

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Кулеша Назарія Сергійовича
на тему «Тепломасообмін та гідродинаміка елементів сепаратора
пароперегрівача ВВЕР-1000», представлену на здобуття ступеня доктора
філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія»
за спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування»

Актуальність теми дисертації.

Для забезпечення умов ефективної, безаварійної та тривалої експлуатації турбінного обладнання блоку АЕС необхідна якісна сепарація краплинної рідини. Краплини рідини можуть утворюватися при їх винесенні з об'єму парогенератора або при конденсації вологої пари. Ці краплини можуть бути причиною виникнення значної ерозії лопаток останнього ступеня турбіни, що зменшує термін їх експлуатації. Для їх вловлювання встановлюються спеціальні сепараційні пристрої. Для вдосконалення цих пристроїв та підвищення ефективності їх роботи необхідно провести відповідні наукові дослідження та докладно вивчити особливості взаємодії рідини і газу, а також діапазон робочих параметрів, в межах яких реалізується стійкий режим течії рідкої плівки і відсутнє вторинне винесення рідини.

Виходячи з викладеного, вважаю, що тема даної дисертаційної роботи, мета якої полягає у визначенні особливості гідродинаміки і теплообміну в касетах проміжних сепаратор-пароперегрівач, є актуальною.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку літературних джерел. Загальний обсяг дисертації складає 115 сторінок.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- на основі аналізу фізичної моделі руху двофазного середовища в криволінійному горизонтальному каналі та відповідної математичної моделі визначена границя уловлювання дисперсної фази.
- визначено граничні режими роботи сепараційних жалюзійних пристроїв в залежності від дисперсності і кількості крапельної рідини, параметрів потоку і геометричних характеристик криволінійних каналів.
- визначені основні умови руйнування плівки і динамічного зриву крапель.
- запропоновано метод розширення діапазону стабільної роботи сепараційних пристроїв. На підставі отриманих кореляцій запропоновано оптимізацію конструкції жалюзійного пакету.

- визначено граничні режими утворення вторинного виносу краплин при русі двофазного середовища в сепараційних пристроях та особливостей тепломасообміну вологої пари в оребренних рекуперативних теплообмінниках.

- отримана кореляція критичних значень параметрів двофазного потоку для визначення нижньої границі процесу зриву крапель з плівки рідини від густини зрошування, геометричних характеристик каналу і фізичних властивостей рідини і газу. Для труб з повздовжнім оребренням у вигляді п-подібного профілю отримані кореляції, на підставі яких рекомендується виконувати оптимізацію геометричних характеристик оребрення.

Практична цінність результатів роботи полягає в тому, що вони можуть використовуватися при оптимізації сепараційних пристроїв барабанів котлів, горизонтальних парогенераторів і сепараторів-пароперегрівачів П контуру ВВЕР-1000, а також систем паливоприготування ГТУ. Також представлені результати дозволяють виконати оптимізацію конструкції рекуперативних теплообмінних апаратів з повздовжнім п-подібним оребренням.

Оцінюючи представлені результати роботи можна стверджувати, що здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Кулеша Н.С. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності – 142 «Енергетичне машинобудування» та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Енергетичне машинобудування».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «енергетика».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Кулеша Назарія Сергійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою. Матеріал викладено логічно та послідовно, доступною для сприйняття мовою, із дотриманням загальноприйнятої термінології.

Коротка характеристика змісту роботи.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи. Вона полягає в тому, що якісна сепарація краплинної рідини є важливою умовою для забезпечення тривалої безаварійної роботи турбінного обладнання блоку АЕС. Краплини можуть утворюватися як при конденсації вологої пари, так і внаслідок винесення крапель рідини з об'єму парогенератора. Тому важливим є питання щодо визначення особливостей взаємодії краплин рідини і газу.

Вирішення цих питань і відповідні технічні рішення сприятимуть підвищенню ефективності роботи сепараційних пристроїв.

