

## Відгук

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора  
Сфімова Олександра В'ячеславовича на дисертаційну роботу  
Козлова Ігоря Леонідовича «Удосконалення теоретичних і методологічних  
основ аналізу безпеки АЕС при малоімовірних аварійних подіях з  
катастрофічними наслідками», що подана до спеціалізованої вченої ради  
Д41.052.04 при Одеському національному політехнічному університеті на  
здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю  
05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки

### Актуальність теми дисертації.

Основою енергетики в багатьох країнах світу, яка обумовлює темпи їх економічного розвитку, є атомні електростанції. В той же час, саме вони, як складні технічні системи, є об'єктами підвищеної техногенної та екологічної небезпеки. Тому безумовне забезпечення техногенної та екологічної безпеки в процесі виробництва електричної і теплової енергії ядерними енергоустановками енергоблоків АЕС є найважливішим стратегічним напрямом розвитку світової енергетичної політики.

Одним з пріоритетних принципів практичної реалізації цього стратегічного напрямку в атомній енергетиці, як показав досвід експлуатації ядерних енергоустановок в останні десятиріччя, є мінімізація ядерних інцидентів та важких аварій за рахунок використання в практиці експлуатації енергоблоків АЕС ефективних підходів до оцінки безпеки функціонування їх систем та устаткування в умовах відносно малоімовірних аварійних подій, в тому числі, і геофізичного походження. Ці підходи, значною мірою, спираються на детерміністські або імовірнісні методи моделювання процесів, що викликають ці події, а також множини функціональних станів тих систем та устаткування енергоблоків, для яких оцінюється рівень безпеки.

Одним з таких підходів, найбільш визнаним в ядерній галузі, є, так званий, ризик-орієнтований підхід (РОП), що базується на ймовірнісних та

ОНПУ  
ВХЛ № 2227/01-07  
13. 12. 2016

детерміністських методах математичного моделювання, який широко увійшов до практики використання на АЕС України. В цьому підході одним з основних математичних та організаційно-методологічних інструментаріїв оцінки рівня безпеки функціонування систем та устаткування енергоблоків АЕС в різні періоди експлуатаційного етапу їх життєвого циклу є ймовірнісний аналіз безпеки (ІАБ). При застосуванні такого аналізу в якості основних критеріїв безпеки, як правило, виступають частота пошкодження активної зони реактора (ЧПАЗ) і частота граничного аварійного викиду радіоактивної речовини (ЧГАВ). Але в ІАБ, який заснований на пріоритетності оцінок значень ймовірності виникнення аварійних подій, вкладу відносно малоїмовірних аварійних подій в інтегральні показники безпеки приділяється недостатньо уваги. Це обумовлює необхідність удосконалення основних математичних та організаційно-методологічних інструментаріїв РОП, що використовується в атомній енергетиці, в напрямку адекватного і коректного урахування малоїмовірних аварійних подій.

Тому удосконалення РОП за рахунок узагальнення в ньому широкого спектру різних нових методів оцінки безпечної експлуатації систем та устаткування ядерних енергоустановок АЕС, що засновані на використанні математичних детерміністських моделей екстремальних аерогідродинамічних геофізичних процесів, які катастрофічно (запроектно) впливають на умови перебігу і змін параметрів технологічних процесів і характеристик міцності систем та устаткування, детерміністських та ймовірнісних моделей оцінки безпеки функціонального стану (кваліфікації) відповідальних систем та устаткування, а також за рахунок використання ефективних стратегій управління малоїмовірними важкими аваріями енергоустановок АЕС, є дуже важливою науково-технічною проблемою.

У зв'язку з цим, дисертаційна робота Козлова І.Л., яка безпосередньо спрямована на вирішення цієї актуальної науково-технічної проблеми з метою підвищення безпеки експлуатації енергоблоків АЕС з ВВЕР, є безумовно актуальною і своєчасною.

### **Загальна характеристика роботи.**

Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, додатків, списку використаних літературних джерел з 147 найменувань. Матеріали дисертаційної роботи викладено на 293 сторінках основного тексту.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовано суть науково-технічної проблеми, відповідність державним науковим програмам. Наведено наукову новизну і практичне значення результатів дисертаційної роботи. Визначено об'єкт і предмет дослідження, сформульовано мету і завдання дослідження.

