

Голові разової спеціалізованої вченої
ради в Національному університеті
«Одеська політехніка»,
доктору технічних наук, професору
Кравченко Володимир Петровичу

ВІДГУК

офіційного опонента

Бошкової Ірини Леонідівни

на дисертаційну роботу **Бундєва Дениса Степановича**
на тему **«Кваліфікація теплогідродинамічної стійкості у змішувальних
теплообмінниках турбінного відділення ядерних енергоустановок»**,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю **143 – Атомна енергетика**,
галузь знань **14 – Електрична інженерія**

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Д. С. Бундєва присвячена вирішенню актуального науково-технічного завдання – розрахунковій та експериментальній кваліфікації умов теплогідродинамічної стійкості змішувальних теплообмінників турбінного відділення ядерних енергоустановок з реакторами типу ВВЕР та розробленню методів запобігання виникненню теплогідродинамічної нестійкості й гідродинамічних ударів. Актуальність обраної теми визначається необхідністю забезпечення надійної й безпечної експлуатації обладнання турбінного відділення ядерних енергоустановок. Досвід експлуатації змішувальних теплообмінників енергоблоків з реакторами ВВЕР свідчить, що в окремих режимах можуть виникати значні коливання теплогідродинамічних параметрів та гідродинамічні удари, наслідками яких є підвищена вібрація обладнання і трубопроводів,

порушення нормальної роботи насосів, а в несприятливих випадках – пошкодження внутрішньокорпусних елементів теплообмінного обладнання. Особливо важливим є те, що умови виникнення теплогідродинамічної нестійкості у змішувальних теплообмінниках досліджені значно меншою мірою, ніж відповідні процеси у парогенеруючих каналах, трубопроводах, контурах із насосами та інших системах теплотехнічного обладнання. Проведений автором аналіз засвідчив відсутність достатньо обґрунтованих методів моделювання гідродинамічних ударів саме в системах змішувальних теплообмінників.

Таким чином, розроблення методів визначення умов виникнення теплогідродинамічної нестійкості, прогнозування її наслідків та обґрунтування способів запобігання гідродинамічним ударам має як наукове, так і безпосереднє практичне значення для підвищення надійності та безпечності експлуатації ядерних енергоустановок.

Мета дисертаційної роботи сформульована відповідно до зазначеної проблематики і полягає у розрахунковій та експериментальній кваліфікації умов теплогідродинамічної стійкості в робочих і перехідних режимах систем змішувальних теплообмінників турбінного відділення ядерної енергоустановки з ВВЕР. Для її досягнення автором сформульовано п'ять взаємопов'язаних завдань, які охоплюють аналіз існуючих досліджень, розроблення детерміністських методів, їх експериментальну верифікацію та підготовку практичних рекомендацій.

2. Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розвитку методичних засад визначення умов теплогідродинамічної стійкості змішувальних теплообмінників та прогнозування виникнення гідродинамічних ударів.

До найбільш суттєвих нових наукових результатів слід віднести такі.

По-перше, встановлено, що для систем змішувальних теплообмінників принципово важливими є низькочастотна коливальна теплогідродинамічна нестійкість, пов'язана із запізненням завершення тепломасообмінних

процесів під час конденсації та інерційністю напірно-витратних характеристик насосів, а також імпульсна теплогідродинамічна нестійкість, пов'язана з перетворенням кінетичної енергії потоку в енергію імпульсу гідродинамічного удару.

По-друге, розроблено оригінальний детерміністський метод кваліфікації умов гідродинамічних ударів у динамічних режимах змішувальних теплообмінників. У запропонованій моделі враховано взаємний вплив незавершеності процесу конденсації та інерційності реакції напірно-витратної характеристики конденсатного насоса.

По-третє, на основі термодинамічної моделі тепломасообмінних процесів розроблено новий детерміністський критеріальний метод визначення теплогідродинамічної стійкості змішувальних теплообмінників у рівноважних режимах. Суттєвою особливістю моделі є врахування флуктуаційних відхилень термодинамічних параметрів від рівноважного стану. Критерієм нестійкості запропоновано вважати умову одночасної зміни тиску та маси робочого середовища у двофазному об'ємі змішувального підігрівача.

Таким чином, сукупність одержаних результатів має ознаки наукової новизни та розвиває існуючі уявлення про умови формування теплогідродинамічної нестійкості у змішувальних теплообмінниках ядерних енергоустановок.

