

## **ВРАЗЛИВІСТЬ АЕС ПО ВІДНОШЕННЮ ДО ПОВІТРЯНИХ ТЕРАКТІВ**

**С. І. Азаров, Г. А. Сорокін**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Аналізуються проблеми надійності захисних бар'єрів АЕС при направленому падінні літака на неї.

*Ключові слова:* безпека, захисні бар'єри, падіння літака, ядерний реактор

### **Вступ**

Міжнародний тероризм наприкінці ХХ ст. став реальністю в багатьох країнах світу, переступив рамки державних кордонів і набув глобального скоординованого характеру. Достатньо чітко позначився ряд тенденцій міжнародного тероризму: політизація; організований характер дій; орієнтація на масові жертви; жорстокість і нелюдність при застосуванні засобів ураження; розробка і створення, з урахуванням науково-технічних досягнень, нових засобів і зброї масового ураження тощо. Абсолютно новим аспектом екстремальних проявів став "ядерний" і "повітряний" тероризм [1 - 3].

Під "повітряним" тероризмом розуміється незаконне захоплення повітряного судна (ПС), його викрадення та використання для керованого наведення (падіння) на наземні об'єкти з метою нанесення збитку населенню й навколишньому середовищу. За термінологією International Keep of Aviation Organization (ІКАО), "кероване падіння ПС", "Controlled flight into terrain (CFIT)" - це зіткнення пілотованого справного ПС з точковими (цільовими) об'єктами.

За період 1975 - 2004 рр. у всьому світі відбулося 840 актів (за класифікацією ІКАО) незаконного захоплення і використання ПС, унаслідок чого постраждало більше 6000 чоловік.

Трагічні події 11 вересня 2001 р. в США, пов'язані із захопленням терористами відразу декількох ПС, їх керованого падіння на всесвітній центр та інші об'єкти підвищеної важливості, загибеллю тисячі людей, руйнуванням будівель і споруд, ще раз показали факт незахищеності й уразливості будь-яких наземних об'єктів, у тому числі й АЕС, до можливих повітряних терактів.

У зв'язку з цим існує потреба в постійному вдосконаленні нормативно-правових документів та організаційно-технічних заходів, направлених на створення умов, які зводили б до мінімуму акти ядерного тероризму. Задача протидії повітряному тероризму не викликає сумнівів і її необхідно розглядати через призму національної техногенної та екологічної безпеки.

Мета цієї статті полягає в тому, щоб на основі розробленої методики оцінити стан фізичних бар'єрів безпеки реакторної установки ВВЕР-1000 при повітряному теракті.

### **Аналіз вразливості бар'єрів безпеки ядерного реактора при повітряних терактах**

Для моделювання важкої аварії при повітряному теракті проводили розрахунок вибухових процесів, теплових потоків і температур, умови газообміну (динаміка розповсюдження диму та аерозолів), визначення фізичних властивостей горючих матеріалів і будівельних конструкцій за наявності високих температур, параметри тиску вибуху (рис. 1).

У роботі розглянуто наступні сценарії розвитку аварії:

механічний удар ПС по будівельних конструкціях;

внутрішній вибух;

процес горіння авіаційного палива;

комбінація подій.

Аналізувалася наступна інформація:  
 напрям і точка удару ПС, удар ПС у дах цільового об'єкта, що приводить до її цільового пробиття; удар ПС у дах, що приводить до втрати герметичності (без кризного пробиття); удар ПС що не приводить до пошкодження даху; удар ПС в оббудову реактора; тип, маса і швидкість польоту ПС, кількість авіаційного палива тощо.



Рис. 1. Структура моделювання надійності бар'єрів безпеки АЕС.

Проведено чисельне моделювання:  
 вірогідності ураження (попадання) точкового об'єкта (АЕС) ПС;  
 виникнення вибухонебезпечної суміші, розвиток і наслідки вибуху;  
 вогнестійкість залізобетонних і металевих конструкцій та їх граничний стан;  
 граничні значення (за ознакою втрати несучої здатності) відмов будівельних конструкцій аналізованих захисних бар'єрів при вибуху і пожежі.

У процесі аналізу розглядалися нормативні критерії по механічній міцності, вогнестійкості та вибухостійкості конструкцій будівель, споруд та устаткування. Початковими даними для проведення аналізу були також фізико-хімічні, пожежотехнічні характеристики й межі вибухонебезпеки авіаційного бензину (АБ) типу ТС-1 (ГОСТ 10227-86) та ін., ефективна площа цільового об'єкта, конструкції системи та їх компоненти, що піддаються дії ударної хвилі або високих температур.

