

Підвищення безпеки ядерної енергетики з урахуванням уроків важких аварій

- **Кондратюк Вадим Анатолійович**, канд. техн. наук, доц.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5035-311X>
- **Письменний Євген Миколайович**, д-р техн. наук, проф.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6403-6596>
- **Верінов Олексій Миколайович**
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0718-1532>
- **Філатов Володимир Іванович**, канд. техн. наук
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3046-3546>
- **Остапенко Іван Анатолійович**
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3980-1609>

Уроки відомих важких (ядерних) аварій визначають необхідність подальшого підвищення безпеки ядерних енергоустановок. У напрямках кваліфікації та модернізації систем управління аваріями це насамперед стосується модернізації системи аварійного електропостачання і модернізації пасивних систем безпеки для подолання аварій з повним тривалим знеструмленням енергоблоків, систем пасивного відведення тепла. Важливим напрямом є зменшення обмежень застосування імовірнісних та детерміністичних методів об'єктивної оцінки рівня безпеки є покращення та розробка сучасних експлуатаційних інструкцій / керівництв управління аваріями із відносно малої ймовірності подій, що мають катастрофічні наслідки. Основні обмеження застосування імовірнісних методів аналізу безпеки пов'язані з недостатньою обґрунтованістю ймовірнісних критеріїв та параметрів безпеки. Основні обмеження застосування відомих детерміністичних методів аналізу безпеки пов'язані з недостатньою фізичною обґрунтованістю окремих параметрів математичних моделей розрахункових кодів, а також ефектами розходження кодів та користувачів. Під час моделювання аварій загалом необхідно враховувати критерії безпеки, встановлені по відношенню до ядерного палива, оболонок ТВЕЛ, умови виникнення парових вибухів та різних видів теплогідродинамічної нестійкості.

Ключові слова: аварія, безпека, детерміністичні методи, імовірнісні методи, ядерна енергетика.

© Кондратюк В. А., Письменний Є. М., Верінов О. М., Філатов В. І., Остапенко І. А., 2022

Пріоритетний напрям подальшого розвитку світової ядерної енергетики – підвищення ядерної та радіаційної безпеки ядерних енергоустановок (ЯЕУ). Основні підходи реалізації цього напряму пов'язані з кваліфікацією та модернізацією систем управління аваріями з метою запобігання важким аваріям та руйнівним парогазовим вибухам, підвищення ефективності управління аваріями для подолання серйозних екологічних наслідків.

Основні загальні уроки важких аварій на 2-му енергоблоці АЕС «Три-Майл-Айленд» у 1979 році, на 4-му блоці Чорнобильської АЕС у 1986 році та на АЕС «Фукусіма-1» (Fukushima-Daiichi) у 2011 році [1] – [4] можуть бути сформульовані так:

Урок 1. Наявними можуть бути окремі конструкційно-технічні недоліки ЯЕУ в запобіганні та управлінні важкими аваріями;

Урок 2. Може бути недостатньою регламентно-інструкційна підготовленість персоналу стосовно запобігання та управління малоймовірними аварійними подіями, які мають катастрофічні наслідки;

Урок 3. Може бути недостатньо обґрунтовано нормативно-методичне забезпечення оцінки об'єктивного рівня безпеки ЯЕУ.

Як основні актуальні підходи підвищення безпеки ЯЕУ з водо-водяними енергетичними реакторами (ВВЕР) з урахуванням уроків важких аварій [5-17] можуть використовуватися:

1) удосконалення та модернізація систем внутрішньореакторного контролю та діагностики стану реакторних установок (системи шумової діагностики, контролю рівня теплоносія в активній зоні тощо);

2) кваліфікація систем безпеки на умови запроектованих аварій;

3) удосконалення та модернізація систем безпеки та управління аваріями з повним тривалим знеструмленням атомних енергоблоків;

4) удосконалення експлуатаційних інструкцій / керівництв з управління аваріями (розробка / удосконалення симптомно-орієнтованих інструкцій управління аваріями з повним знеструмленням енергоблока, розробка керівництв з управління важкими аваріями (КУВА) тощо);

5) пріоритизація детерміністичних та вдосконалення імовірнісних методів оцінки рівня безпеки ЯЕУ тощо.

