

## 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.**

Робота присвячена питанням якісної сепарації краплинної рідини, яка утворюється в процесі винесення рідини з об'єму парогенератора та під час конденсації вологої пари, як важливих чинників тривалої безаварійної роботи турбінного обладнання блоку АЕС, та питанням теплообміну під час перегрівання вологої водяної пари на оребреній поверхні паропідігрівача. В процесі довготривалої експлуатації було виявлено зниження температури пари на  $\Delta t = (3 \dots 5)^\circ\text{C}$ . Як наслідок, відбулось погіршення умов роботи останніх ступенів циліндру низького тиску (ЦНТ) і зниження техніко-економічних характеристик роботи турбіни. Дослідження роботи сепаратора-пароперегрівача виявили можливості вдосконалення сепараційних елементів, а також, підвищення інтенсивності теплообміну в елементах обладнання.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, наведених у дисертаційній роботі, забезпечується коректністю припущень, які лежать в основі виконаних наукових досліджень, та застосуванням сучасних наукових підходів та методів.

Наукова новизна сформульована у дисертації. В процесі вирішення поставлених задач одержано наукові результати:

1. На основі аналізу фізичної моделі руху двофазного середовища в криволінійному горизонтальному каналі розроблена математична модель та визначена границя уловлення дисперсної фази.
2. Визначено граничні режими роботи сепараційних жалюзійних пристроїв в залежності від дисперсності і кількості крапельної рідини, параметрів потоку і геометричних характеристик криволінійних каналів
3. Представлена математична модель для визначення траєкторії руху краплі рідини у криволінійному каналі гофри жалюзійного пакету сепаратора-пароперегрівача.
4. Визначені основні умови руйнування плівки і динамічного зриву крапель.



5. Запропоновано метод розширення діапазону стабільної роботи сепараційних пристроїв. На підставі отриманих кореляцій виконати оптимізацію конструкції жалюзійного пакету.

6. Вдосконалено методику розрахунку рекуперативних теплообмінних апаратів, де в якості робочого тіла використовується волога пара.

7. Визначено граничні режими утворення вторинного виносу при русі двофазного середовища в сепараційних пристроях та особливостей тепломасообміну вологої пари в оребрених рекуперативних теплообмінниках.

8. 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.

9. Представлено результати, що дозволяють виконати оптимізацію конструкції рекуперативних теплообмінних апаратів з повздовжнім п-подібним оребренням.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Кулеша Н.С. відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності – 142 «Енергетичне машинобудування»

Дисертація являється самостійною і завершеною науковою роботою здобувача, в якій сформульовано задачі дослідження, проаналізовано літературні джерела з даної наукової проблеми, має наукову новизну та практичну цінність. В тексті дисертаційної роботи не було знайдено порушень академічної доброчесності. Дисертаційна робота Кулеша Н.С. 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. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

#### **Мова та стиль викладення результатів**

Дисертація складається з анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел, який включає 35 наукових робіт. Повний обсяг дисертації становить 115 сторінок. Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Дисертаційна робота написана державною українською мовою із дотриманням загальноприйнятої термінології та інших характеристик. Матеріал викладено доступно, логічно та послідовно.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, визначено мету, об'єкт, предмети дослідження, наведені пункти наукової новизни, інформацію щодо



ступеня обґрунтованості наукових положень та висновків, що сформульовані в роботі, практичної цінності наукових результатів, особистого внеску здобувача в наукових результатах, а також інформацію щодо апробації результатів досліджень. Описано структуру та обсяг дисертаційної роботи.

**У першому розділі** представлено літературний огляд по основним типам турбін АЕС та сепараторів-пароперегрівачів. Виконано огляд конструктивних особливостей найбільш розповсюджених типів турбін та сепараторів пароперегрівачів. Проаналізовані особливості парових турбін для атомних енергетичних установок.

Проаналізована доцільність застосування тихохідних турбін для великих одиничних потужностей (1000 МВт і більше). Наголошено, що з проточної частини турбіни видаляється великодисперсна волога, яка чинить суттєвий вплив на ефективність роботи турбіни, оскільки великі краплі та плівки викликають ерозію лопаток та інших елементів проточної частини. Наведені та проаналізовані шляхи зниження кінцевої вологості пари після розширення в ЦВТ. Підкреслено, що у турбінах АЕС застосування того чи іншого способу, а також вибір параметрів, при яких здійснюються видалення вологи та проміжне перегрівання, визначається принциповою тепловою схемою турбоустановки на підставі техніко-економічних розрахунків.