3. Зміст дисертації та короткий аналіз її розділів

Дисертаційна робота логічно побудована і складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатка. Автором зазначено, що загальний обсяг роботи становить 113 сторінок, основний текст – 76 сторінок; дисертація містить 20 рисунків, список із 70 використаних джерел та один додаток.

У **першому розділі** виконано аналіз досліджень у галузі теплогідродинамічної нестійкості. Розглянуто аперіодичну, низькочастотну та високочастотну коливальну нестійкість, проаналізовано методи

модельовання гідродинамічних ударів у розімкнутих і замкнених контурах із насосами, при закритті арматури, у трансзвукових режимах двофазних потоків, а також при аварійному заповненні компенсатора тиску. За результатами аналізу зроблено висновок щодо недостатньої обґрунтованості існуючих методів стосовно змішувальних теплообмінників.

У **другому розділі** розроблено метод кваліфікації умов теплогідродинамічної нестійкості та гідроударів у динамічних режимах. Дослідження виконано на прикладі змішувального підігрівача низького тиску регенеративної системи турбіни. Математична модель базується на рівняннях балансу маси, енергії, рівняннях руху та характеристиках насоса; систему рівнянь розв'язано чисельним методом Рунге–Кутта.

У результаті моделювання встановлено істотну залежність амплітуд і частот коливань від витрати гріючої пари. Максимальні відносні амплітуди коливань витрати конденсату становлять 25 %, тиску – 50 %, рівня конденсату – 99 %, максимальна частота коливань – 0,1 Гц, а максимальний відносний імпульс тиску при гідроударі досягає 400 %.

На основі отриманих результатів запропоновано практичні заходи щодо встановлення регуляторів подачі гріючої пари та рівня конденсату, а також демпфуючих пристроїв на трубопроводі подачі конденсату.

У **третьому розділі** проведено експериментальну кваліфікацію запропонованого методу. Дослідження виконано на установках «Гідроудар» та «Насос», конструкційно-технічні параметри яких обґрунтовано відповідно до критеріїв теплогідродинамічної подібності натурної системи.

Під час експериментів на установці «Гідроудар» отримано максимальні відносні імпульси тиску до 350 %, а на установці «Насос» – до 950 %. Встановлено консервативний характер розрахункових оцінок порівняно з експериментальними даними.

У **четвертому розділі** розроблено критеріальний метод кваліфікації теплогідродинамічної стійкості змішувальних підігрівачів у рівноважних режимах. Сформульовано математичну модель, отримано критерії стійкості

та нестійкості, визначено залежність умов виникнення нестійкості від співвідношення витрат пари і конденсату. Запропонований підхід дає можливість за штатно контрольованими параметрами турбінного відділення оцінювати стан змішувального підігрівача щодо можливості виникнення нестійкості.

Робота завершується загальними висновками, які узагальнюють основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати дослідження.

4. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій

Достовірність отриманих результатів забезпечується використанням фундаментальних законів збереження маси та енергії, рівнянь руху, термодинамічних співвідношень, характеристик реального теплотехнічного обладнання та чисельних методів розв'язання систем диференціальних рівнянь.

Важливою позитивною рисою роботи є поєднання розрахункового та експериментального підходів. Верифікація здійснювалася на двох експериментальних установках, параметри яких обиралися з урахуванням критеріїв теплогідродинамічної подібності. Це підвищує обґрунтованість можливості співставлення результатів фізичного та математичного моделювання.

Одержані експериментальні результати загалом підтверджують тенденції, встановлені розрахунковими моделями. При цьому автор не приховує розбіжностей між розрахунком та експериментом і пов'язує консервативне завищення розрахункових імпульсів тиску з припущеннями щодо ізотермічності процесу гідроудару та неврахуванням необоротних теплогідродинамічних втрат.

Отже, основні положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи можна вважати достатньо обґрунтованими, а використаний комплекс аналітичних, чисельних та експериментальних методів – таким, що відповідає поставленим завданням.

5. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами

Дисертаційна робота пов'язана з міжнародною науково-технічною та освітньою діяльністю у сфері атомної енергетики. У дисертації зазначено, що результати кваліфікаційної роботи впроваджено в міжнародний проєкт ЄВРАТОМ (NURECAB), спрямований на науково-технічну й освітню підтримку закладів вищої освіти України з підготовки фахівців у галузі атомної енергетики в екстремальних умовах воєнного часу.

Такий зв'язок підтверджує відповідність тематики роботи сучасним завданням розвитку, безпеки та кадрового забезпечення атомної енергетики України.