У **першому розділі** проведено аналіз і систематизацію основних причин, екологічних наслідків та уроків важких техногенних аварій ядерних енергоустановок енергоблоків АЕС в різних країнах світу за останні десятиріччя, і, зокрема, на АЕС Fukushima-Daiichi, які довели необхідність перегляду загальноприйнятих підходів до оцінки впливу малоймовірних аварійних подій у вигляді екстремальних аерогідродинамічних геофізичних процесів на безпеку систем та устаткування ядерних енергоустановок в експлуатаційній та регулюючій діяльності відповідних організацій. Показані існуючі недоліки традиційного РОП і відповідні проблеми, що пов'язані з якістю оцінок рівнів безпеки систем та устаткування енергоблоків АЕС під час їх експлуатації в умовах малоймовірних аварійних подій.

На підставі проведеного аналізу зроблено висновок, що на даний час існує науково-технічна проблема, яка пов'язана з необхідністю подальшого вдосконалення загальноприйнятого ризик-орієнтованого підходу в напрямку адекватної і коректної оцінки впливу малоймовірних аварійних подій у вигляді екстремальних аерогідродинамічних геофізичних процесів на безпеку систем та устаткування ядерних енергоустановок та з необхідністю розробки ефективних стратегій управління малоймовірними аваріями, що можуть виникнути на енергоблоках АЕС.

У **другому розділі** автор проводить системний аналіз ефективності застосування основних детерміністських та ймовірнісних методів, моделей і

підходів існуючої концепції оцінки безпеки експлуатації ядерних енергоустановок АЕС. На цій підставі він робить висновок, що на цей час відсутні досить обґрунтовані детерміністські та ймовірнісні методи моделювання впливів позапроектних малоймовірних аерогідродинамічних геофізичних процесів на функціонування систем та устаткування, що розташовані на промайданчиках АЕС. Це обумовлює актуальність розробки нових та удосконалення існуючих детерміністських та ймовірнісних методів і моделей, призначених для консервативних оцінок безпеки систем та устаткування ядерних енергоустановок енергоблоків АЕС, в конкретних напрямках, що визначені автором як окремі актуальні науково-прикладні задачі дослідження.

Вирішення цих задач автор описує в подальших третьому і четвертому розділах дисертації.

**В третьому розділі** наведено результати наукових досліджень автора з розробки і вдосконалення теоретичних і методологічних основ детерміністського математичного моделювання екстремальних аерогідродинамічних геофізичних процесів, що мають катастрофічний вплив на умови протікання і зміну параметрів технологічних процесів і характеристик міцності в системах та устаткуванні ядерних енергоустановок АЕС. На цьому науковому фундаменті розроблені детерміністські моделі малоймовірних екстремальних аерогідродинамічних геофізичних процесів аварійного затоплення систем та устаткування на промайданчиках АЕС Fukushima-Daiichi і Запорізький АЕС, що вже виникли або теоретично можливі, з метою їх подальшого використання для оцінки впливу подібних аварійних подій на безпеку ядерних енергоблоків. Проведено аналіз ймовірних сценаріїв розвитку аварійних процесів в реакторних і парогенераторних установках АЕС з ВВЕР-1000 внаслідок аварії з тривалим знеструмленням і відмовою запуску всіх резервних джерел електричного живлення в результаті затоплення місць (відміток) їх розташування.

**В четвертому розділі** розглянуті результати наукових досліджень з вдосконалення детерміністських та ймовірнісних методів і моделей оцінки



безпеки функціонального стану (кваліфікації) відповідальних систем та устаткування ядерних енергоустановок АЕС у напрямку адекватного і коректного урахування умов відносно малоймовірних важких аварій. Зокрема, автором вдосконалені такі методи і моделі: – детерміністський метод і модель оцінки безпеки і міцнісної надійності корпусу ядерного реактора АЕС при критичних термічних навантаженнях; – ймовірнісний метод і модель оцінки безпеки і міцнісної надійності корпусу ядерного реактора АЕС за критерієм залишкової ефективності; – детерміністський метод і модель оцінки безпеки функціонування системи «парогенератори – швидкодіючий запірно-відсічний клапан головних паропроводів» енергоблоків двоконтурних АЕС в умовах потоку пароводяної суміші. За допомогою численних експериментів на цих моделях одержані нові критерії кваліфікації для вищезначених систем та устаткування при різних умовах розвитку малоймовірних аварійних подій.