**У другому розділі** розглянуті основні положення та результати досліджень гідродинаміки парорідинних потоків у криволінійних каналах сепараційних пристроїв енергетичних установок, надійність роботи яких є одним із напрямів підвищення техніко-економічних характеристик і надійності роботи енергетичного обладнання, оскільки крапельна рідина у двофазному потоці приводить до ерозійних і корозійних процесів в циліндрах низького тиску парових турбін (ЦНТ).

Виконано аналіз шляхів отримання гомогенного робочого тіла після сепараційних пристроїв. В багатьох випадках використання бар'єрних фільтруючих елементів неможливо, тому єдиним шляхом забезпечення необхідної якості робочого тіла є використання інерційних сепараційних пристроїв, у тому числі жалюзійних.

**Третій розділ** присвячений дослідженню гідродинаміки та теплообміну двофазних середовищ при русі вологої пари в каналах теплообмінника з повздовжнім оребренням зовнішньої поверхні труб. Традиційно при проєктуванні теплообмінного обладнання, в якому як робоче тіло використовується волога пара, не враховуються особливості взаємодії між краплями рідини і теплообмінною поверхнею, що приводить до невідповідності параметрів теплоносія реальним значенням. Особливо значення дана проблема набуває в парових турбінах, які працюють на вологій парі.

Виконано аналіз та визначені граничні режими вторинного виносу крапель рідини з гребенів хвиль плівки. На основі експериментальних досліджень порушення гідродинаміки руху двофазного потоку у каналі отримано співвідношення для визначення критичних значень параметрів двофазного потоку для визначення нижньої границі процесу «захливання» від густини зрошування, геометричних характеристик каналу і фізичних



властивостей рідини і газу. Для труб з повздовжнім оребренням п-подібного профілю отримані кореляції, на підставі яких рекомендується виконувати оптимізацію геометричних характеристик оребрення.

У четвертому розділі виконаний аналіз та обробка отриманих експериментальних результатів випробування турбіни К-1000-60/3000 на обладнанні науково-дослідного центру надійності та безпеки АЕС та навчально-наукового центру підтримки ядерної захищеності, мультифункціональному тренажері реакторної установки РАЕС – 3, ВВЕР-1000. Невідповідність температури перегрітої пари після підігрівача нормативним, спонукала до наукового пошуку причин відхилень. З факторів, що стали причиною зміни температурного режиму підігрівача задекларовано як відхилення в роботі СПП, так і збільшення термічного опору контакту між оребренням та основною теплообмінною трубою внаслідок значного терміну експлуатації обладнання. Для аналізу та обробки даних, були використані дані з блоку 3 РАЕС ВВЕР-1000 та дані взяті з лабораторії (тренажера), в якій встановлений симулятор блоку РАЕС 3 ВВЕР-1000, та паспортні параметри обладнання. Найбільш вірогідною причиною неузгодженості температурного режиму прийнято вважати наявність додаткового термічного опору контакту між повздовжнім оребренням і основною трубою. Погіршення контакту пов'язано зі значним терміном експлуатації касет СПП внаслідок виникання термічних напружень в результаті зміни режимів роботи блоку та якості зварювальних робіт. Тому в залежність для визначення коефіцієнта теплопередачі внесено величину додаткового термічного контакту ( $R_k$ ).

#### **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 2 наукових фахових конференціях. Публікації здобувача мають високий науковий рівень, 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 проведенні 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.**

1. З 9 пунктів наведеної в дисертації наукової новизни, деякі викликають сумніви. Так, останній пункт відноситься до висновків, а не до наукової



новизни. Крім того, пункт № 6 про вдосконалення методики розрахунку теплообмінного апарата взагалі не являється науковою новизною.

2. На рис.2.2, наведені експериментальні точки без розшифрування умов, за яких ці дані отримані. Крім того, тексти немає пояснень щодо  $Re_o$  як на рис.2.2, так і у співвідношенні (2-17).

