

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Бундева Дениса Степановича
«Кваліфікація теплогідродинамічної стійкості у змішувальних теплообмінниках
турбінного відділення ядерних енергоустановок»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 143 Атомна енергетика

Актуальність теми дисертації

Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення надійності та безпечності експлуатації обладнання турбінного відділення ядерних енергоустановок. Виникнення теплогідродинамічної нестійкості у змішувальних теплообмінниках може супроводжуватися коливаннями тиску, витрати та рівня конденсату, гідродинамічними ударами, підвищеною вібрацією та пошкодженням внутрішніх конструкцій. Визначення умов виникнення цих явищ є важливим для обґрунтування експлуатаційних обмежень і заходів модернізації обладнання.

Дисертація спрямована на розроблення розрахункових методів оцінювання теплогідродинамічної стійкості змішувальних підігрівачів у робочих і перехідних режимах та експериментальну перевірку окремих положень моделі. Поєднання аналізу процесів конденсації з урахуванням динаміки системи подачі конденсату відповідає поставленому науково-прикладному завданню.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення ґрунтуються на аналізі досліджень теплогідродинамічної нестійкості, застосуванні рівнянь балансу маси, енергії та руху, а також положень теорії подібності. Для чисельного розв'язання рівнянь використано метод Рунге–Кутта. Розрахункові амплітуди коливань та стрибків тиску зіставлено з результатами дослідів на установках «Гідроудар» і «Насос».

Наведені зіставлення свідчать про узгодженість розрахункових та експериментальних результатів щодо досліджених гідродинамічних процесів. Водночас метрологічне забезпечення дослідів і кількісна оцінка розбіжностей потребують докладнішого висвітлення, що відображено в зауваженнях.

Наукова новизна одержаних результатів

До найбільш вагомих наукових результатів дисертації належать:

– розроблення детерміністського методу моделювання умов теплогідродинамічної нестійкості та гідродинамічних ударів у динамічних режимах змішувального підігрівача з урахуванням незавершеності конденсації та запізнення реакції системи подачі конденсату;

– визначення залежності амплітуд коливань тиску, рівня та витрати конденсату, а також відносного стрибка тиску при гідроударі від витрати гріючої пари для розглянутих розрахункових умов;

– розроблення критеріального методу оцінювання стійкості змішувального підігрівача поблизу рівноважного режиму на основі аналізу флуктуаційних відхилень тиску та витрати конденсату.

Зміст та стиль викладення результатів

Матеріал викладено послідовно, із застосуванням науково-технічної термінології. Текст проілюстровано схемами досліджуваних систем, експериментальних установок і графіками розрахункових та експериментальних залежностей. Окремі термінологічні й редакційні неточності потребують виправлення, проте не перешкоджають розумінню основного змісту роботи.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та одного додатка. За наведеними автором відомостями, загальний обсяг роботи становить 113 сторінок, список використаних джерел містить 70 найменувань, робота включає 20 рисунків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження, наведено положення наукової новизни і практичне значення результатів. Представлено відомості про зв'язок роботи з науково-технічними програмами, апробацію результатів та публікації здобувача.

У першому розділі проаналізовано дослідження теплогідродинамічної нестійкості в обладнанні енергоустановок. Розглянуто механізми виникнення низькочастотних і високочастотних коливань, аперіодичної нестійкості та гідродинамічних ударів. Проаналізовано вплив запізнення тепломасообмінних процесів і динаміки насосних систем на формування нестійких режимів. Визначено обмеження відомих підходів стосовно змішувальних теплообмінників та обґрунтовано напрям подальших досліджень.

Другий розділ присвячено розробленню методу кваліфікації умов теплогідродинамічної нестійкості та гідроударів у динамічних режимах змішувального підігрівача. Наведено розрахункову схему системи та математичну модель на основі рівнянь балансу маси, енергії й руху. Враховано незавершеність процесів конденсації та запізнення реакції напірно-витратної характеристики конденсатного насоса. За результатами чисельного розв'язання досліджено вплив витрати гріючої пари на амплітуди коливань тиску, рівня і витрати конденсату та величину стрибка тиску при гідроударі. Запропоновано заходи щодо зменшення коливань і запобігання гідроударам.

У третьому розділі наведено експериментальну перевірку розрахункових положень на установках «Гідроудар» і «Насос». Сформульовано критерії теплогідродинамічної подібності експериментальних і натурних умов, представлено принципові схеми установок та описано способи створення досліджуваних режимів. Розглянуто результати вимірювань амплітуд коливань і стрибків тиску, проведено їх зіставлення з розрахунковими значеннями. Обговорено можливі причини розбіжностей між розрахунком та експериментом.

У четвертому розділі розроблено критеріальний метод оцінювання теплогідродинамічної стійкості змішувальних підігрівачів поблизу рівноважного режиму. Розглянуто вплив флуктуаційних відхилень тиску та витрати конденсату, отримано залежності для визначення умов стійкості й виникнення гідроударів. Проаналізовано роль співвідношення витрат пари та конденсату. Сформульовано напрями використання результатів для діагностики стану підігрівачів і обґрунтування технічних рішень щодо модернізації систем турбоустановок. Зазначено обмеження застосування запропонованого в цьому розділі методу до перехідних режимів.

