

В. І. Скалозубов, Ю. С. Кацарський, Є. О. Мазур, В. Ю. Кочнева, Д. О. Климчук

Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології НАН України, «Одеської політехніки» та Мінекології України, пр. Шевченка, 1, Одеса, 65044

Кваліфікація періодичності випробувань систем безпеки при збільшенні тривалості паливних кампаній ядерних енергоустановок

Ключові слова:
кваліфікація,
система безпеки,
ядерна енергоустановка

На основі проведеного аналізу результатів імовірнісного аналізу безпеки ядерних енергоустановок з ВВЕР установлено необхідність розробки альтернативних методів кваліфікації періодичності випробувань систем безпеки в режимах збільшення тривалості паливних кампаній ядерних реакторів. Розроблено альтернативний ризик-орієнтований метод кваліфікації періодичності випробувань активних і пасивних систем безпеки в режимах збільшення тривалості паливних кампаній. Критерій кваліфікації розробленого методу — імовірність відмови систем управління аваріями для трьох груп вихідних аварійних подій: теча реакторного контура до гермооб'єму ядерної енергоустановки, міжконтурні течії через парогенератор та вихідні події з герметичним реакторним контуром. Умови кваліфікації розробленого методу — забезпечення проектного показника надійності систем управління аваріями в режимах збільшення тривалості паливних кампаній. На основі розробленого методу кваліфікації встановлено: необхідні модернізації періодичності планових випробувань активних систем безпеки на потужності реактора; відсутність підстав необхідності кваліфікації періодичності планових випробувань пасивних систем безпеки в режимах збільшення тривалості паливних кампаній.

Актуальність проблеми

Впровадження стратегій експлуатації ядерних енергоустановок (ЯЕУ) в умовах підвищеної номінальної потужності та/або збільшеної тривалості робочих режимів реакторів (збільшеної тривалості паливних кампаній — ЗТПК) може забезпечити значне підвищення ефективності експлуатації атомних електростанцій (АЕС) — збільшення коефіцієнта використання встановленої потужності до 10 % [1–3]. Особливо актуальним є впровадження стратегій за підвищеної номінальної потужності та/або ЗТПК у сучасних екстремальних умовах воєнного часу

України внаслідок руйнування або окупації значної частини енергогенеруючих об'єктів і безперервних пошкоджень або руйнувань критичної енергетичної інфраструктури.

Однак впровадження стратегій ЗТПК визначає необхідність модернізації стратегії планових випробувань систем безпеки (СБ) у період планово-попереджувальних ремонтів (ППР) енергоблоків АЕС.

Наразі на українських АЕС із реакторами типу ВВЕР установлено проектну щорічну періодичність планових випробувань СБ у період ППР енергоблоків.

Активні багатоканальні СБ ЯЕУ з ВВЕР, що забезпечують подачу середовища насосами або компресо-

рами до об'ємів із протитиском, проходять планові випробування також і в робочих режимах реактора під час експлуатації на потужності.

Пасивні СБ ЯЕУ, що забезпечують подачу середовища за рахунок природного перепаду тиску (наприклад, запобіжні клапани реактора чи парогенератора), проходять планові випробування тільки в період ППР. Тому при переході на стратегію ЗТПК необхідна кваліфікація вимушеної зміни періодичності планових випробувань СБ у період ППР енергоблоків АЕС, що й визначає актуальність цієї роботи.

Аналіз результатів імовірнісного аналізу безпеки ЯЕУ

Основний показник (критерій) ядерної безпеки ЯЕУ в методології імовірнісного аналізу безпеки (ІАБ) — частота пошкодження активної зони (ЧПАЗ).

Визначальні параметри ЧПАЗ [1–3]:

частота вихідної події аварії (ВПА), 1/рік;

імовірність відмови критичних для забезпечення безпеки систем управління аваріями (СУА) для кожної групи ВПА (Р).