Мета роботи – на основі оглядового аналізу відомих результатів досліджень причин, наслідків та уроків важких аварій ЯЕУ енергоблоків атомних станцій сформулювати подальші окремі напрями підвищення безпеки ядерної енергетики.

У частині удосконалення та модернізації систем безпеки та управління аваріями з повним тривалим знеструмленням атомних енергоблоків розглядаються модернізація систем аварійного електропостачання (САЕ) і впровадження / модернізація систем пасивного відведення тепла.

Необхідність модернізації САЕ з ВВЕР визначається уроками аварії на АЕС «Фукусіма-1» з повним тривалим знеструмленням (ПТЗ) енергоблоків. Унаслідок спільного впливу землетрусу та затоплення проммайданчика АЕС «Фукусіма-1» від цунамі відбулися відмови дизель-генераторів, які забезпечують працездатність електронасосів систем безпеки, а також систем зовнішнього електропостачання.

Модернізація САЕ з ВВЕР була спрямована, зокрема, на встановлення (оновлення) додаткових акумуляторних батарей постійного струму (АБПТ). Проте зауважимо таке. Застосування АБПТ під час аварій на АЕС «Фукусіма-1» зрештою не запобігло пошкодженню ядерного палива та руйнівним газовим вибухам у реакторах та басейні витримки відпрацьованого ядерного палива.

Забезпечення всіх енергоблоків українських АЕС АБПТ тривалого електропостачання (більше трьох діб) потребує великих економічних витрат.

З огляду на зазначене, доцільним є розробка та впровадження альтернативних протиаварійних заходів для ефективного управління аваріями з повним тривалим знеструмленням в ЯЕУ з ВВЕР.

У результаті детерміністичного моделювання кодом RELAP аварії з ПТЗ в ЯЕУ з ВВЕР-1000 (аналога аварій на АЕС «Фукусіма-1») встановлено таке [4]:

1. Умови важкої аварії (температура оболонки твелів понад 1200 °С) наступають унаслідок втрати теплоносія 1-го контуру через працюючий імпульсний запобіжний клапан компенсатора тиску після «осушення» парогенератора (ПГ) за потужності залишкових тепловиділень менше 2 % від номінальної потужності реактора;

2. Одним із способів запобігання умовам виникнення важкої аварії є забезпечення підживлення ПГ. За результатами проведених досліджень, зокрема стрес-тестів, це може бути здійснено подачею середовища аварійним живильним електронасосом (АПЕН), мобільними установками, пожежними машинами тощо.

У ЯЕУ з реакторами нового покоління безпеки перспективне застосування мають системи пасивного відведення тепла (СПВТ), що забезпечують відведення тепла та зниження тиску в гермооб'ємі під час аварій із розривами трубопроводів 1-го та 2-го контурів [4]. Тому в постфукусімський період набули розвитку підходи використання теплообмінників СПВТ для підживлення ПГ у разі аварій з повним знеструмленням.

Альтернативний підхід управління аварією з повним тривалим знеструмленням було запропоновано О. В. Корольовим [5]. Він полягає в установці дублюючого АПЕН живильного насоса з пароприводом від ПГ (ПНВП). ПНВП є аналогом турбоживильного насоса ПГ ВВЕР та пасивних систем безпеки відведення тепла від реакторів BWR. Утім працездатність ПНВП забезпечується за досить великих тисків у ПГ.

Тому доцільний комплексний підхід управління аваріями з ПТЗ: на початкових етапах аварії підживлення ПГ забезпечується ПНВП, а на кінцевих етапах – теплообмінниками СПВП.

