frac{\Omega(t)}{\Omega_{C}(t)}\right)^{2} + \left(\frac{\zeta(t)}{\zeta_{C}(t)}\right)^{2}} \geq 1.$$
(5)

Зауважимо, що $G_{lc}(t)$; $G_{llc}(t)$; $G_{llc}(t)$; $\Omega_{C}(t)$; $\zeta_{C}(t)$ є константами для статичного руйнування і є такими, що змінюють своє значення в часі для квазістатичного і динамічного руйнування.

ПИТОМА УДАРНА РОБОТА РУЙНУВАННЯ ОБСЯГУ МЕТАЛУ

У відповідності з [9], за необхідності, виконуються випробування основного металу та зварних з'єднань на ударний розрив.

Випробування на опір ударному розриву виконують для зварних стикових з'єднань листів товщиною до 2 мм.

Випробування виконують на маятникових копрах із пристосуванням для закріплення плоских зразків. Питома ударна робота руйнування об'єму матеріалу визначається за формулою:

$$\alpha_{y}(t) = \kappa_{0} \frac{A_{y}(t)}{V} + \kappa_{1} \frac{dA_{y}(t)}{Vdt} + \kappa_{2} \frac{d^{2}A_{y}(t)}{Vdt^{2}} ,$$

де $A_y(t)$ - робота удару, що витрачена на в'язке руйнування об'єму матеріалу зразка, Дж; V - об'єм зруйнованого матеріалу зразка, що дорівнює добутку товщини основного металу (а) на розрахункову довжину і ширину зразка, м³; k_0 , k_1 , k_2 - коефіцієнти з вимірністю, відповідно: безрозмірний, t, t^2 ;

 $\frac{dA_y(t)}{Vdt}$ - швидкість зміни в часі роботи удару на

руйнування об'єму матеріалу, Дж/(м³с);

 $\frac{d^2 A_y(t)}{V dt^2}$ - прискорення зміни в часі роботи удару на

руйнування об'єму матеріалу, Дж/(м³с²).

 k_0 , k_1 , k_2 – визначаються шляхом рішення системи трьох рівнянь з трьома невідомими за результатами трьох або більше випробувань на руйнування зразка ударом з різними швидкостями і різними прискореннями зміни енергії удару.

Зазначимо, що розміри конструкцій, що руйнуються внаслідок удару, відрізняються від розмірів зразків для випробування і визначення ударної роботи руйнування. З урахуванням масштабного ефекту, слід записати:

$$\alpha_{\rm vx}(t) = k_m \cdot \alpha_{\rm v}(t),$$

де *а*_w(*t*) – питома робота руйнування конструкції з

об'ємом руйнування V_x , м³, k_m - масштабний коефіцієнт, безрозмірний, що визначається за формулою:

$$k_m = s_1 \left(\frac{V_x}{V_0}\right)^{s_2}$$

де s_1 , s_2 - коефіцієнти, що визначаються експериментально. У випадку відсутності експериментальних даних, приймаємо $s_1=1$, $s_2=3$; V_x , V_0 - відповідно об'єм матеріалу, що руйнується в конструкції, і об'єм матеріалу, що руйнується в зразку.

Таким чином $\Omega_C(t) = \alpha_{vx}(t)$, Дж/м³.

Вивільнення енергії пружної деформації при малих швидкостях деформування при втраті об'єму матеріалу визначається за формулою:

$$U(t) = \int_{0}^{VP} \int_{0}^{\varepsilon_{02}} \sigma_{ij}(t) \cdot d\varepsilon_{ij}(t) dv$$

Інтенсивності вивільнення енергії пружної деформації при втраті об'єму матеріалу визначаються за формулою:

$$dU(t)/dV_P(t) = \Omega(t)$$
,

де $V_P(t)$ – об'єм зруйнованого (втраченого) матеріалу; $\sigma_{ij}(t)$ – компоненти тензора напружень; $\varepsilon_{ij}(t)$ – компоненти тензора деформацій.