Проведений у роботах [1–11] аналіз результатів ІАБ ЯЕУ з ВВЕР дозволяє сформулювати такі узагальнення:

показники ймовірності відмови окремих пасивних СБ (наприклад, запобіжних клапанів реактора та парогенератора) надмірно завищено, тому що в більшості випадків вони базуються на статистиці порушень, некритичних для працездатності та надійності цих СБ;

значна невизначеність та/або недостатня обґрунтованість показників імовірності ВПА, які в більшості випадків встановлюються апіорі (наприклад, ВПА «Повне знеструмлення енергоблоків АЕС», смерчі, затоплення проммайданчиків АЕС, падіння великих/вибухонебезпечних об'єктів).

Останнє твердження можливо продемонструвати на наведених нижче характерних прикладах.

1. В ІАБ ВВЕР ВПА «Повне тривале знеструмлення енергоблоку» (аналог вихідної події ядерних аварій на АЕС «Фукусіма») було апіорі прийнято приблизно 10^{-7} 1/рік в умовах повної відмови СУА ($P = 1$). Тому «вклад» цієї ВПА у гранично допустиме значення ЧПАЗ (10^{-4} – 10^{-5} 1/рік) був несуттєвим, що визначило неперіоритетність для безпеки ВПА з повним знеструмленням енергоблоків та відсутністю відповідних протиаварійних заходів.

Однак наслідки та уроки Фукусімської аварії визначили необхідність враховувати в аналізі безпеки

відносно малоїмовірні аварійні події, які мають катастрофічні екологічні наслідки.

В екстремальних умовах воєнного часу в Україні тільки за три роки відбулося кілька десятків аварійних зупинок енергоблоків АЕС з причини знеструмлення.

2. В ІАБ ВВЕР в аналізі впливу зовнішніх екстремальних подій на показник ЧПАЗ апіорі та без необхідних обґрунтувань прийнято повну відмову СУА ($P = 1$) за будь-якого класу інтенсивності смерчів (торнадо), але ВПА «Смерч» прийнято на декілька порядків меншою за граничне допустиме значення ЧПАЗ, що також визначило неперіоритетність впливу зовнішніх екстремальних подій на умови безпеки енергоблоків.

Прийняте в ІАБ допущення щодо ВПА «Смерч» суперечить реальним зонам смерченебезпеки України [11], а допущення повної відмови СУА ЯЕУ за будь-якого класу інтенсивності смерчів також є необґрунтованим і суперечить багаторічному практичному досвіду щодо впливу екстремальних природних явищ на умови безпеки АЕС України [11].

В екстремальних умовах воєнного часу України внаслідок численних ракетних атак відбулися серйозні пошкодження й руйнування ряду енергогенеруючих об'єктів та численні пошкодження й руйнування критичної інфраструктури енергетики.

За визнанням експлуатуючої організації ТЕРСО виключалась можливість затоплення цунамі проммайданчика АЕС «Фукусіма» (розташованої на висоті 10 м над морем), тому що максимальна розрахункова висота хвилі не більша за 5 м, і також було передбачено систему хвилерізів висотою більш за 4 м. Однак унаслідок запроектного землетрусу висота хвилі біля узбережжя досягла більш ніж 14 м, що призвело до затоплення проммайданчика і катастрофічних наслідків.

На основі результатів ІАБ розроблено ризик-орієнтовані методи модернізації стратегій планових випробувань/ремонтів СБ [11, 12], які базуються на принципі ймовірнісної оцінки впливу відносного збільшення $\Delta\text{ЧПАЗ}$ внаслідок збільшення періодичності випробувань СБ щодо базового значення ЧПАЗ_0 .

Умови кваліфікації такого ризик-орієнтованого підходу модернізації стратегії періодичності планових випробувань/ремонтів СБ [11]:

$$\frac{\Delta\text{ЧПАЗ}}{\text{ЧПАЗ}_0} \ll 1.$$

Основні недоліки ризик-орієнтованого підходу до модернізації стратегії періодичності планових випробувань і ремонтів СБ, що базується на результатах ІАБ наведені нижче.