Однією з основних загальних причин важких аварій на АЕС «Три-Майл-Айленд», Чорнобильській АЕС та АЕС «Фукусіма-1» були ненавмисні хибні дії персоналу, які визначалися недостатньою обґрунтованістю встановлених експлуатаційних регламентів / інструкцій з управління аваріями із відносно малої ймовірності вихідними подіями.

Для управління аваріями на АЕС розробляється низка протиаварійних документів. Одними з основних є інструкції з ліквідації аварій (ІЛА/СОАІ) та керівництва з управління важкими аваріями. Загалом основою ІЛА та КУВА є симптомно-орієнтований підхід, у межах якого персоналу для успішного управління аварією не потрібно визначати тип вихідної події. Однією із задач ІЛА/СОАІ є запобігання важкому пошкодженню активної зони та переведення енергоблока в безпечний кінцевий стан. Щодо КУВА, то основною задачею є обмеження (зменшення) наслідків розвитку важкої аварії та, зокрема, мінімізація викиду продуктів ділення в навколишнє середовище. Для реалізації цілей СОАІ та КУВА розроблено низку стратегій з управління аваріями. Зокрема, якщо говорити про КУВА, то в них передбачено два основних напрями дій: дії, спрямовані на припинення важкого пошкодження активної зони (припинення розвитку важкої аварії), та дії, спрямовані на пом'якшення наслідків розвитку важкої аварії. Для обох типів дій відновлення електроенергії є однією з можливих (пріоритетних) стратегій з управління аваріями з ПТЗ. Водночас, персонал має можливість застосування обладнання, яке було впроваджено на АЕС з урахуванням уроків аварії на АЕС «Фукусіма-1» (мобільні насосні установки для підживлення парогенераторів, бризкальних басейнів та басейнів витримки, мобільні дизель-генератори, пасивні автокаталічні рекомбінатори, системи скидання середовища з гермооболонки тощо). Наразі комплект КУВА, достатній для управління важкими аваріями як на реакторній установці, так і в басейні витримки, розроблено для всіх енергоблоків АЕС України. Утім, за результатами розробки КУВА залишилась низка питань, які потребують вирішення. Зокрема, відкритими питаннями є критерії переходу від ІЛА/СОАІ до КУВА, вибір та обґрунтування пріоритету стратегій, аналіз радіаційних наслідків на майданчику аварійної АЕС, що можуть суттєво впливати на протиаварійні дії персоналу, вплив аварійного енергоблока на роботу інших блоків на багатоблочних АЕС, живучість блокового щита управління тощо. Отже можна констатувати, що вдосконалення КУВА наразі є відкритим та актуальним питанням.

Наступним важливим напрямом є удосконалення методів об'єктивної оцінки безпеки ЯЕУ.

Нині у світовій практиці умовно сформувалися два підходи оцінки безпеки ЯЕУ – імовірнісний та детерміністичний.

Одним з визначальних показників імовірнісного аналізу безпеки (ІАБ) є частота пошкодження активної зони реактора (важкої аварії) – ЧПАЗ. ЧПАЗ визначається сумарним твором частот виникнення вихідних аварійних подій I та імовірностей відмови критичних для забезпечення ядерної безпеки систем Р. Критерієм безпеки за ЧПАЗ для працюючих реакторів, який встановлено в Україні, є «не перевищення» ЧПАЗ значень 10^{-4} – 10^{-5} (реактор-рік). Причому значення 10^{-4} є гранично допустимим, а значення 10^{-5} є метою, яку необхідно прагнути досягнути завдяки реалізації організаційних та технічних заходів підвищення безпеки.

Верхнє значення імовірнісного критерію за частотою граничного аварійного викиду (ЧГВВ), що відповідає діючим енергоблокам, становить 10^{-5} – 10^{-6} .