**В п'ятому розділі** наведені результати наукових досліджень, що пов'язані з розробкою і реалізацією основних положень концепції створення ефективних стратегій управління важкими аваріями ядерних енергоустановок АЕС, включаючи й малоймовірні, на основі симптомно-орієнтованих методів і підходів, що використовуються для ідентифікації вихідних аварійних подій. В якості прикладу практичної реалізації положень цієї концепції наведено розроблений автором детерміністський метод обґрунтування стратегії управління процесом запобігання важкої малоймовірної аварії у вигляді парогазового вибуху в реакторних установках АЕС. За допомогою цього методу визначено критерії консервативних умов виникнення вибуху на внутрішньо- і позакорпусних стадіях динамічних сценаріїв розвитку аварії.

**У висновках** наведені основні результати, які одержані в процесі виконання наукових досліджень дисертаційної роботи. Аналіз висновків вказує на те, що мета дисертаційної роботи досягнута, а основні завдання дослідження виконані.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.**

В дисертаційній роботі наведено комплексний аналіз існуючої актуальної науково-прикладної проблеми, теоретичні і практичні розробки основних напрямків її вирішення. Всі розділи дисертації підпорядковані єдиній меті дослідження та логічно пов'язані між собою. Отримані результати, висновки і рекомендації науково обґрунтовані.

**Достовірність** наукових положень, висновків і рекомендацій, що містяться в дисертації, на теоретичному і практичному рівнях підтверджуються коректним застосуванням відповідного детерміністського та ймовірнісного математичного апарату, сучасних методів математичного моделювання, методів проведення чисельних експериментів та обробки їх даних, нормативними документами ядерної галузі і документами, що узагальнюють досвід експлуатації АЕС з ВВЕР, а також впровадженням основних результатів дисертаційної роботи в НАЕК «Енергоатом».

**Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій**, з моєї точки зору, складається з таких основних пунктів:

- вперше сформульовані основні напрямки удосконалення існуючої загальної концепції аналізу безпеки ядерних енергоустановок АЕС з метою можливості її використання для адекватної і коректної оцінки впливу відносно малоімовірних аварійних подій у вигляді екстремальних аерогідродинамічних геофізичних процесів на показники безпеки систем та устаткування ядерних енергоустановок;

- вперше розроблені детерміністські методи моделювання екстремальних аерогідродинамічних геофізичних процесів, що, на відміну від існуючих, відрізняються урахуванням широкого спектру факторів, що призводять до затоплення місць (відміток) розташування систем та устаткування ядерних енергоустановок АЕС, внаслідок чого параметри технологічних процесів і характеристики міцності цих систем та устаткування набувають критичних значень, які можуть призвести до важкої аварії енергоблоків АЕС;

- набули подальший розвиток детерміністські та ймовірнісні методи і моделі оцінки безпеки (кваліфікації) відповідальних систем та устаткування ядерних енергоустановок АЕС, включаючи корпус ядерного реактора і систему «парогенератори – швидкодіючий запірно-відсічний клапан головних паропроводів» енергоблоків двоконтурних АЕС, що дозволяють враховувати вплив на показники безпеки відносно малоймовірних аварійних подій і отримувати для цих умов коректні значення критеріїв кваліфікації;

- вперше обгрунтовано можливість ефективного використання симптомно-орієнтованого підходу до ідентифікації вихідних подій аварій у складі стратегій управління відносно малоймовірними важкими аваріями ядерних енергоустановок АЕС, який дозволяє адекватно і коректно враховувати вплив цих вихідних подій на функціональний стан і характеристики міцності систем та устаткування ядерних енергоустановок в аварійних режимах експлуатації;

- вперше формалізовані основні положення загальної концепції розробки ефективних стратегій управління важкими аваріями ядерних енергоустановок АЕС, в тому числі і відносно малоймовірними, на основі симптомно-орієнтованого підходу до ідентифікації вихідних подій аварій, які включають в себе нові теоретичні та методологічні принципи реалізації цих стратегій;

- вдосконалено детерміністський метод обгрунтування стратегій управління процесом запобігання важкої малоймовірної аварії у вигляді парогазового вибуху в реакторних установках АЕС, що дозволяє визначити критерії консервативних умов виникнення вибуху на внутрішньо - і позакорпусних стадіях динамічних сценаріїв розвитку аварії.