1. Фактично допускається «штучне» зниження безпеки ЯЕУ з метою підвищення ефективності експлуатації, що суперечить вимогам ядерного законодавства України [1–3, 11].

2. На базові значення ЧПАЗ₀ найбільше впливають відмови із загальної причини та/або помилкові дії персоналу під час управління аварією [11]. Тому базові значення ЧПАЗ₀ можуть бути «не чутливими» до скорочення частоти випробування чи ремонту СБ.

Таким чином, актуальною є розробка альтернативних ризик-орієнтованих методів кваліфікації стратегій випробувань СБ у режимах ЗТПК ядерних реакторів, що базуються на показниках (критеріях) та умовах кваліфікації забезпечення проектної надійності і не залежать від невизначеності ймовірності ВПА.

Метод кваліфікації періодичності випробувань СБ в умовах ЗТПК

1. Критерій кваліфікації періодичності планових випробувань СБ в умовах ЗТПК — ймовірність відмови СУА щодо забезпечення функцій безпеки Р, що визначається добутками П ймовірностей відмов критичних для безпеки активних P_{AS} і пасивних P_{PS} СБ:

$$P = \prod_{i=1}^{N_{AS}} P_{ASi}(T/n_{AS}, \lambda_{AS})_i \prod_{j=1}^{N_{PS}} P_{PSj}(T, \lambda_{PSj})_j, \quad (1)$$

де P_{ASi} — ймовірність відмови i -ї активної СБ; P_{PSj} — ймовірність відмови j -ї пасивної СБ; T — тривалість паливної кампанії в міжремонтний період енергоблоку; n_{AS} — кількість планових випробувань активних СБ у міжремонтний період енергоблоку; λ_{ASi} , λ_{PSj} — ймовірнісний показник інтенсивності потоку накопичення «прихованих» відмов [1–3] у міжремонтний період i -ї активної та j -ї пасивної СБ. Параметри λ_{ASi} , λ_{PSj} визначаються за статистикою результатів планових випробувань.

2. Умова кваліфікації періодичності планових випробувань СБ в умовах ЗТПК — забезпечення збереження надійності СУА при ЗТПК і проектній тривалості паливної кампанії

$$P_m(T_m) \leq P_D(T_D), \quad (2)$$

де P_m , P_D — імовірність відмови СУА в умовах ЗТПК T_m і проектної тривалості паливної кампанії T_D .

3. Для спрощення аналізу приймаються лінійні апроксимації ймовірностей накопичення «прихова-

них» відмов у активних і пасивних СБ у робочих режимах реактора на потужності:

$$P_{AS} \leq \lambda_{AS} T / n_{AS}, \quad (3)$$

$$P_{PS} \leq \lambda_{PS} T. \quad (4)$$

Тоді, враховуючи (3) і (4), умова кваліфікації СУА:

$$\prod_{i=1}^{N_{AS}} (\lambda_{AS} T_m / n_{ASm})_i \prod_{i=1}^{N_{PS}} (\lambda_{PS} T_m)_i \leq \prod_{i=1}^{N_{AS}} (\lambda_{AS} T_D / n_{ASD})_i \prod_{i=1}^{N_{PS}} (\lambda_{PS} T_D)_i, \quad (5)$$

де n_{ASm} , n_{ASD} — кількість випробувань активних СБ на потужності реактора в умовах ЗТПК і проектної тривалості паливної кампанії.

Склад критичних для безпеки активних і пасивних СБ визначається ВПА.

ВПА «Максимальна проектна аварія (МПА)» — розрив головного циркуляційного трубопроводу.

Критичні СБ для ВПА МПА [1–3]:

пасивна СБ гідроємностей системи аварійного охолодження активної зони реактора (ГЕ САОЗ);

активна система аварійного охолодження активної зони реактора низького тиску (САОЗ НТ).

ВПА «Міжконтурні течії через парогенератор (ПГ)» — течії або розриви теплообмінних труб ПГ.