Аварія на АЕС «Фукусіма-1» дала новий поштовх в імовірнісних дослідженнях безпеки. Після цієї аварії для АЕС України було виконано оцінку частоти пошкодження палива в басейні витримки (ІАБ басейну витримки), ведуться роботи з ІАБ сейсмічних впливів, новою пріоритетною задачею є ІАБ для багатоблочних АЕС. За результатами ІАБ було визначено низку дефіцитів безпеки та запропоновано і впроваджено низку заходів з підвищення безпеки.

Одним з уроків фукусімської аварії була принципова зміна ставлення до малої ймовірності аварійних подій, які мають катастрофічні екологічні наслідки. Зокрема, це стосується аварій з ПТЗ, для яких після фукусімської аварії визначено пріоритетне значення для всієї світової ядерної енергетики.

Детерміністичний аналіз безпеки ґрунтується на безпосередньому моделюванні перебігу аварій теплогідравлічними кодами (ATHLET, CATHARE, RELAP тощо). Багаторічний досвід детерміністичного моделювання аварій відповідно до [1], [4] визначає такі недоліки:

1. Застосування в математичних моделях кодів спрощених моделей та окремих параметрів (розміри парових міхурів, щільність центрів парутворення, параметри міжфазної взаємодії тощо), що так само впливає на результати експериментальної верифікації кодів у натурних умовах;
2. Вплив «ефекту користувача» під час детерміністичного моделювання аварій ускладнює однозначну інтерпретацію отриманих результатів розрахунків;
3. Режими валідації кодів у перехідних процесах ЯЕУ здебільшого мають певну розбіжність з можливим аварійним режимом;
4. У багатьох результатах розрахункового моделювання кодами не аналізуються умови безпеки за гранично допустимою температурою початку

інтенсивного плавлення ядерного палива (для уран-оксидного палива залежно від концентрації плутонію приблизно 2800 °С). Через відносно малу теплопровідність у паливній матриці реалізуються великі температурні градієнти (близько тисячі градусів на 4 мм). Тому в певних аварійних режимах порушення умов безпеки за гранично допустимою температурою ядерного палива в центральній частині паливної матриці можуть статися раніше за порушення умов безпеки за гранично допустимою температурою оболонки твелів (1200 °С);

5. У кодах не моделюються (або моделюються спрощено) умови виникнення сильних парових вибухів. Водночас, потужні парові вибухи сталися в процесі аварій на 4-му блоці Чорнобильської АЕС [2], [4]. На думку деяких фахівців, на 3-му блоці АЕС «Фукусіма-1» відбулася також «ланцюгова» детонація [6].

6. Сучасні коди не моделюють умови виникнення різних видів теплогідродинамічної нестійкості (ТГН) у робочих, перехідних та аварійних режимах (наприклад, [7] – [10]). Виникнення ТГН супроводжується високоамплітудними відхиленнями теплогідродинамічних параметрів, які можуть порушувати умови теплообміну в активній зоні реактора, сприяти виникненню гідродинамічних та термічних ударів і порушень працездатності систем, важливих для безпеки ЯЕУ. Так, наприклад, у роботі [7] встановлено, що за певних умов перехідних та аварійних режимів ЯЕУ з ВВЕР виникає високочастотна (термоакустична) нестійкість двофазного нерівноважного теплоносія в активній зоні реактора з амплітудою коливань тиску до 50 % від середнього значення і частот.

У роботах [8], [9] встановлено, що в перехідному режимі пуску насосів систем безпеки за певних умов, які залежать від інерційності запізнення реакції напірно-витратної характеристики насосів під час швидких змін витрат, може виникнути високочастотна ТГН.

У роботі [10] також встановлено, що за певних умов трансзвукових режимів пароводяних потоків у проточній частині запобіжних клапанів можуть виникнути високоамплітудні гідродари збільшення тиску, що порушують умови надійної працездатності.