Зауважимо, що при випробуванні зразків на ударний розрив, швидкість молоту в момент удару змінюється в незначних межах для стандартних зразків і стандартного обладнання для випробування. В такому випадку величина $\Omega_c(t) = a_y(t)$ є константою матеріалу для обмеженого діапазону швидкостей руйнування матеріалу для квазістатичного руйнування.

УДАРНА В'ЯЗКІСТЬ РУЙНУВАННЯ МЕТАЛУ З УТВОРЕННЯМ НОВОЇ ПОВЕРХНІ РУЙНУВАННЯ

У відповідності до п. 5 [9] ударну в'язкість руйнуванню металу визначають, як роботу удару ваги (копра), що призвела до крихкого або в'язкого руйнування поперечного перерізу металевого зразка з концентраторами видів U (з тупою виточкою), V (з гострою виточкою) і T (з тріщиною).

Ударна в'язкість *KC(t)* в Дж/см² вираховується за формулою:

$$KC(t) = \kappa_0 \frac{K(t)}{S_0(t)} + \kappa_1 \frac{dK(t)}{S_0(t)dt} + \kappa_2 \frac{d^2 K(t)}{S_0(t)dt^2} , \qquad (6)$$

де K(t) – робота удару, яку необхідно виконати для утворення нових поверхонь розриву зразка, Дж (кгс × м); k_0 , k_1 , k_2 - коефіцієнти з вимірністю, відповідно: безрозмірний, t, t^2 ;

 $\frac{dK(t)}{S_0(t)dt}$ - швидкість зміни в часі роботи удару, яку

необхідно виконати для утворення нових





поверхонь, Дж/(м²с);

 $\frac{d^2 K(t)}{S_0(t) dt^2}$ - прискорення зміни в часі роботи удару на

утворення нових поверхонь, $Дж/(m^2c^2)$. $S_0(t)$ - початкова площа поперечного перерізу зразка в місці концентратора, см², яка вираховується за формулою:

$$S_0(t) = H_1'(t) \cdot B$$

де *H*'₁ - початкова висота робочої частини зразка, см; *B* – початкова ширина зразка, см.

Для зразків з концентратором у вигляді тріщини (виду T) значення $H'_{1}(t)$ визначається, як різниця між повною висотою H, виміряною до випробування і розрахунковою глибиною концентратора (тріщини) h_{p} , як показано на рис. 3.



Рис.3. Переріз зразка для випробування з концентратором виду Т. abc – фронт тріщини втоми; І-І – положення візирної лінії окуляра мікроскопа в початковий момент вимірювання; ІІ-ІІ – положення візирної лінії окуляра мікроскопа в кінцевий момент вимірювання; інші умовні позначення такі самі, як в [10]

Якщо внаслідок випробування зразок не зруйнувався повністю, тоді показник якості матеріалу вважається не встановленим. В такому випадку в протоколі випробувань вказують, що зразок при максимальній енергії удару маятника не був зруйнований.

Допускається застосовувати зразки без надрізу і з однією чи двома необробленими поверхнями, розміри яких за шириною відрізняються від вказаних в [9].

Зазначимо, що площа перерізу конструкцій, що руйнуються внаслідок удару, відрізняється від площі перерізу зразків для випробування і визначення ударної в'язкості *KC(t)*. З урахуванням масштабного ефекту, слід записати:

$$KC_x(t) = k_m \cdot KC(t)$$

де $KC_x(t)$ – ударна в'язкість руйнування конструкції з об'ємом руйнування $S_x(t)$, м³, k_m - масштабний коефіцієнт, безрозмірний, що визначається за формулою:

$$k_m = s_1 \left(\frac{S_x}{S_0}\right)^{S_2}$$

де s_1 , s_2 - коефіцієнти, що визначаються експериментально. У випадку відсутності експериментальних даних, приймаємо $s_1=1$, $s_2=3$; S_x , S_0 - відповідно площа перерізу, що руйнується в конструкції, і площа перерізу, що руйнується в зразку.