#### **Практична цінність роботи та рекомендації щодо використання результатів.**

Результати досліджень мають практичну цінність. Основні результати, що пов'язані з оцінками показників безпеки окремих систем та устаткування енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000, впроваджені в галузеві нормативні документи ДП НАЕК «Енергоатом», зокрема в «Комплексну програму підвищення

безпеки АЕС», «Міжгалузевий ДІЯРУ», «План заходів з переоцінки безпеки АЕС України з урахуванням уроків великої аварії на АЕС Fukushima-Daiichi».

Це підтверджено відповідним актом впровадження.

**Повнота викладення основних наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих роботах** підтверджується тим, що основні результати та положення дисертації повністю викладені у 41 науковій роботі, в тому числі, в 4 наукових монографіях (з них одна – в міжнародному виданні). Вимоги МОН України до кількості публікацій в спеціалізованих наукових виданнях (29), включаючи ті, що обліковуються у міжнародних наукометричних базах даних (9, з яких 5 – у SCOPUS), виконано. Основні положення роботи пройшли апробацію на 8 міжнародних, національних і регіональних науково-технічних конференціях і семінарах. Автореферат достатньо повно та об'єктивно відображає зміст дисертаційної роботи.

Треба відзначити, що ряд окремих наукових положень і результатів дисертаційної роботи в деякій мірі можна віднести до спеціальностей 01.04.21 – радіаційна фізика і ядерна безпека, 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми, 05.26.01 – охорона праці за відповідними напрямками досліджень цих спеціальностей. Але загальна наукова спрямованість дисертаційної роботи, її мета і завдання, об'єкт і предмет дослідження, переважна більшість наукових положень і результатів, включаючи пункти наукової новизни і практичної цінності, а також загальній напрям впровадження результатів роботи в ДП НАЕК «Енергоатом» відносяться до спеціальності 05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки за напрямками досліджень: «Створення нових, удосконалення наявних теоретичних, експериментальних, методологічних, технічних і технологічних основ створення та експлуатації теплових і ядерних енергоустановок, парогенераторів та камер згоряння» і «Розроблення та дослідження систем ядерної безпеки, технологічних процесів утилізації відпрацьованого ядерного палива, газоочищення, екологічного моніторинга».



### Зауваження до дисертаційної роботи:

1. В назві дисертаційної роботи доцільно було б підкреслити, що дослідження, які проведені автором, загалом спрямовані на підвищення (забезпечення) рівнів безпеки експлуатації відповідальних систем та устаткування ядерних енергоустановок енергоблоків АЕС під час виникнення малоймовірних аварійних подій, що можуть призвести до важких аварій. Адже саме для цього призначені розроблені їм методи, моделі, підходи, стратегії управління аварійними процесами, які застосовуються безпосередньо для аналізу умов, розрахунку критеріїв і діапазонів технологічних параметрів безпечної експлуатації корпусів ядерних реакторів ВВЕР-1000, системи «парогенератори – швидкодіючий запірно-відсічний клапан (ШЗВК) головних паропроводів» енергоблоків двоконтурних АЕС, контейментів реакторних установок двоконтурних АЕС та інших систем та устаткування в аварійних періодах експлуатаційного етапу їх життєвого циклу.

Тому в назву дисертаційної роботи для більшої відповідності результатам проведених досліджень доцільно було б внести словосполучення «аналіз безпеки експлуатації відповідальних систем та устаткування ядерних енергоустановок АЕС».

2. В першому розділі дисертації автор приділяє багато уваги, часто необгрунтовано, нетехнічним наслідкам важкої аварії на АЕС Fukushima-Daiichi, наприклад в підрозділі 1.1 (стор. 24, 31) йде мова про «уламки, що заважали руху транспорту», про «травми аварійного персоналу», про «необхідність удосконалення системи ліцензування АЕС у Великій Британії, що повинно бути спрямовано на підвищення незалежності і компетентності регулюючих органів» і т.п. На мою думку, подібний матеріал в дисертації є зайвим і таким, що ускладнює аналіз її наукових технічних результатів.

Також є зайвою занадто докладна географічна і топографічна частина інформації про результати стрес-тестів по затопленню проммайданчиків АЕС України при проектних землетрусах (табл. 1.5). Цю частину інформації можна було б суттєво скоротити.