Отже, актуальним є подальше вдосконалення методів імовірнісного та детерміністичного моделювання аварій.

Висновки

1. Уроки відомих важких (ядерних) аварій вказують на необхідність подальшого підвищення безпеки ЯЕУ в напрямках кваліфікації та модернізації систем управління аваріями, впровадження пасивних систем безпеки, призначених для подо-

лання аварій з ПТЗ енергоблоків, розробки експлуатаційних інструкцій / керівництв управління аваріями із відносно малої ймовірності подій, що мають катастрофічні наслідки, застосування імовірнісних та детерміністичних методів об'єктивної оцінки рівня безпеки.

2. Імовірнісні методи не можуть бути єдиним підходом оцінки стану безпеки атомних енергоблоків.

3. Детерміністичні методи аналізу безпеки порівняно з імовірнісними мають пріоритетне значення. Проте основні обмеження застосування відомих детерміністичних методів аналізу безпеки пов'язані з обмеженнями та спрощеннями в частині окремих параметрів математичних моделей розрахункових кодів, а також впливом «ефекту користувача» на результати детерміністичних розрахунків. Тому необхідно подальше вдосконалення детерміністичних методів аналізу безпеки.

4. Під час моделювання аварій загалом необхідно враховувати умови безпеки за гранично допустимою температурою ядерного палива, паровими вибухами та різними видами теплогідродинамічної нестійкості.

Список використаної літератури

1. Скалозубов В. И., Ключников А. А., Колыханов В. Н. Основы управления запроектными авариями с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР. Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010, 400 с.
2. Носовский А. В., Васильченко В. Н., Ключников А. А., Пристер Б. С. Авария на Чернобыльской АЭС. Опыт преодоления. Извлеченные уроки. Київ: Техніка, 2006, 264 с.
3. IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami: IAEA Mission Report. IAEA, 2011. 160 p.
4. Скалозубов В. И., Оборский Г. А., Козлов И. Л., Ващенко В. Н., Габляя Т. В. Комплекс методов переоценки безопасности атомной энергетики Украины с учетом уроков экологических катастроф в Чернобыле и Фукусиме. Одесса: Астропринт, 2013. 244 с.
5. Королёв А. В., Деревянко О. В. Резервная подпитка парогенераторов АЭС в условиях электрообесточивания энергоблока. *Ядерная та радіаційна безпека*. 2014. № 2(62). С.10-12. doi: 10.32918/nrs.2014.2(62).02.
6. Архангельский К. Л., Михасюк С. Р. Анализ недоліків проекту АЕС «Fukushima-Dai-Ichi» за наслідками важкої аварії в світлі подальшого посилення безпеки АЕС України. *Ядерная та радіаційна безпека*. 2011. № 3(51). С. 9–14, doi: 10.32918/nrs.2011.3(51).02.
7. Antonyuk N., Gerliga V., Skalozubov V. Excitation of thermoacoustic oscillations in a heated channel. *Journal of Engineering Physics and Thermo*. 1990. Vol. 59, No. 4. pp. 1323–1328.

8. Skalozubov V. I., Zhou Huiyu, Chulkin O. A., Pirkovskiy D. S. Modelling method of conditions for reliability-critical hydraulic impacts on pumps of thermal and nuclear power plants. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2017. No. 4(110). pp. 74–78.

9. Skalozubov V., Kozlov I., Chulkin O., Komarov Ju., Piontkovskiy A. Analysis of reliability-critical hydraulic impact conditions at WWER-1000 NPP active safety systems, *Nuclear and Radiation Safety*. 2019. No. 1(81). pp. 42–45. doi: 10.32918/nrs.2019.1(81).07.

10. Skalozubov V., Bilous N., Pirkovskiy D., Kozlov I., Komarov Yu., Chulkin O. Water hammers in transonic modes of steam-liquid flows in NPP equipment. *Nuclear and Radiation Safety*. 2019. No. 2(82), pp. 46–49. doi: 10.32918/nrs.2019.2(82).08.