Критичні СБ для ВПА «Міжконтурні течії через ПГ» у загальному випадку [1–3]:

активна система підживлення та регулювання концентрації бору в реакторному контурі (ТК);

активна система аварійного охолодження активної зони реактора високого тиску (САОЗ ВТ);

активна САОЗ НТ;

активна система аварійного підживлення ПГ електронасосами (АЖЕН);

пасивна система пароскидальних пристроїв ПГ (ПСП ПГ).

ВПА «Аварійна зупинка з герметичним реакторним контуром» — знеструмлення енергоблоку, заклинювання й відмови головних циркуляційних насосів, зовнішні екстремальні явища та ін.

Критичні СБ для ВПА «Аварійна зупинка з герметичним реакторним контуром» [1–3]:

активна АЖЕН;

пасивна система імпульсно-запобіжного пристрою компенсатора тиску (ІЗП КТ);

пасивна ПСП ПГ.

Умова кваліфікації (5) для ВПА МПА:

$$\frac{\lambda_{AS1} \lambda_{PS1}}{n_{ASm}} T_m^2 \leq \frac{\lambda_{AS1} \lambda_{PS1}}{n_{ASD}} T_D^2, \quad (6)$$

де $\lambda_{AS1}, \lambda_{PS1}$ — інтенсивність потоку «прихованих» відмов САОЗ НТ і ГЕ САОЗ.

З рівняння (6) випливає умова кваліфікації модернізації періодичності планових випробувань для ВПА МПА щодо кількості випробувань САОЗ НТ у міжремонтний період за стратегією ЗТПК:

$$\frac{\lambda_{AS1} \lambda_{PS1}}{n_{ASm}} T_m^2 \leq \frac{\lambda_{AS1} \lambda_{PS1}}{n_{ASD}} T_D^2. \quad (7)$$

Умова кваліфікації (5) для ВПА «Міжконтурні течі через ПГ»:

$$\frac{\lambda_{AS1} \lambda_{AS2} \lambda_{AS3} \lambda_{AS4} \lambda_{PS2}}{n_{ASm}^4} T_m^5 \leq \frac{\lambda_{AS1} \lambda_{AS2} \lambda_{AS3} \lambda_{AS4} \lambda_{PS2}}{n_{ASD}^4} T_D^5, \quad (8)$$

де $\lambda_{AS2}, \lambda_{AS3}, \lambda_{AS4}, \lambda_{PS2}$ — інтенсивність потоку «прихованих» відмов СБ ТК, САОЗ ВТ, АЖЕН і ПСП ПГ.

З рівняння (8) випливає умова кваліфікації модернізації періодичності планових випробувань для ВПА «Міжконтурні течі через ПГ» у міжремонтний період ЗТПК:

$$n_{ASm} = n_{ASD} \left(\frac{T_m}{T_D} \right)^{5/4}. \quad (9)$$

Умова кваліфікації (5) для ВПА «Аварійна зупинка з герметичним реакторним контуром»:

$$\frac{\lambda_{AS4} \lambda_{PS2} \lambda_{PS3}}{n_{ASm}} T_m^3 = \frac{\lambda_{AS4} \lambda_{PS2} \lambda_{PS3}}{n_{ASD}} T_D^3, \quad (10)$$

де λ_{PS3} — інтенсивність потоку «прихованих» відмов ІЗП КТ.

З рівняння (10) випливає умова кваліфікації модернізації періодичності планових випробувань для ВПА «Аварійна зупинка з герметичним реакторним контуром»:

$$n_{ASm} = n_{ASD} \left(\frac{T_m}{T_D} \right)^3. \quad (11)$$

Результати розрахунків за формулами (7), (9) і (11) представлено на рисунку.

Аналіз отриманих результатів

1. Установлені умови кваліфікації модернізації періодичності планових випробувань у режимах ЗТПК (7), (9) і (11) враховують необхідний перелік проектних ВПА та склад критичних для безпеки СБ ЯЕУ з ВВЕР.