Для моделювання та розрахунку теплофізичних процесів, напружено-деформаційних та міцнісних властивостей захисних бар'єрів ядерного реактора використовувались аналітичний метод, методи скінченних різниць (МСР) та елементів у прикладних математичних пакетах MATHCAD та MATLAB [4, 5].

Результати розрахунків деформації захисної оболонки (ЗО) при вибуховому навантаженні показано на рис. 2.

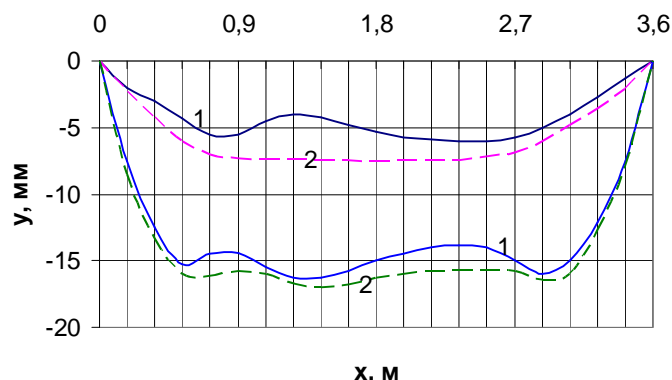


Рис. 2. Динамічна зміна прогину захисної оболонки від стрибка тиску  $\Delta P_{max} = 1,0$  МПа:  
 1 - метод Фур'є; 2 - МСР.

Вплив надлишкового тиску ударної хвилі на ЗО може викликати наслідки різної важкості, тобто ефект руйнування носить імовірнісний характер.

Величину ймовірності ушкодження ЗО (ефект руйнування) будемо визначати функцією Гаусса, що записується як

$$P = f(\text{Pr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}-5} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad (1)$$

На рис. 3 наведено розрахункову ймовірність руйнування ЗО від відстані  $r$  при вибуху пари АБ.

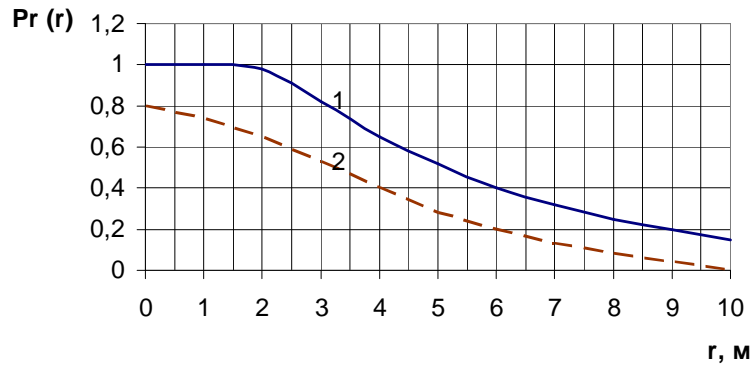


Рис. 3. Залежність імовірності руйнування ЗО від відстані  $r$  при вибуху парів АБ:  
1 –  $m = 80$  т; 2 –  $m = 20$  т.

Результати розрахунків температурних полів, напружень і деформацій ЗО наведено на рис. 4.

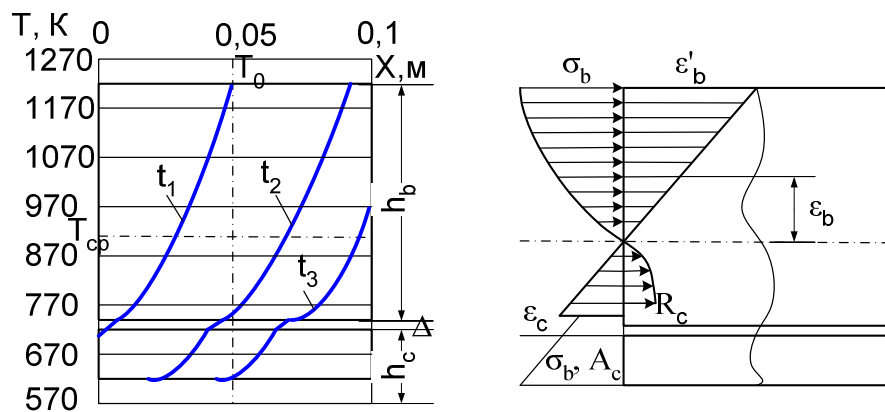


Рис. 4. Розподіл температур, напружень і деформацій у перетині сталобетонної ЗО у різні моменти часу після аварії [6, 7].  $t_1 = 10$  с;  $t_2 = 100$  с;  $t_3 = 1000$  с.