3. По результатам досліджень, що описані у другому розділі дисертації, автор робить висновок про актуальність вдосконалення детерміністських та ймовірнісних моделей оцінки безпеки і міцнісної надійності корпусів ядерних реакторів і оцінки безпеки функціонування системи «парогенератори – ШЗВК головних паропроводів» енергоблоків АЕС в умовах малоймовірних аварійних подій під час експлуатації. Але обґрунтуванню взагалі правильного вибору саме цих відповідальних систем та устаткування енергоблоків АЕС, як об'єктів моделювання, автор приділив недостатньо уваги.

4. Судячи з текстів дисертації та автореферату, для практичної реалізації досить складного математичного апарату, за допомогою якого описуються аерогідродинамічні геофізичні процеси затоплення місць (відміток) розташування систем та устаткування ядерних енергоустановок на проммайданчиках АЕС, автор застосовує комп'ютерні програми. Але опису цих програм та будь-яких їх характеристик автор не дає. Тому не зрозуміло, чи застосовував він стандартне, чи оригінальне, їм розроблене, програмне забезпечення для комп'ютерного моделювання цих процесів.

Аналогічне зауваження стосується програмного забезпечення, що застосовував автор для практичної реалізації складного математичного апарату, який лежить в основі детерміністських та ймовірнісних моделей оцінки безпеки і міцнісної надійності корпусу ядерного реактора і оцінки безпеки функціонування системи «парогенератор – ШЗВК головних паропроводів» енергоблоків АЕС.

5. На жаль, ні в дисертації, ні в авторефераті не наведено даних про процедури перевірки адекватності розроблених детерміністських та ймовірнісних моделей реальним фізичним аварійним процесам, що відбувались під час важких аварій ядерних енергоустановок АЕС (наприклад, на АЕС Fukushima-Daiichi). Ці дані були б підтвердженням коректності одержаних значень критеріїв оцінки безпечної експлуатації корпусів ядерних реакторів і ШЗВК ядерних енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000, а також критеріїв консервативних умов виникнення парогазового вибуху в реакторних установках АЕС під час можливих малоймовірних аварійних подій.

6. При розробці детерміністського методу обґрунтування стратегії управління процесом запобігання важкої малоймовірної аварії в вигляді парогазового вибуху в реакторних установках АЕС (підрозділ 5.2), як прикладу практичної реалізації розробленої концепції формування ефективних стратегій управління важкими аваріями ядерних енергоустановок, було б логічним більш детально описати процес застосування запропонованого в попередніх підрозділах 5.1.2. и 5.1.3 симптомно-орієнтованого підходу до ідентифікації вихідних подій цієї аварії. Це дало б можливість наявне довести переваги цього підходу на прикладі конкретного сценарію розвитку аварійних подій в реакторних установках АЕС, можливих під час експлуатації.

7. В тексті дисертації зустрічаються некоректні, досить завуальовані вислови і сленг. Крім того, автор використовує, часто не обґрунтовано, велику кількість абревіатур – 79. Завдяки цьому в деяких випадках, особливо в п'ятому розділі, окремі вислови автора складаються практично з одних абревіатур, що ускладнює сприймання тексту.

#### **Загальні висновки.**

Зроблені зауваження в цілому не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Козлова Ігоря Леонідовича «Удосконалення теоретичних і методологічних основ аналізу безпеки АЕС при малоймовірних аварійних подіях з катастрофічними наслідками», яка відповідає паспорту спеціальності 05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки. Дисертаційна робота містить раніше не захищені наукові положення та нові обґрунтовані результати. Вона є закінченим, самостійним науковим дослідженням, яке спрямоване на вирішення актуальної для ядерної енергетики науково-прикладної проблеми розвитку загальної концепції аналізу безпеки ядерних енергоустановок АЕС шляхом розробки нових і вдосконалення існуючих теоретичних принципів, методологічних положень, математичних методів, моделей і підходів з метою їх використання для запобігання виникнення важких малоймовірних аварій енергоблоків АЕС під час їх експлуатації.

Виходячи з актуальності науково-прикладної проблеми, достатньо високого рівня виконаних наукових досліджень та підтверджених результатів їх практичного використання вважаю, що дисертаційна робота «Удосконалення теоретичних і методологічних основ аналізу безпеки АЕС при малоімовірних аварійних подіях з катастрофічними наслідками» має наукове і практичне значення, відповідає вимогам пп. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а також вимогам атестаційної комісії МОН України щодо докторських дисертацій, а її автор Козлов Ігор Леонідович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки.

Офіційний опонент, завідувач кафедри  
парогенераторобудування  
Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут»,  
доктор технічних наук, професор

Сфімов О.В.