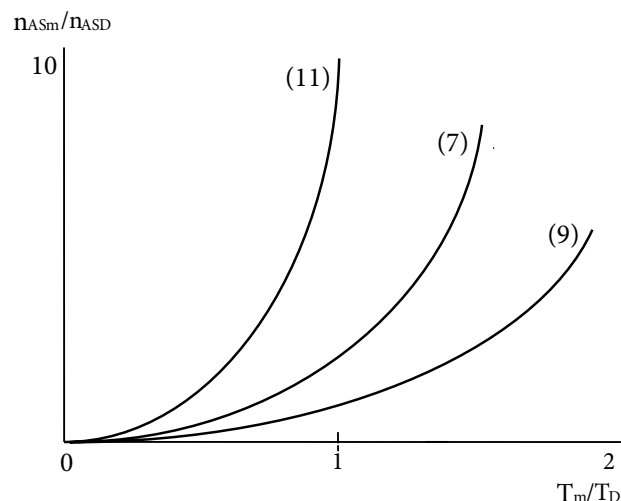


Рис. 1. Результати розрахунків

2. Умови кваліфікації модернізації періодичності планових випробувань СБ у режимах ЗТПК (2) можуть бути забезпечені модернізацією періодичності планових випробувань тільки активних СБ.

Зокрема, при переході на півторарічну паливну кампанію з умов кваліфікації (7), (9) і (11) за регламентованої проектом частоти планових випробувань каналу активної СБ у міжремонтний період енергоблоків (одне випробування на три місяці [1–3]) впливає середня частота планових випробувань для кожного каналу: САОЗ НТ, ТК та САОЗ ВТ — два випробування на три місяці, АЖЕН — щомісячні випробування.

3. Збільшення частоти (зменшення періодичності) планових випробувань впливає на показники надійності СБ двох протилежних ефектів: з одного боку, зменшення періодичності планових випробувань збільшує ймовірність виявлення «прихованих» відмов — позитивний ефект; з іншого боку, надмірна частота планових випробувань збільшує знос і деградацію та зменшує залишковий ресурс обладнання — негативний ефект.

Тому для активних СБ необхідна оптимізація періодичності планових випробувань у режимі ЗТПК.

4. Відсутні підстави необхідності кваліфікації модернізації періодичності планових випробувань пасивних СБ (ІЗП КТ, ПСП ПГ), які проходять планові випробування тільки в період ремонтних кампаній енергоблоків, у режимах ЗТПК, тому що домінуючий вплив на загальний показник надійності СУА (1) визначається найменш надійними СБ. Згідно з численними результатами планових випробувань СБ

ЯЕУ з ВВЕР (наприклад, [1–3]) показники надійності активних СБ значно менші за показники надійності пасивних СБ ($\lambda_{AS} \gg \lambda_{PS}$).

Висновки

1. На основі проведеного аналізу результатів ІАБ ЯЕУ з ВВЕР встановлено необхідність розробки альтернативних методів кваліфікації періодичності випробувань СБ в режимах ЗТПК ядерних реакторів.

2. Розроблено альтернативний ризик-орієнтований метод кваліфікації періодичності випробувань активних і пасивних СБ у режимах ЗТПК.

3. Критерій кваліфікації розробленого методу – ймовірність відмови СУА для трьох груп вихідних аварійних подій: теча реакторного контуру до гермооб'єму ЯЕУ, міжконтурні течії через ПГ та вихідні події з герметичним реакторним контуром.

4. Умови кваліфікації розробленого методу – забезпечення проектного значення показника надійності СУА в режимах ЗТПК.

5. На основі розробленого методу кваліфікації встановлено:

необхідні модернізації періодичності планових випробувань активних СБ на потужності реактора;

відсутність підстав необхідності кваліфікації періодичності планових випробувань пасивних СБ в режимах збільшення тривалості паливних кампаній.