Імовірність втрати цілісності ЗО (крихке руйнування залізобетону) можна представити у вигляді

$$Q(t) = Q(S < S_d), \quad (2)$$

де  $S_d$  – резерв узагальненого опору ЗО у граничному стані.

Перехід ЗО при запроектній аварії з одного стану в інше можна описати як процес Пуассона з дискретним станом і неперервним часом

$$Q(t) = 1 - Q(T_n > t) = 1 - \sum_{m=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^m \exp(-\lambda t)}{m!}, \quad (3)$$

де  $\lambda$  – інтенсивність відмов ЗО.

Залежність імовірності відмов ЗО від падіння ПС буде мати вигляд

$$Q(P, T) = F \left[ \ln \left( \frac{\Delta P}{P_m} \right) \left( \frac{T}{T_m} \right) C_\Sigma \right], \quad (4)$$

тут

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad (5)$$

- функція Гаусса;  $C_\Sigma$  – коефіцієнт варіації вихідних даних (у розрахунку  $C_\Sigma = 0,3$ );  $P_m$  – максимальний надлишковий тиск ( $P_m \geq 150$  кПа);  $T_m$  – максимальна температура на поверхні ЗО ( $T_m \geq 1473$  К).

Результати розрахунків імовірності відмови по герметичності ЗО показав, що її відмова при сполученому впливі надлишкового тиску та високих температур буде розвиватись у наступній послідовності:

Стадія процесу	$\Delta P$ , кПа	T, К
Лінійно-пружне деформування оболонки	55	900
Пластинчата деформація в арматурі	90	1020
Утворення тріщин в бетоні оболонки	120	1270
Утворення крізних тріщин в оболонці	130	1420

При температурі бетону більше 1590 К він розпадається на окремі компоненти, а при температурі більше 1770 К починає плавитись [8].

Результати розрахунків показали, що максимальний перепад тиску  $\Delta P = 0,13$  МПа та підвищення температури до 1400 К на зовнішній поверхні ЗО можуть перевищити критичні значення та призвести до виникнення крізних тріщин в оболонці.

Отримані результати аналізу впливу можливих сполучених навантажень на ЗО та втрати її герметичності є вихідними даними для наступного дослідження процесу проникнення продуктів авіаційного палива, що горить, у внутрішню частину конфайнмента та попадання їх на корпус ядерного реактора.

Особливості виникнення й подальшого розвитку аварії повинні при моделюванні фізичних процесів, що відбуваються на корпусі реактора (КР), урахувувати такі явища:

витікання та розливання авіаційного палива при разовому або неперервному його витіканні;

масу горючих речовин, що попадають на зовнішню поверхню КР;

інтенсивність теплового випромінювання;

зміну межі міцності матеріалу КР при впливі високих температур (межа міцності на розтягування, межа текучості, модуль пружності).

Маса АБ, що попала на поверхню КР при аварії, надійшла самопливом, обчислюється як [9]

$$m = \int_0^{t_k} G(t) dt = G_p t_{розл} + \frac{\pi d_T^2}{4} (\delta \rho), \quad (6)$$

де  $G(t)$  – витрата авіаційного палива, що витікає з ПС через розгерметизовану ЗО (наскрізні тріщини в оболонці);  $t_{розл}$  – час, протягом якого авіаційне паливо витікає з ПС;  $d_T$  – діаметр наскрізних тріщин в оболонці;  $\delta$  – товщина ЗО;  $\rho$  – густина авіаційного палива.

Основним фактором, що визначає параметри теплового навантаження, є вигляд і величина пожежного навантаження. Як правило, для опису й дослідження пожеж ПС при авіакатастрофах за основне пожежне навантаження приймають масу АБ.

Досвід розслідування авіакатастроф показує, що при зіткненні ПС з перешкодою паливо розбризкується на значну відстань, площа пожежі досягає декількох сотень квадратних метрів (400 - 500 м<sup>2</sup> і більше).