11. Громов Г. В., Дыбач А. М., Зеленый О. В., Инюшев В. В., Носовский А. В., Шоломицкий С. Э., Шугайло А-й П., Гашев М. Х., Бойчук В. С. Результаты экспертной оценки стресс-тестов действующих энергоблоков АЭС Украины с учетом уроков аварии на АЭС «Фукусима-1» в Японии. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2012. № 1(53). С. 3–9. doi: 10.32918/nrs.2012.1(53).01.

12. Про результати виконання цільової позачергової оцінки стану безпеки діючих енергоблоків АЕС та ССВЯП ЗАЕС з урахуванням подій на АЕС «Фукусима-Даїчі». Постанова Колегії Держатомрегулювання від 24-25.11.2011 № 13.

13. Борисенко В. И. О некоторых закономерностях последствий аварий на АЭС. *Проблеми безпеки АЕС і Чорнобиля*. 2012. Вип. 18. С. 6–15.

14. Калванд А., Казачков І. В. Моделирование охолождения расплава корияума в контейменті в пассивных системах захисту від тяжких аварій. *Ядерна фізика та енергетика*. 2012. Т. 13, № 1. С. 62–72.

15. Калванд Али, Казачков И. В. Моделирование процесса охлаждения расплава корияума погруженными в него легкоплавкими блоками, *Ядерна та радіаційна безпека*. 2012. № 3(55). С. 27–33. doi: 10.32918/nrs.2012.3(55).06.

16. 21.5.59.ОБ.04.5. Вероятностный анализ безопасности 2-го уровня энергоблока № 5 ЗАЭС. Итоговый отчет Запорожской АЭС. Энергодар, 2009.

17. Скалозубов В. И., Билей Д. В., Габляя Т. В., Комаров Ю. А., Ключников А. А., Фольтов И. М. Развитие и оптимизация систем контроля атомных электростанций с ВВЭР. Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2008. 512 с.

2. Nosovskyi, V., Vasylichenko, A., Klyuchnikov, B., Priester, B. (2006). The Chernobyl accident. Overcoming experience. Lessons learned. Kyiv, Tehnika, 264 p.

3. IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-Ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami: IAEA Mission Report. IAEA, 2011, 160 p.

4. Skalozubov, V., Oborskyi, G., Kozlov, I., Vashchenko, V., Gablaia, T. (2013). A set of methods for safety reassessment of nuclear energy in Ukraine, taking into account the lessons of environmental disasters in Chernobyl and Fukushima. Odessa, Astroprint, 244 p.

5. Koroliyov A. V., Derevianko O. V. (2014). Emergency Makeup of Nuclear Steam Generators in Blackout Conditions. *Nuclear and radiation safety*, 2(62), 10-12. doi: 10.32918/nrs.2014.2(62).02.

6. Arkhangelskyi K. L., Mykhasyuk S. R. (2011). Assessment of Fukushima-1 Design Deficiencies Based on Severe Accident Consequences with Recommendations to Improve Safety of Ukrainian Nuclear Power Plants. *Nuclear and radiation safety*. № 3(51), 9-14. doi: 10.32918/nrs.2011.3(51).02.

7. Antonyuk, N., Gerliga, V., Skalozubov, V. (1990). Excitation of thermoacoustic oscillations in a heated channel. *Journal of Engineering Physics and Thermo*, 59(4), 1323–1328.

8. Skalozubov, V., Zhou Huiyu, Chulkin, O., Pirkovskiy, D. (2017). Modelling method of conditions for reliability-critical hydraulic impacts on pumps of thermal and nuclear power plants. *Problems of Atomic Science and Technology*, 4(110), 74–78.