Список використаної літератури

1. Научно-технические основы мероприятий повышения безопасности АЭС с ВВЭР / под ред. А. А. Ключникова. – Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2010. – 200 с.
2. Развитие и оптимизация систем контроля атомных электростанций с ВВЭР / под ред. А. А. Ключникова. – Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2008. – 506 с.
3. Основы управления запроектными авариями с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР / под ред. А. А. Ключникова. – Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2010. – 400 с.
4. Повышение экологической безопасности атомной энергетики Украины в постфукусимский период / под ред. В. И. Скалозубова. – Киев : А.С.К., 2013. – 128 с.
5. Тяжелые аварии на атомных станциях с корпусными ядерными реакторами. Основы моделирования и анализ / под ред. В. И. Скалозубова. – Одесса : Од. национ. политехн. ун-т, 2015. – 320 с.
6. Підвищення безпеки ядерної енергетики з урахуванням уроків важких аварій / В. А. Кондратюк,

Є. М. Письменний, О. М. Верінов [та ін.] // Ядерна та радіаційна безпека. – 2022. – № 3 (95). – С. 76–81.

7. Скалозубов В. Безопасность диверсификации ядерного топлива. Анализ условий безопасности при диверсификации ядерного топлива атомных электростанций / В. Скалозубов, В. Гриб, В. Спинов. – Lambert Academic Publishing, 2020. – 64 с.
8. Method of analysis of thermophysical properties and composition of nuclear fuel during modernization of active zones of nuclear power reactors / V. Vashchenko, V. Skalozubov, I. Korduba [et al.] // Ecological Engineering and Environmental Technology. – 2023. – Vol. 6 (24). – P. 186–191.
9. The method of express analysis of nuclear and ecological safety during the modernization of nuclear fuel / V. I. Skalozubov, S. I. Melnik, V. M. Vashchenko [et al.] // Journal of Geology, Geography and Geoecology. – 2023. – Vol. 2 (32). – P. 388–395.
10. Порівняльний метод кваліфікації систем безпеки ядерних енергоустановок з ВВЕР-1000 та AP1000 / В. І. Скалозубов, В. А. Кондратюк, О. А. Дорож, В. І. Флатов // Ядерна енергетика та довкілля. – 2023. – № 1 (26). – С. 3–8.
11. Комплекс методов переоценки безопасности атомной энергетики Украины с учетом уроков экологических катастроф в Чернобыле и Фукусиме / под ред. В. И. Скалозубова. – Одесса : Астропринт, 2013. – 244 с.
12. Criteria for conditions of hydrodynamic instability of the coolant in accidents with reactor circuit leaks / V. Kondratyuk, Ju. Komarov, O. Dorozh, V. Filatov // Proc. of Odesa Polytechnic University. – 2022. – Vol. 2 (66). – P. 52–57.

**V. I. Skalozubov, Yu. S. Katsarskyi, Ye. O. Mazur,
V. Yu. Kochnieva, D. O. Klymchuk**

*Interagency Center for Fundamental Scientific Research
in Energy and Ecology Sector, 1, Shevchenko Ave,
Odesa, 65044*

Qualification of Safety System Testing Periodicity with Increasing Fuel Campaign Time at Nuclear Power Facilities

Based on the analysis of the results of the probabilistic safety analysis of nuclear power facilities with VVER, the need to develop alternative methods for qualifying safety system testing periodicity in modes of increasing the time of nuclear reactor fuel campaigns has been recognized. An alternative risk-informed method for qualifying the

periodicity of tests of active and passive safety systems in modes of increasing the time of fuel campaigns has been developed. The qualification criterion of the developed method is the probability of failure of accident control systems for three groups of initial accident events: reactor circuit leakage to the containment of the nuclear power facility, inter-circuit leaks in the steam generator, and initial events with a leak proof reactor circuit. The qualification conditions of the developed method are ensuring the design reliability indicator of accident control systems in modes of increasing the time of fuel campaigns. Based on the developed qualification method, the following has been recognized: it is necessary to modernize the periodicity of scheduled tests of active safety systems at reactor power; lack of grounds for the need to qualify the periodicity of scheduled tests of passive safety systems in modes of increasing the time of fuel campaigns.