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

$$\left. \begin{aligned} S_{m1} &= 0.7l(12+d) & d \leq 10 \\ S_{m2} &= 0.7l(30+d) & d > 10 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де  $l$  - довжина ПС, м;  $d$  - діаметр мідельового перетину фюзеляжу ПС, м.

Знаючи масу палива та площу пожежі, можна визначити тривалість пожежі за формулою

$$\tau = M/(U_M S_{кр}), \quad (8)$$

де  $M$  - маса АБ на початку пожежі, кг;  $U_M$  - питома масова швидкість вигорання, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $S_{кр}$  - площа пожежі, м<sup>2</sup>.

Час  $\tau$ , визначений за формулою (8) для різних типів ПС, змінюється в широких межах від 5 до 40 хв. Натурний експеримент по спалюванню списаного ПС з 20 т пального показав, що за 17 хв літак майже повністю згорів.

На рис. 5 представлено результати обчислень у вигляді температурних полів на зовнішній поверхні КР при розливі 1 т АБ ( $m_T = 0,06$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $d = 10$  м) для різного часу розвитку аварії.

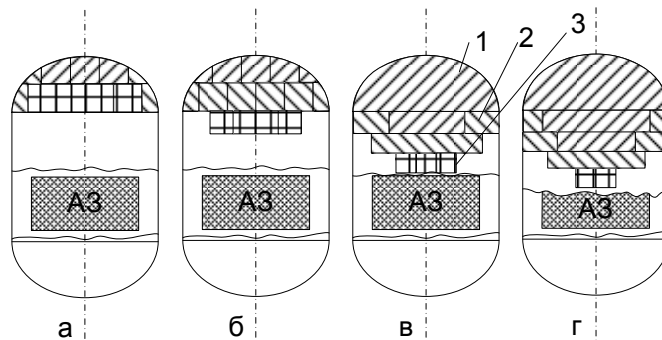


Рис. 5. Моделивання зміни температурних полів на зовнішній поверхні КР:  
1 – 1270 К; 2 – 1070 К; 3 – 970 К; а -  $\tau = 1000$  с; б -  $\tau = 1500$  с; в -  $\tau = 2000$  с; г -  $\tau = 2500$  с.

З рис. 5 видно, що температура в герметичній зоні за 1 год горіння може досягати 1370 К, за цей час температура прогріву внутрішніх поверхонь конструкції КР може досягати 1270 К і більше.

На теперішній час відсутні методи розрахунку напружень від впливу теплового поля при горінні авіаційного палива, що пов'язано як з нелінійністю задачі, так і з недостатньою ясністю розподілу температур у конструкціях КР. Тому може бути виконана лише наближена оцінка величини нормальних напружень для поздовжніх зв'язків [10].

В умовах впливу теплового потоку високої інтенсивності та з високим градієнтом температур матеріал КР отримає значне остаточне деформування, буде відрізнятись загальна несуча властивість, різко зменшиться пластичність та підвищиться хрупкість матеріалу. При важких аваріях КР може втратити свої функції по забезпеченню міцності та герметичності.

Теплофізичні властивості корпусної сталі марки 08X18N10T реактора ВВЕР-1000 такі: температура плавлення 1700 К, температура втрати пружності 1200 К, критична температура 870 К, межа текучості 390 МПа, модуль нормальної пружності  $2,12 \cdot 10^5$  МПа [11, 12].

На рис. 6 показано розраховану залежність зміни кривої «напруження - деформація» для матеріалу КР.

З рис. 6 видно, що нагрів КР до температури порядку 770 К є практично неприйнятним з огляду на міцність. У результаті сукупність впливів – експлуатаційних (подача

холодної води для охолодження) і температурних напружень – може суттєво перевищити не лише допустимі навантаження, але й межу текучості та міцності.

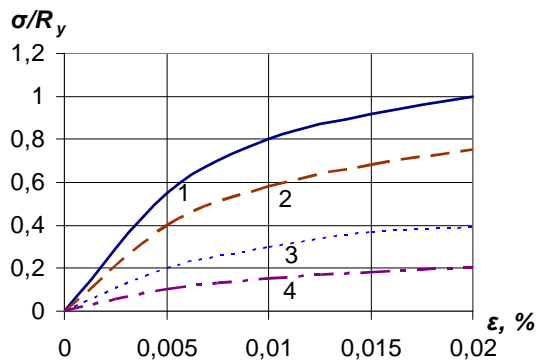


Рис. 6. Зміна властивостей корпусної сталі 08X18N10T при збільшенні температури: 1 –  $T = 770$  K; 2 –  $T = 870$  K; 3 –  $T = 970$  K; 4 –  $T = 1070$  K.