У висновках узагальнено основні наукові та практичні результати дослідження. У додатку наведено список публікацій здобувача за темою дисертації.

Відповідність результатів темі дисертації, галузі знань та спеціальності

Результати дослідження процесів тепломасообміну, гідродинамічної нестійкості та гідроударів в обладнанні турбінного відділення ядерних енергоустановок відповідають темі дисертації, галузі знань 14 Електрична інженерія та спеціальності 143 Атомна енергетика.

Оцінка рівня виконання наукового завдання

Дисертація містить огляд відомих підходів, розроблення математичних моделей, експериментальне зіставлення та практичні рекомендації. Така послідовність дослідження свідчить про володіння здобувачем методами математичного й фізичного моделювання. Основне завдання щодо розроблення методів кваліфікації теплогідродинамічної стійкості вирішено; застосування отриманих результатів потребує дотримання прийнятих припущень і визначених у роботі меж придатності моделей.

Наукове та практичне значення результатів дисертації

Наукове значення роботи полягає в розвитку підходів до спільного аналізу тепломасообмінних і гідродинамічних процесів у системі змішувального підігрівача. Практичне значення мають рекомендації щодо регулювання витрати

гріючої пари та рівня конденсату, застосування демпфуючих пристроїв і використання контрольованих параметрів для діагностики нестійких режимів.

У дисертації зазначено використання результатів у міжнародному проєкті ЄВРАТОМ NURECAB. Можливість застосування запропонованих рішень НАЕК «Енергоатом» представлено як перспективу їх практичного використання. Реалізація рекомендацій на конкретному обладнанні потребує окремого проєктного обґрунтування.

Повнота висвітлення результатів у публікаціях та особистий внесок здобувача

За наведеними у дисертації відомостями результати відображено у восьми наукових працях: одній монографії та семи статтях, з яких дві опубліковано у виданнях, що індексуються у базах даних Scopus та Web of Science. Зазначено апробацію на трьох міжнародних конференціях. Водночас особистий внесок здобувача у спільні теоретичні й експериментальні результати доцільно було б конкретизувати.

Дотримання принципів академічної доброчесності

У тексті наведено посилання на використані джерела та перелік публікацій за темою роботи. За результатами змістового ознайомлення очевидних ознак порушень академічної доброчесності не встановлено. Ця оцінка не замінює спеціалізованої перевірки текстових збігів і первинних експериментальних даних.

Зауваження та дискусійні питання стосовно положень дисертації

1. У вступі особистий внесок здобувача сформульовано лише як аналіз відомих досліджень щодо термодинамічної стійкості. Це не розкриває його участі в розробленні моделей, чисельних розрахунках, проведенні експериментів та обробленні даних. Необхідно конкретизувати особисто отримані результати, зокрема у працях, опублікованих у співавторстві.

2. Для рис. 3.3 і 3.4 доцільно було б додати відхилення розрахункових результатів від експериментальних.

3. У підрозділах 2.2 і 3.2 не зазначено, який саме варіант методу Рунге–Кутта використано, який крок інтегрування обрано та як перевірено точність чисельного розв'язку.

4. У підрозділі 3.2 на схемах експериментальних установок позначено вимірювальні прилади, однак не наведено їхніх типів, діапазонів вимірювання та похибок. Для датчиків реєстрації гідроудару не зазначено швидкодії, а для системи збору даних - частоти дискретизації.

5. Завищення розрахункових стрибків тиску порівняно з експериментом

пояснене неврахуванням необоротних втрат. Доцільно конкретизувати, які саме втрати в установках «Гідроудар» і «Насос» автор вважає визначальними.

6. У підрозділі 4.4 запропоновано діагностувати нестійкість за штатно контрольованими параметрами турбоустановки. Однак не конкретизовано мінімальний перелік вимірюваних величин, необхідних для практичного застосування отриманого критерію.

Наведені зауваження стосуються переважно повноти обґрунтування, представлення результатів і меж їх застосування. Вони потребують пояснень здобувача та не заперечують наукової і практичної цінності виконаного дослідження.

Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам

Дисертаційна робота Бундєва Дениса Степановича «Кваліфікація теплогідродинамічної стійкості у змішувальних теплообмінниках турбінного відділення ядерних енергоустановок» є завершеним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальне науково-прикладне завдання розрахункової та експериментальної кваліфікації умов стійкості обладнання турбінного відділення ядерних енергоустановок. Отримані результати мають наукову новизну та практичне значення для підвищення надійності експлуатації енергетичного обладнання.

За актуальністю теми, науковою новизною, обґрунтованістю основних положень та практичним значенням результатів дисертаційна робота відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 (зі змінами), а її автор - Бундєв Денис Степанович - заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 143 Атомна енергетика галузі знань 14 Електрична інженерія.

Доктор технічних наук, професор,
завідувачка кафедри суднових допоміжних установок
і холодильної техніки
Національного університету
«Одеська морська академія»



Ольга ХЛІЄВА