Keywords: qualification, safety system, nuclear power facility.

References

1. Klyuchnikov A. A. (ed.) (2010). *Nauchno-tehnicheskie osnovy meropriyatiy povysheniya bezopasnosti AES s VVER* [Scientific and technical basics of measures to improve the safety of NPPs with VVER]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 200 p. (in Rus.)
2. Klyuchnikov A. A. (ed.) (2008). *Razvitie i optimizatsiya system kontrolya atomnykh elektrostantsiy s VVER* [Development and optimization of control systems for nuclear power plants with VVER]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 506 p. (in Rus.)
3. Klyuchnikov A. A. (ed.) (2010). *Osnovy upravleniya zaproektnymi avariymi s poterey teplonositelya na AES s VVER* [Basics for beyond design basis loss-of-coolant accident management at NPPs with VVER]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 400 p. (in Rus.)
4. Skalozubov V. I. (ed.) (2013). *Povyshenie ekologicheskoy bezopasnosti atomnoy energetiki Ukrainy v postfukusimskiy period* [Improving the ecological safety of Ukrainian nuclear energy in the post-Fukushima period]. Kyiv: A.S.K., 128 p. (in Rus.)
5. Skalozubov V. I. (ed.) (2015). *Tyazhelye avarii na atomnykh stantsiyah s korpusnymi yadernymi reaktorami. Osnovy modelirovaniya i analiz* [Severe accidents at nuclear power plants with pressure vessel nuclear reactors. Basics for modelling and analysis]. Odessa: Odessa Polytechnic National University, 320 p. (in Rus.)
6. Kondratyuk V., Pysmennyi Y., Verinov O., et al. (2022). Pidvyshchennia bezpeky yadernoi enerhetyky z urakhuvanniam urokiv vazhkykh avarii [Improvement of nuclear safety taking into account the lessons learned from severe accidents]. *Nuclear and Radiation Safety*, vol. 3 (95), pp. 76–81.
7. Skalozubov V., Grib V., Spinov V. (2020). *Bezopasnost diversifikatsii yadernogo topliva. Analiz usloviy bezopasnosti pri diversifikatsii yadernogo topliva atomnykh elektrostantsiy* [Safety of nuclear fuel diversification. Analysis of safety conditions during nuclear fuel diversification at nuclear power plants]. Lambert Academic Publishing, 64 p. (in Rus.)
8. Vashchenko V., Skalozubov V., Korduba I., et al. (2023). Method of analysis of thermophysical properties and composition of nuclear fuel during modernization of active zones of nuclear power reactors. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, vol. 6 (24), pp. 186–191.
9. Skalozubov V. I., Melnik S. I., Vashchenko V. M., et al. (2023). The method of express analysis of nuclear and ecological safety during the modernization of nuclear fuel. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, vol. 2 (32), pp. 388–395.
10. Skalozubov V. I., Kondratiuk V. A., Dorozh O. A., Filatov V. I. (2023). [Comparative method of qualifying safety systems of nuclear power plants with VVER-1000 and AP1000]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 1 (26), pp. 3–8. (in Ukr.)
11. Skalozubov V. I. (ed.) (2013). *Kompleks metodov pereotsenki bezopasnosti atomnoy energetiki Ukrainy s uchetom urokov ekologicheskikh katastrof v Chernobyle i Fukusime* [A set of methods for reviewing the safety of nuclear energy in Ukraine, taking into account the lessons of ecological disasters in Chernobyl and Fukushima]. Odessa: Astroprint, 244 p. (in Rus.)
12. Kondratyuk V., Komarov Ju., Dorozh O., Filatov V. (2022). Criteria for conditions of hydrodynamic instability of the coolant in accidents with reactor circuit leaks. *Proceeding of Odessa Polytechnic University*, vol. 2 (66), pp. 52–57.

Надійшла / Received 14.02.2025

Рекомендована до друку / Accepted 06.10.2025