6. Наукове значення отриманих результатів

Наукове значення дисертації полягає у розвитку теоретичних і методичних основ моделювання теплогідродинамічної нестійкості в системах змішувальних теплообмінників.

Запропонована автором модель дозволяє пов'язати виникнення коливальних процесів не з одним окремим фактором, а з взаємодією тепломасообмінних процесів конденсації та динамічних характеристик насосного обладнання. Це розширює можливості аналізу складних взаємопов'язаних процесів у теплообмінному обладнанні.

Науково значущим є також критеріальний підхід до визначення теплогідродинамічної нестійкості за флуктуаційними відхиленнями параметрів від рівноважного стану. Він створює основу для подальшого розвитку методів ранньої діагностики нестійких режимів, дослідження меж стійкості та вдосконалення математичних моделей змішувальних теплообмінників.

Одержані результати можуть бути використані при подальшому дослідженні нестационарних процесів у двофазних системах, при розвитку моделей гідродинамічних ударів, а також при розробленні методів кваліфікації теплотехнічного обладнання енергоустановок.

7. Практичне значення отриманих результатів

Практична цінність роботи полягає в можливості використання розроблених методів для підвищення надійності та безпечності експлуатації змішувальних підігрівачів турбоустановок.

Зокрема, результати можуть бути застосовані для:

- створення систем діагностики стану змішувальних підігрівачів за штатно контрольованими параметрами турбоустановки;
- визначення режимів, у яких зростає ймовірність розвитку теплогідродинамічної нестійкості;
- обґрунтування встановлення систем регулювання витрати гріючої пари та рівня конденсату;
- вибору і встановлення демпфуючих пристроїв на трубопроводах;
- обґрунтування технічних рішень щодо модернізації систем турбоустановки;
- формування додаткових вимог до обладнання при модернізації регенеративної системи турбіни, зокрема при можливому застосуванні теплових насосів.

Автор зазначає можливість використання розроблених практичних рішень експлуатуючою організацією НАЕК «Енергоатом» для підвищення ефективності та безпечної експлуатації АЕС України.

8. Повнота викладення результатів дисертації в опублікованих працях

Основні результати дисертаційної роботи представлені у наукових публікаціях здобувача. У тексті дисертації зазначено сім статей у наукових фахових та міжнародних виданнях і монографію, причому дві статті опубліковано у виданнях категорії «А», що індексуються в міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science.

Тематика публікацій охоплює питання кваліфікації змішувальних підігрівачів в умовах термодинамічної нестійкості, безпеки ядерних енергоустановок, надійності систем та обладнання, управління аваріями та оцінювання працездатності систем, важливих для безпеки.

Наявні публікації в цілому відображають основні напрями дисертаційного дослідження і свідчать про апробацію результатів у професійному науковому середовищі.

9. Апробація результатів дисертаційної роботи

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних наукових конференціях, зокрема:

- XXX Міжнародній науково-практичній конференції «Development of modern science, experience and trends», Бостон, США, 11–14 жовтня 2022 р.;
- XXXIII Міжнародній науково-практичній конференції «Trends in the development of science in the modern world», Грац, Австрія, 23–26 серпня 2022 р.;
- XI Міжнародній науковій конференції «Information-Management Systems and Technologies», Одеса, Україна, 21–23 вересня 2023 р.

Таким чином, результати роботи пройшли належну апробацію на міжнародному рівні.

10. Теоретичне та практичне значення дисертаційної роботи

У теоретичному аспекті результати дисертації розширюють існуючі уявлення про механізми виникнення теплогідродинамічної нестійкості у змішувальних теплообмінниках, встановлюють роль незавершеності міжфазних тепломасообмінних процесів та інерційності напірно-витратної характеристики насоса, а також формують критеріальні умови переходу системи від стійкого до нестійкого стану.

У практичному аспекті запропоновані методи дозволяють оцінювати можливість виникнення небезпечних режимів за параметрами, що контролюються під час експлуатації турбоустановки, та можуть бути використані при розробленні систем діагностики, модернізації теплообмінного та насосного обладнання і формуванні заходів із запобігання гідродинамічним ударам. У заключних положеннях роботи автор безпосередньо визначає можливість застосування отриманих результатів для

діагностики змішувальних підігрівачів та обґрунтування технічних рішень щодо їх модернізації.

11. Зауваження та дискусійні положення

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу в цілому, необхідно висловити окремі зауваження та питання дискусійного характеру.