9. Skalozubov, V., Kozlov, I., Chulkin, O., Komarov, Yu., Piontkovskiy, A. (2019). Analysis of reliability-critical hydraulic impact conditions at VVER-1000 NPP active safety systems. *Nuclear and Radiation Safety*, 1(81), 42–45, 2019. doi: 10.32918/nrs.2019.1(81).07.

10. Skalozubov, V., Bilous, N., Pirkovskiy, D., Kozlov, I., Komarov, Yu., Chulkin, O. (2019). Water hammers in transonic modes of steam-liquid flows in NPP equipment. *Nuclear and Radiation Safety*, 2(82), 46–49. doi: 10.32918/nrs.2019.2(82).08.

11. Gromov, G., Dybach, A., Zelenyi, O., Iniushev, V., Nosovskyi, A., Sholomitskyi, S., Shugaylo, O-i., Gashev, M., Boichuk, V. (2012). Results of an expert assessment of stress tests of operating power units of Ukrainian NPPs, taking into account the lessons of the accident at the Fukushima-1 nuclear power plant in Japan. *Nuclear and Radiation Safety*, 1(53), 3–9. doi: 10.32918/nrs.2012.1(53).01.

12. On the results of targeted extraordinary assessment of the safety state of operating NPP units and ZNPP DSFSF taking into account events at the Fukushima NPP. Ordinance of the SNRIU Board No. 13 dated 24-25 November 2011.

13. Borysenko, V. (2012). On some regularities of accident consequences at NPPs. *NPP and Chernobyl Safety Problems*, 18, 6–15.

14. Kalvand, A., Kazachkov, I. (2012). Modeling of corium melt cooling in the containment in passive systems in the event of severe accidents. *Nuclear Physics and Energy*, 13(1), 62–72.

15. Kalvand, A., Kazachkov, I. (2012). Modeling of corium melt cooling by low-melting blocks immersed in it. *Nuclear and Radiation Safety*, 3(55), 27–33. doi: 10.32918/nrs.2012.3(55).06.

16. 21.5.59.ОБ.04.5. Level 2 probabilistic safety analysis of ZNPP-5. Final report of Zaporizhzhya NPP. Energodar, 2009.

References

1. Skalozubov, V., Klyuchnikov, V., Kolykhanov, V. (2010). Fundamentals of management of loss of coolant beyond design basis accidents at VVER NPPs. Chernobyl, Institute of NPP Safety Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, 400 p.

17. Skalozubov, V., Biley, D., Gablaya, T., Komarov, Yu., Kliuchnikov, A., Foltov, I. (2008). Development and optimization of control systems for VVER NPPs. Chornobyl, Institute of NPP Safety Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, 506 p.

Improvement of Nuclear Safety Taking into Account the Lessons Learned from Severe Accidents

**V. Kondratyuk, Y. Pysmennyy, O. Verinov,
V. Filatov, I. Ostapenko**

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

The lessons of known serious (nuclear) accidents determine the need for further improvement of the safety of nuclear power plants. In the areas of qualification and modernization of emergency management systems, this primarily concerns the modernization of the emergency power supply system and the modernization of passive safety systems to overcome accidents with complete long-term blackout of power units, passive heat removal systems. An important direction is the reduction of restrictions on the use of probabilistic and deterministic methods of objective assessment of the security level; improvement and development of modern operating instructions / guidance for the management of accidents with relatively unlikely events that have catastrophic consequences. The main limitations of the application of probabilistic methods of security analysis are related to insufficient validity of probabilistic criteria and security parameters. The main limitations of the application

of known deterministic methods of security analysis are related to the insufficient physical validity of certain parameters of mathematical models of calculation codes, as well as the effects of differences between codes and users. During the simulation of accidents in general, it is necessary to take into account the safety criteria established in relation to nuclear fuel, TVEL shells, the conditions for the occurrence of steam explosions and various types of thermohydrodynamic instability.

Keywords: accident, deterministic methods, nuclear energy, probabilistic methods, safety.

Отримано 06.06.2022