Таким чином, для квазістатичного руйнування $G_{IC}(t) = KC_x(t) \times 10^4$, Дж/м². Встановлена залежність $G_{IIC}(t) = 3 \times G_{IC}(t)$, $G_{IIIC}(t) = 2 \times G_{IC}(t)$, де 10^4 – коефіцієнт переходу від Дж/см² до Дж/м².

Зауважимо, що при випробуванні зразків на в'язкість руйнуванню, швидкість молоту в момент удару змінюється в незначних межах для стандартних зразків і стандартного обладнання для випробування. В такому випадку величина $G_{IC}(t) = KC(t) \times 10^4$ є константою матеріалу для обмеженого діапазону швидкостей руйнування матеріалу для квазістатичного руйнування.

КРИТЕРІЇ РУЙНУВАННЯ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ ПРИ ЗІТКНЕННІ З ЛІТАКОМ

Руйнування композитного матеріалу при ударі відбудеться у випадку:

$$\Omega_{K}(t) \geq \Omega_{CK}(t) ,$$

де $\Omega_{\kappa}(t)$ - інтенсивності вивільнення енергії пружної деформації при втраті (руйнуванні) об'єму матеріалу композиту, $\mathcal{Д} \mathscr{K} / \mathfrak{M}^3$; $\Omega_{CK}(t)$ - критичне значення інтенсивності виконаної роботи по втраті (руйнуванню) об'єму матеріалу композиту, $\mathcal{Д} \mathscr{K} / \mathfrak{M}^3$.

Усереднена питома ударна робота руйнування композиту $a_{YK}(t) = \Omega_{CK}(t)$, визначається за формулою:

$$\alpha_{YK}(t) = (\alpha_Y(t) \times A_B + \Omega_M(t) \times A_M) / A_K,$$

де $a_Y(t)$ - питома ударна робота руйнування волокна, що армує матрицю, \mathcal{A} ж/м³; A_B - площа поперечного перерізу волокна, що армує матрицю, м²; $\Omega_M(t)$ - інтенсивності вивільнення енергії пружної деформації матриці у мить руйнування волокна, що армує матрицю, \mathcal{A} ж/м³; A_M – площа елемента основи, яка дорівнює площі чотирьохкутника, вершинами якого є волокна, що армують матрицю, м²; A_K - площа, яка дорівнює $A_B + A_M$.

КРИТЕРІЇ РУЙНУВАННЯ КІНЦЕВОГО ЕЛЕМЕНТУ ЗАЛІЗОБЕТОНУ ПРИ ЗІТКНЕННІ З ЛІТАКОМ

Усереднена питома ударна робота руйнування залізобетону $a_{YSB}(t) = \Omega_{CSB}(t)$ в об'ємі одного кінцевого елементу (КЕ), визначається за формулою:

$$\alpha_{YSB}(t) = (\alpha_Y(t) \times A_S + \Omega_B(t) \times A_B) / A_{SB} ,$$



де $a_{\rm Y}(t)$ - питома ударна робота руйнування сталевої арматури визначеної марки, що армує бетон в межах одного КЕ, визначеного класу, $\mathcal{Д}$ ж/м³; A_s - площа поперечного перерізу арматурного стрижня, що армує бетон в межах одного КЕ, м²; $\Omega_B(t)$ - інтенсивності вивільнення енергії пружної деформації в бетоні у мить руйнування арматури, $\mathcal{Д}$ ж/м³; A_B – площа поперечного перерізу, яка дорівнює площі чотирьохкутника, вершинами якого є арматурні стрижні, що армують бетон, м²; A_{SB} - площа, яка дорівнює $A_s + A_B$.