У вступі сформульовано також мету роботи, розглянуто об'єкт, предмет та методи досліджень, визначено наукову новизну, ступінь обґрунтованості наукових результатів та висновків, практичну цінність результатів роботи. Приведені відомості про особистий внесок автора у результати. Наведено дані про апробацію результатів дисертаційної роботи, про публікації за темою дисертації, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі виконано аналіз літературних джерел, що присвячені типам парових турбін АЕС. Розглядаються особливості парових турбін для атомних енергетичних установок. Аналізуються типи парових турбін та сепараторів пароперегрівачів, що найчастіше застосовуються в атомних енергетичних установках. Вказується, що для АЕС потужністю більше 1000 МВт застосування швидкохідних турбін зіштовхується з рядом проблем, які вимагають певних складних технічних рішень. Тому для турбін великих потужностей (1000 МВт і більше) доцільніше застосовувати тихохідні турбіни з частотою обертання 1500 об/хв. З аналізу особливостей процесів, що протікають в проточній частині турбіни, випливає, на виході з турбіни насичена пара вже містить близько 0,3% вологості. При цьому, якщо турбоустановка не має пристроїв для вилучення вологи, на виході з останнього ступеня турбіни пара міститиме до 20% вологості і більше. У таких умовах лопатки останнього ступеня під впливом вологи будуть піддаватися сильній ерозії і матимуть дуже малий ресурс.

В цьому розділі проаналізовано також діаграми робочого процесу у волого-парових турбінах. На цих термодинамічних діаграмах представлено процес розширення вологої пари. З аналізу цих діаграм робиться висновок про можливості утворення крапельної вологи.

В першому розділі розглядаються також методи сепарація вологи в турбіні. Вказується, що у турбінах застосовується внутрішнє та зовнішнє видалення вологи. Внутрішнє видалення вологи тісно пов'язане з конструктивними особливостями проточної частини турбіни. Наведено принципи, що покладено в основу внутрішнього видалення вологи. Проаналізовано також способи зовнішнього видалення вологи. Наведено типи сепараторів вологи, що застосовуються у турбоустановках. Розглядаються також пристрої для проміжної сепарації та перегріву пари.

З аналізу літературних джерел випливає, що сучасні технології дозволяють створювати турбіни потужністю до 800 МВт. Але для більших потужностей турбін необхідно використовувати нові підходи та технічні рішення для запобігання впливу крапельної вологи на їх роботу. За результатами аналізу літературних джерел формулюються задачі досліджень в дисертаційній роботі.

У другому розділі розглядаються особливості гідродинаміки парорідинних течій у криволінійних каналах сепараційних пристроїв енергетичних установок. Оцінюється ефективність процесу осушення пари в циклі паротурбінної установки. Вказується, що утворення крапельної рідини в проточній частині турбіни пов'язане з термодинамічною особливістю циклу, за

яким працює паротурбінна установка двоконтурної реакторної установки ВВЕР-1000. Розглядаються питання оцінки ефективності роботи сепараційних пристроїв. Для проведення даної оцінки досліджується рух двофазного середовища в криволінійному каналі жалюзійного пакета. Вивчаються особливості динаміки такого руху. Вказується, що важливим фактором, який необхідно враховувати при моделюванні процесів в інерційних сепараційних пристроях, є криволінійність каналів, по яким рухається двофазний потік.

Наведено основні рівняння, що описують рух краплини у в'язкому середовищі в наближенні Стокса. За цією наближеною моделлю оцінюються умови її вірогідного зіткнення з поверхнею гофри. З використанням наведеної моделі було проведено дослідження процесу сепарації крапельної рідини з вологої пари. Узагальнення результатів досліджень виконувалось з використанням теорії подібності. Аналіз отриманих результатів визначає умови контакту крапель рідини з поверхнею гофри жалюзійного сепаратора. Вивчається також питання граничного режиму порушення стійкості плівки рідини. Була виявлена гідродинамічна особливість течії плівки по поверхням з сітковим капілярно-пористим покриттям в залежності від густини зрошення.

В третьому розділі досліджується теплообмін при поздовжньому русі вологої пари в оребрених теплообмінниках. Розглядається теплообмін в першій ступені проміжного сепаратора-пароперегрівача (СПП). Наведено методику розрахунку теплообміну, яка передбачає спільне розв'язання рівнянь теплового балансу і тепловіддачі для гріючої пари і вологої пари, що від неї нагрівається. Теплота, що виділяється в результаті конденсації пари на вертикальній внутрішній поверхні теплообмінної труби, передається шляхом вимушеної конвекції робочому тілу через зовнішню оребрену поверхню труби. Наведено рівняння, що описують даний процес.

Розглядається гідродинаміка процесу формування двофазного потоку. Представлено залежність числа Рейнольдса від чисел Вебера та Бонда, яку отримано за результатами досліджень процесу руху крапель рідини у криволінійних каналах, і який визначає умови сепарації крапель при зміні режимних параметрів двофазного потоку і геометрії каналу.