1. У дисертації при порівнянні розрахункових та експериментальних даних констатується їх консервативна розбіжність, яка пояснюється прийнятими припущеннями про ізотермічність процесу гідроудару та відсутність необоротних теплогідродинамічних втрат. Доцільно було б навести кількісну оцінку похибки або невизначеності розрахункового методу в усьому дослідженому діапазоні параметрів, а також оцінити похибки експериментальних вимірювань. Це дало б можливість більш строго визначити межі достовірності запропонованої моделі.

2. Прийняті в математичній моделі припущення щодо ізотермічності гідроудару та неврахування необоротних втрат забезпечують консервативність результату, однак бажано детальніше оцінити чутливість отриманих імпульсів тиску до цих припущень. Особливо це важливо при перенесенні результатів з експериментальної установки на натурне обладнання.

3. Розроблений у четвертому розділі критеріальний метод обґрунтовано для рівноважних, тобто стаціонарних, режимів. Сам автор зазначає, що запропонована модель не обґрунтована для перехідних режимів експлуатації турбоустановки. У зв'язку з цим доцільно чіткіше визначити межі застосування цього методу та показати взаємозв'язок між методом для стаціонарних режимів четвертого розділу і методом моделювання динамічних режимів, розробленим у другому розділі.

4. Практичні рекомендації щодо встановлення регуляторів витрати гріючої пари, регуляторів рівня конденсату та демпфуючих пристроїв є обґрунтованими за напрямом, однак їхня інженерна цінність була б вищою за

наявності конкретних рекомендацій щодо діапазонів регулювання, швидкодії системи, характеристик демпфуючих пристроїв та критеріїв їх вибору.

5. У тексті дисертації використовуються близькі, але не повністю тотожні поняття «термодинамічна нестійкість», «теплогідродинамічна нестійкість» та в окремих місцях «теплогідравлічна стійкість». Доцільно було б на початку роботи більш чітко визначити співвідношення між цими поняттями та надалі уніфікувати термінологію.

6. Розділ «Особистий внесок здобувача» сформульований надто стисло: в ньому зазначено лише участь автора в аналізі відомих досліджень щодо термодинамічної стійкості. Водночас дисертація містить розроблення нових методів, математичних моделей та експериментальну кваліфікацію, а більшість публікацій є колективними. Тому доцільно суттєво конкретизувати особистий внесок Д. С. Бундева в одержання кожного з основних наукових результатів.

7. З огляду на згадування в роботі сучасних теплогідравлічних кодів ANSYS та RELAP доцільним було б більш детально показати місце запропонованого детерміністського методу серед сучасних чисельних підходів: які задачі він вирішує ефективніше, у чому полягають його переваги за трудомісткістю та необхідним обсягом вихідних даних, а в яких випадках доцільним залишається застосування комплексних CFD- або системних теплогідравлічних кодів.

Наведені зауваження переважно мають дискусійний, уточнювальний та рекомендаційний характер, не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи та не ставлять під сумнів достовірність її основних наукових результатів.

12. Загальний висновок

Дисертаційна робота Бундева Дениса Степановича «Кваліфікація теплогідродинамічної стійкості у змішувальних теплообмінниках турбінного відділення ядерних енергоустановок» є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальне науково-технічне завдання,

пов'язане з визначенням умов виникнення теплогідродинамічної нестійкості та гідродинамічних ударів у змішувальних теплообмінниках турбінного відділення ядерних енергоустановок.

У роботі отримано нові наукові результати, розроблено детерміністські методи кваліфікації теплогідродинамічної стійкості, здійснено їх експериментальну перевірку та сформульовано практичні рекомендації щодо запобігання небезпечним режимам експлуатації змішувальних підігрівачів.

Зміст дисертації відповідає поставленій меті та основним завданням дослідження. Наукові положення й висновки мають достатній ступінь обґрунтованості, а результати роботи мають наукове та практичне значення для атомної енергетики.

За актуальністю теми, науковою новизною, обґрунтованістю основних положень, теоретичним і практичним значенням, повнотою опублікування результатів та рівнем апробації дисертаційна робота відповідає вимогам вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44. Зазначений Порядок є чинним. Вважаю, що Бундєв Денис Степанович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 143 «Атомна енергетика».

Офіційний опонент

професор кафедри нафтогазових
технологій, інженерії та теплоенергетики
Одеського національного
технологічного університету
доктор технічних наук, професор

Ірина БОШКОВА