Якщо припустити, що уся кінетична енергія при випробуванні абсолютно жорстких бетонних мішеней ударами снарядів витрачається тільки на руйнування бетону, тоді:

$$\alpha_{YB}(t) = \Omega_{CB}(t) = \frac{2 \times m \times V_0^2(t)}{\pi \times x_n(t) \times d^2}$$

де m - маса літака, кг, $V_0(t)$ - швидкість літака в мить зіткнення з мішенню, м/с²; $x_n(t)$ - глибина проникнення снаряду в бетонну мішень, м; d - умовний діаметр снаряду, м.

У відповідності до [10, 11] характеристична глибина проникнення снаряду в нескінченно товсту бетонну перешкоду становить:

$$\begin{split} x_n(t) &= \sqrt{17,78 \cdot KNmd \cdot \left(\frac{0,012V_0(t)}{d}\right)^{1.8}} \text{ при } \frac{x_n(t)}{d} \leq 2 \ ; \\ x_n(t) &= 4,445 \cdot KNm \cdot \left(\frac{0,012V_0(t)}{d}\right)^{1.8} + d \text{ при } \frac{x_n(t)}{d} > 2 \ , \end{split}$$

де $x_n(t)$ - глибина проникнення снаряду (літака або його уламка) в бетонну огорожу (будівельну конструкцію), м; *m* - вага снаряда, кг; $V_0(t)$ - швидкість удару, м/с; *N* - коефіцієнт, який залежить від форми кінця снаряда (для плоских кінців 0,72, для тупих кінців *N*=0,84, для сферичних кінців *N*=1,00, для гострих кінців *N*=1,144), для літака приймаємо *N*=0,72; *K* - коефіцієнт, який характеризує міцність бетону, і який визначається за формулою:

$$K = \frac{20000}{\sqrt{f_C^{\,,}}}$$

де f_{c}^{i} - циліндрична міцність бетону при стисканні, Па, (вона пов'язана з динамічною призменною міцністю відношенням $f_{c}^{i} = 1.07 R_{np}^{A}$). Динамічна призменна міцність бетонної огорожі $R_{np}^{A} = 0.3 \times 10^{8}$ Па, циліндрична міцність $f_{c}^{i} = 1.07 R_{np}^{A} = 0.3 \times 10^{8}$ Па.

$$K = \frac{20000}{\sqrt{f_c^{\,\prime}}} = \frac{20000}{\sqrt{0.3591 \cdot 10^8}} = 2.6$$

де *d* - умовний діаметр снаряду, м, що визначається за формулою:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} ,$$

А - умовна площа перерізу літака або його уламка, м².

ВИСНОВКИ

- Встановлено, що використання критерію в'язкого руйнування матеріалів Губера, які застосовуються при статичних і квазістатичних навантаженнях, недостатньо для оцінки міцності будівельних конструкцій при зіткненні з літаком.
- На сьогодення відсутня теорія міцності будівельних конструкцій при зіткненні з літаком.
- Запропоновано критерії руйнування будівельних конструкцій у випадку падіння літака на будівельну споруду, що спираються на стандартні методи випробувань зразків на ударну в'язкість, динамічний розрив металів і на дані з випробувань бетонних мішеней при влученні снаряду.

ЛІТЕРАТУРА

- Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа. Правила и нормы в атомной энергетике: ПиН АЭ 5.6. – М.: Минатомэнерго СССР. - 15 с.
- Аналіз методів оцінки стійкості «Арки» нового безпечного конфайнменту до падіння літака / [Матченко Т.І., Шаміс Л.Б., Первушова Л.Ф., Матченко П.Т.] // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. Вип. 27. Чорнобиль, 2016.
- Huber M.T. (1904). Właściwa praca odkształcenia jako miara wytężenia materiału. Przyczynek do podstaw teoryi wytrzymałości [Proper work of deformation as a measure of material strain. Contribution to the basis of the stability theory]. Lvov: Czasopismo Techniczne - Technical Journal, Vol. 22, 3, 38-40; 4, 49-50; 5, 61-61; 6, 80-81 [in Polish].
- Huber M.T. (1904). O podstawach teoryi wytrzymałości [About the fundamentals of the stability theory]. Lvov: Prace matematycznofizyczne – Writings in mathematics and physics, Vol. 15, 47-59 [in Polish].
- 5. Разрушение. Т.1-7. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1976.
- 6. Матченко Т.І. Критерії якісного стану і сингулярності напруг для тріщин у тривимірних тілах / Матченко Т.І. // Вісник НАУ, 2002. - № 2. - С. 204-210.
- 7. Griffith A.A. (1921). The phenomena of rupture and flow in solids. Phil. Trans. Roy. Soc. of London, A221, 163-197 [in English].
- 8. Griffith A.A. (1925). The theory of rupture. Diezeno and Burgers (Ed.). Proc. Ist. Int. Congress Appl. Mech. (1924), 55-63. Waltman.





- Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. Металлы: ГОСТ 9454-78. – [Дата введения 1979-01-01]. - М.: Издательство стандартов. - 10 с.
- 10. Report of the ASCE Committee on the Impactive and Impulsive Loads (1980). Proceedings from Civil Engineering and Nuclear Power: The Second ASCE Conference (Sept. 15-17, 1980). Vol. V [in English].
- 11. ASCE (1980). Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities. J.D. Stevenson (Ed.) [in English].

REFERENCES

- 1. Normy stroitelnoho proektirovaniia AS s reaktorami razlichnoho tipa. Pravila i normy v atomnoi enerhetike [Rules and regulations for building design of NPP with various types of reactors. Rules and regulations in nuclear power engineering]. PiN Nuclear Power Engineering 5.6. Moscow: Minatomenergo SSSR [in Russian].
- 2. Matchenko T.I., Shamis L.B., Pervushova L.F., & Matchenko P.T. (2016). Analiz metodiv otsinky stiikosti "Arky" novoho bezpechnoho konfainmentu do padinnia litaka [Methods of the assessment analysis of the New Safe Confinement Arch stability with regard to the aircraft crash]. Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chernobyl, 27 [in Ukrainian].
- Huber M.T. (1904). Właściwa praca odkształcenia jako miara wytężenia materiału. Przyczynek do podstaw teoryi wytrzymałości [Proper work of deformation as a measure of material strain. Contribution to the basis of the stability theory]. Lvov: Czasopismo Techniczne - Technical Journal, Vol. 22, 3, 38-40; 4, 49-50; 5, 61-61; 6, 80-81 [in Polish].
- 4. Huber M.T. (1904). O podstawach teoryi wytrzymałości [About the fundamentals of the stability theory]. Lvov: Prace matematycznofizyczne – Writings in mathematics and physics, Vol. 15, 47-59 [in Polish].
- 5. Razrusheniie [Destruction]. (1976). (Vols.1-7). (Trans). Moscow: «Metallurhiia» [in Russian].
- 6. Matchenko T.I. (2002). Kryterii yakisnoho stanu i synhuliarnosti napruh dla trishchyn u tryvymirnykh tilah [Criteria of quality and stresses singularity for cracks in the threedimensional bodies]. Visnyk NAU - Bulletin of NAU, 2, 204-210 [in Ukrainian].
- 7. Griffith A.A. (1921). The phenomena of rupture and flow in solids. Phil. Trans. Roy. Soc. of London, A221, 163-197 [in English].
- 8. Griffith A.A. (1925). The theory of rupture.

Diezeno and Burgers (Ed.). Proc. Ist. Int. Congress Appl. Mech. (1924), 55-63. Waltman.

- 9. Metody ispytaniia na udarnyi izhib pri ponizhennykh, komnatnoi i povyshennykh temperaturakh. Metally [Methods of impact bending test in the conditions of lower, room and elevated temperatures. Metals]. HOST 9454-78. Moscow [in Russian].
- 10. Report of the ASCE Committee on the Impactive and Impulsive Loads (1980). Proceedings from Civil Engineering and Nuclear Power: The Second ASCE Conference (Sept. 15-17, 1980). Vol. V [in English].
- 11. ASCE (1980). Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities. J.D. Stevenson (Ed.) [in English].