Визначено особливості теплообміну вологої пари при вимушеній конвекції на трубах з повздовжнім оребренням. За результатами експериментальних досліджень одержано співвідношення для визначення нижньої границі процесу зриву крапель з плівки рідини від густини зрошення, геометричних характеристик каналу і фізичних властивостей рідини і газу. Для труб з повздовжнім п-подібним оребренням одержано залежності, за яких можливо виконувати оптимізацію геометричних характеристик оребрення.

У четвертому розділі представлено результати дослідження роботи обладнання технологічної схеми 2-го контуру блоку ВВЕР-1000. Представлено опис технологічної схеми і основного обладнання 2-го контуру. Наведено принципову схему парової турбіни К-1000-60/3000. З цією турбіною передбачається встановлення чотирьох вертикальних СПП, призначених для видалення вологи та перегріву пари. В цьому розділі представлено результати аналізу та обробка даних досліджень, що були отримані при випробування

турбіни К-1000-60/3000 в діапазонів від 400 МВт до 1000 МВт на обладнанні науково-дослідного центру надійності та безпеки АЕС та навчально-наукового центру підтримки ядерної захищеності. Результати досліджень показали реальні зміни у режимах роботи турбіни.

У вигляді таблиці наведено також дані досліджень параметрів роботи реального промислового об'єкту. З аналізу цих даних випливає, що в процесі його довготривалої експлуатації спостерігається певне відхилення параметрів робочого тіла після сепараторів-пароперегрівачів, а саме - зниження температури пари на 3...5 °С. Найбільш вірогідною причиною такої неузгодженості є виникнення додаткового контактного термічного опору між повздовжнім оребренням і основною трубою. Погіршення контакту і виникнення цього додаткового опору пов'язано зі значним терміном експлуатації касет СПП. При цьому виникають термічні напруження, що пов'язано зі змінами режимів роботи блоку та внаслідок невисокої якості зварювальних робіт. Тому в розрахунковій залежності для відповідного коефіцієнту теплопередачі рекомендується врахувати величину додаткового контактного термічного опору.

У **висновках** наведено узагальнення отриманих у дисертаційній роботі наукових й практичних результатів.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати дисертації висвітлені у 2 статтях фахових наукових виданнях України, що проіндексовані у базі Scopus та віднесені до третього квартилю (Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports. Також результати дисертації були апробовані на ряді наукових фахових конференціях.

Публікації здобувача мають високий науковий рівень. Вони проходили рецензування, мають оригінальні висновки, відповідні посилання на запозичені джерела та не містять порушень принципів академічної доброчесності. Всі публікації, зараховані за темою дисертації, виконані у співавторстві з науковим керівником, що свідчить про високий рівень особистого внеску здобувача у проведені дослідження. Наукові результати, описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

При аналізі роботи виникли певні зауваження:

1. Під час аналізу конструкції СПП сучасних парових турбін бажано було б навести конструкції СПП закордонних виробників.
2. При розгляді одиночної краплі в криволінійному каналі бажано врахувати розвиток динамічного примезового шару, щоб показати яким чином це може вплинути на траєкторію краплі.

3. Автор стверджує, що основною причиною погіршення роботи касет першої ступені СПП є збільшення термічного опору теплопередач, доцільно було б визначити величину контактного термічного опору.
4. Враховуючи сталий режим роботи ВВЕР – 1000 все ж певний інтерес викликає аналіз зміни параметрів блоку в діапазоні навантаження.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Кулеша Назарія Сергійовича на тему «Тепломасообмін та гідродинаміка елементів сепаратора пароперегрівача ВВЕР-1000» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 14 «Електрична інженерія». Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «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 р. № 44.

Здобувач Кулеш Назарій Сергійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування».

Офіційний опонент:

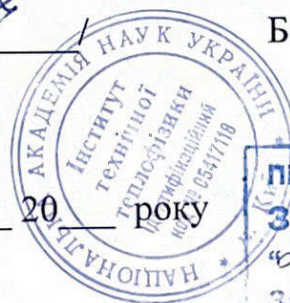
д.т.н., головний науковий співробітник
відділу теплофізичних основ енергоощадних
технологій Інституту технічної теплофізики
НАН України

Борис ДАВИДЕНКО

М.П.

« ____ »

20 ____ року



Підпис гр. *Борис Давиденко*
ЗАВІРЯЮ
«*23*» *08* 20*24* р.
Зав. ком. *Давиденко*