Було виконано аналіз деяких розрахункових сценаріїв оцінки проектних аварій з утворенням у КР «малої течії».

Результати аналізу розрахункового сценарію аварії руйнування КР при витіканні теплоносія за умови спрацювання аварійного захисту ядерного реактора наведено на рис. 7.

На рис. 8 представлено розраховані зміни лінійної потужності та температури в центрі ядерного палива при різних ступенях руйнування КР на основі вихідних даних, наведених на рис. 7.

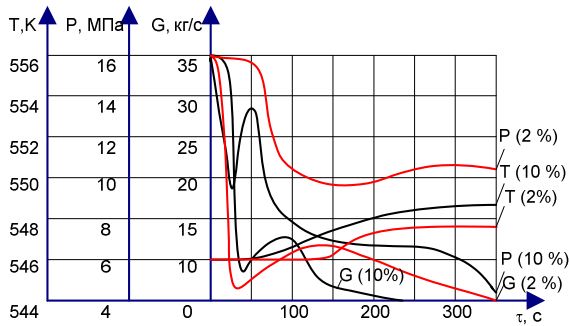


Рис. 7. Зміна параметрів реактора ВВЕР-1000 в аварійному режимі: P – тиск теплоносія; G – витрата теплоносія; T – температура теплоносія на виході з активної зони.

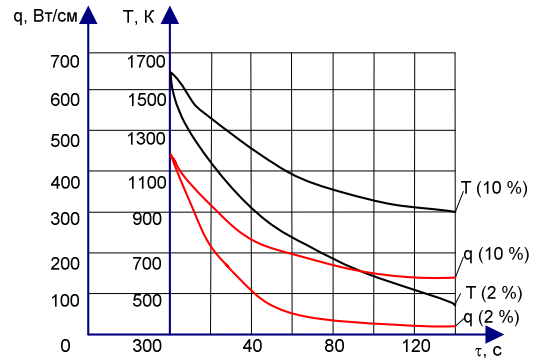


Рис. 8. Зміна лінійної потужності та температури в центрі ядерної таблетки.

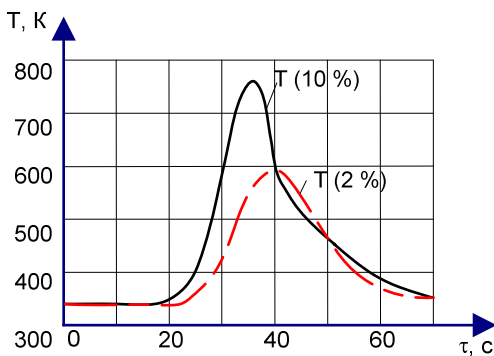


Рис. 9. Зміна температури поверхні оболонки палива.

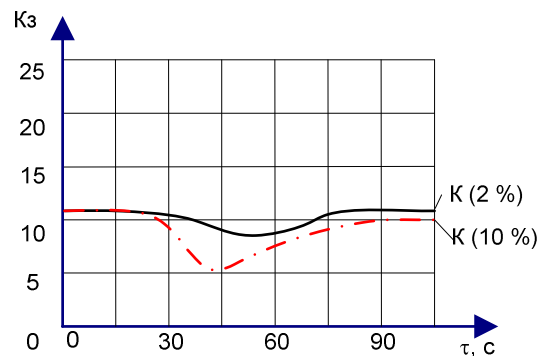


Рис. 10. Мінімальний коефіцієнт запасу до кризи теплообміну в процесі «малої течії».

Температура поверхні оболонки твела при різних ступенях руйнування КР наведена на рис. 9.

На рис. 10 представлено розрахований мінімальний коефіцієнт запасу до кризи теплообміну в активній зоні ядерного реактора при 10 %-ному руйнуванні КР.

Основним параметром, що визначає працездатність твела при аварії, буде максимально допустима температура оболонки  $T_0^{npeo}$ , причому теплотехнічна надійність твела забезпечується при виконанні умови [13 - 15]

$$f(t) = [T_0^{npeo} - T(t)_0^{\max}] > 0, \quad (9)$$

Оскільки температура  $T(t)_0$  є випадковою величиною, розкид якої близько  $T_0^{npeo}$  характеризується дисперсією  $\sigma^2 T(t)_i$ , а закон зміни  $f(t)$  є нормальним унаслідок нормальності величини  $T(t)_0^{npeo}$ , то вірогідність події  $f(t) > 0$  знайдемо з виразу [14]

$$f(t) = 0.5 + \Phi \left[ \frac{T_0^{npeo} - T(t)_0}{\sigma^2 T(t)_i} \right] > 0, \quad (10)$$

де  $\Phi$  - функція Лапласа:

$$\Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^U \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad (11)$$

На рис. 11 представлено розраховану залежність імовірності руйнування твела від максимальної температури на зовнішній поверхні оболонки.

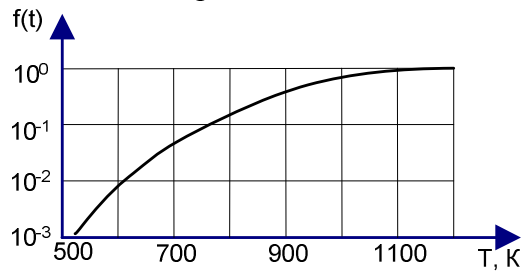


Рис. 11. Залежність імовірності руйнування твела від максимальної температури на зовнішній поверхні оболонки.

Таким чином, виконаний у роботі розрахунковий аналіз аварійного режиму при падінні ПС на ЗО реактора показав, що за критеріями мінімального коефіцієнта запасу до кризи теплообміну ентальпія ядерного палива становить  $\sim 710$  кДж/кг, максимальна температура палива 3070 К, мінімальна температура оболонки 970 К, що вказує на те, що межі міцності перевищені не будуть [16].

## Висновки

1. Для визначення ймовірності відмови ЗО при сполученому впливі ударної хвилі та впливу інтенсивних теплових потоків викладено різні підходи та розроблено методики розрахунку на герметичність та втрату несучої властивості. Проведені чисельні дослідження сталобетонної рівномірно напруженої оболонки при різноманітних тисках, а також нерівномірного нагріву з урахуванням утворення мікротріщин у розтягнутій зоні бетону. Показано, що при розрахунку поля температур по товщині 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, що присвячені дослідженню процесу локальних руйнувань ЗО при динамічних і теплових впливах, показав складний характер їх руйнування. У загальному змісті характер локальних руйнувань встановлюється з умов мінімуму несучої

здатності конструкції ЗО з числа можливих схем її руйнування. При цьому можлива локальна схема руйнування конструкції ЗО у вигляді утворення тріщин на поверхні ( $\Delta P = 0,12$  МПа,  $T = 1100$  К) або складних тріщин ( $\Delta P = 0,13$  МПа,  $T = 1400$  К). Для раціонального використання запасу міцності оболонки необхідно використати додаткові теплові екрани або захист покриття. У наступних проектах необхідно виконувати ЗО з двох циліндричних оболонок: внутрішньої металічної, розрахованої на максимальний надлишковий тиск  $0,2$  МПа та температуру  $1270$  К під час аварії, та зовнішньої, із залізобетону без попереднього напруження, розрахованої на екстремальні зовнішні сполучені впливи (надлишковий тиск  $\Delta P = 0,25$  МПа, температура  $T = 1470$  К та механічний удар з максимальним значенням сили  $200$  МН).

3. Оцінка результатів розрахунку відносної величини глибини проникнення тріщини та товщини оболонки виявили необхідність проведення експериментальних досліджень характеру руйнування залізобетонних плит при комбінованому впливі навантажень.

4. У результаті пролиття та горіння авіаційного палива поверхня КР може піддатися впливу теплового випромінювання факела полум'я, що може призвести до зменшення межі міцності: на розтягування, текучості та модуля пружності, починаючи з температури  $770$  К. Особливо ця дія небезпечна для зони зварних з'єднань верхньої обичайки корпусу з нижньою й опорною, а також зони верхньої обичайки.

5. Аналіз отриманих даних про поведінку захисних бар'єрів АЕС при зовнішніх теплових навантаженнях дає змогу зробити висновок про необхідність більш глибоких досліджень по запобіганню або послабленню наслідків важкої аварії шляхом використання теплоізолюючих матеріалів або активних засобів захисту, у тому числі й з подачею речовин вогнегасіння безпосередньо в герметичну зону. Необхідно розробити надійні теоретичні та експериментальні методи розрахунку міцності ЗО і КР, щоб виключити руйнування залізобетонної ЗО і металу КР та окремих конструкцій ядерного реактора.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Азаров С.І., Сорокін Г.А. Ядерний тероризм і національна безпека // Екологія і ресурси. - 2004. - № 10. - С. 108 - 115.
2. Азаров С.І., Сорокін Г.А. Воздушный терроризм и безопасность АЭС // Ядерні та радіаційні технології. - 2004. - Т.4, № 4. - С. 62 - 66.
3. Сорокін Г.А., Азаров С.І. Анализ уязвимости инфраструктуры ЧАЭС к воздушным терактам // Тези доп. VI конф. Міжнародного Чорнобильського центру, Славутич, 2003. - С. 286 - 287.
4. Сидоренко В.Л., Азаров С.І., Сорокін Г.А. Методика розрахунку несучої здатності балки при динамічному навантаженні // Коммунальное хозяйство городов. - 2007. - Вып. 74. - С. 443 - 447.
5. Азаров С.І., Сорокін Г.А., Сидоренко В.Л. Метод оцінки безпеки захисної оболонки ядерного реактору при зовнішніх впливах // Зб. наук. праць СНЯЕП та П. - 2009. Вип. 1(29). - С.207-215.
6. Азаров С.І., Сорокін Г.А. Моделирование пожара на АЭС при авиакатастрофе // Промышленная теплотехника. - 2003. - Т. 25, № 4. - С. 368 - 369.
7. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Сорокін Г.А., Єременко С.А. Розрахунок несучої здатності бетонної балки в умовах пожежі // Проблемы пожарной безопасности. - 2007. - Вып. 21. - С. 21 - 27.
8. Абдурагимов И.М. Физико-химические основы развития и тушения пожара: Учебное пособие ВИПТШ МВД СССР / И. М. Абдурагимов, В. Ю. Говоров, В. Е. Макаров. - М., 1980.
9. Азаров С.І., Сорокін Г.А. Розрахунок температурних процесів, що відбуваються в захисній оболонці АЕС при авіакатастрофі // Ядерная и радиационная безопасность. - 2009. - № 2. Т.12. - С. 23 - 29.
10. Модуль расчета температуры в корпусе ядерного реактора при различных изменениях тепло-выделения в активной зоне / С. И. Азаров, Г. А. Сорокин, Т. В. Сорокина и др. // Промышленная теплотехника. - 2008. - Т. 30, № 1 - С. 70 - 76.
11. Реакторная установка В-320. Техническое обоснование безопасности реакторной установки 320.00.00.00.000 Дб1.
12. Корпус 1152.02.70.000. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 1160.70.000 ТО.



13. *Азаров С.И.* Расчетные исследования теплотехнической надежности ТВЭЛа при различных законах изменения энерговыделения и температур // Матеріали щоріч. наук. конф. ІЯД НАН України (Зб. доп.). - К., 1995. – С. 228 - 230.
14. *Азаров С.И., Сорокин Г.А., Сорокина Т.В.* Расчёт температуры в ТВЭЛе ядерного реактора // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т. 27, № 6. – С. 70 - 75.
15. *Сорокіна Т.В., Азаров С.І., Сорокін Г.А.* Порівняння розрахункових методів для визначення теплофізичного стану твела ядерного реактора // Ядерная и радиационная безопасность. – 2008. - № 1. – С. 26 - 31.
16. *Комплекс* кассет ВВЭР-1000 (тип В-302, В-320, В-338). Каталогное описание У0401.04-00.000 ДКО.

### **УЯЗВИМОСТЬ АЭС ПО ОТНОШЕНИЮ К ВОЗДУШНЫМ ТЕРАКТАМ**

**С. И. Азаров, Г. А. Сорокин**

Анализируются проблемы надежности защитных барьеров АЭС при направленном падении самолета на нее.

*Ключевые слова:* безопасность, защитные барьеры, падение самолета, ядерный реактор.

### **VULNERABILITY OF NPP IN RELATION TO AIR TERRORIST ACTS**

**S. I. Azarov, G. A. Sorokin**

The article analyzes the problem of reliability of protective barriers of nuclear power plants due aircraft crash on it.

*Keywords:* security, safety barriers, air crash, nuclear reactor.

Надійшла до редакції 09.04.09