3. Для узагальнення експериментальних даних по визначенню границі порушення гідродинаміки руху, пов'язаного з початком виносу крапель рідини

з плівки, був обраний вид функції:  $K = f(Fr_\delta, We_{кр})$ , на основі якої отримані розрахункові співвідношення 2.31 та 2.32. Але число гідродинамічної

стійкості Кутателадзе в 2.31 та 2.32 записано як  $K_w = \frac{W_{кр}'' \cdot (\rho'')^{0.5}}{(g^2 \cdot \sigma \cdot (\rho' - \rho''))^{0.25}}$ , а

число Вебера як  $We_{кр} = \frac{\sigma}{(\rho' - \rho'') \cdot D^2}$ , що свідчить про невідповідність системи

одиниць СІ, за якої розмірність поверхневого натягу повинна підставлятись в

н/м, а числа подібності відповідно матимуть вигляд:  $K_w = \frac{W_{кр}'' \sqrt{\rho''}}{\sqrt[4]{g \sigma (\rho' - \rho'')}} \cdot D$  та

$We_{кр} = \frac{\sigma}{g (\rho' - \rho'') D^2}$ .

4. В третьому розділі рекомендується тепловий розрахунок оребреної поверхні теплообмінника після сепаратора виконувати за рівнянням теплопередачі через приведений до оребреної стінки коефіцієнт теплопередачі з врахуванням термічних опорів від накипу. Але така методика справедлива лише у випадку однофазних течій без фазових перетворень. В даному випадку гостра насичена пара всередині труби конденсується, а перегрівання пари із сепаратора супроводжується випаровуванням краплин. Тобто коефіцієнти тепловіддачі залежать від густини теплового потоку, який в рази (кратно коефіцієнту оребрення) більше з боку гладкої поверхні ніж оребреної. В такому випадку коректно приводити розрахунок до густини теплового потоку на внутрішню неоребрену стінку, як правило графічним методом, або ітерацією, записавши залежності для густини теплового потоку через температурні напори та термічні опори зліва та справа внутрішньої поверхні труби.

5. Автор пропонує для розрахунку відривного діаметра краплини рідини під час винесення з поверхні плівки використовувати співвідношення Фрітца, а на кромці гофрованого листа розмір краплин в момент відриву приймати рівним товщині гофрованої пластини. В дисертації не наводиться обґрунтування даного положення.

6. У співвідношенні (3-4) термічний опір, що виникає при порушенні контакту зварювального з'єднання оребрення із зовнішньою поверхнею (позначено  $R_2$ ), внесено як складову термічного опору теплопередачі. Але це викликає сумнів щодо коректності. Контактний термічний опір під ребром зменшує ефективність ребра і повинен бути врахований при визначенні ефективності ребра. Співвідношення (3-4) містить приведений до оребреної стінки коефіцієнт



тепловіддачі  $\alpha_{пр}$ , в який входить ефективність ребра, де і враховується термічний опір з'єднання ребра з поверхнею. Але для спарених U-подібних ребер, які приварені полчкою, має місце додатковий термічний опір для частини периметра труби, занятого смужками між U-подібними ребрами. Тому величина  $R_2$  у співвідношенні (3-4) коректно записати як добуток з часткою периметра труби, занятої смужками, а  $R_1$  – як добуток з часткою периметра труби не занятої смужками.

7. Автором моделювався вплив геометричних характеристик повздовжніх ребер на процеси теплообміну і, як результат, надані два співвідношення (на стр. 77) – залежності ефективності ребра від висоти ребра та від товщини ребра. Але в практиці розрахунків ребрених поверхонь ефективність повздовжніх ребер розраховується за співвідношенням (3-21), яке отримано в результаті розв'язання диференціального рівняння теплопровідності в ребрі під час відведення теплоти боковою поверхнею. Співвідношення (3-21) враховує одночасно вплив на ефективність і висоти, і товщини, і матеріалу ребра при різній інтенсивності тепловідведення від поверхні ребер. Для визначення дійсної, а не розрахункової, ефективності ребра в процесі експлуатації теплообмінника необхідні експериментальні дані по розподіленню температури поверхні ребра по висоті, яке залежатиме від умов охолодження ребра. Оскільки такі вимірювання не виконувались не зрозуміла доцільність наведених на стр. 77 залежностей.

8. В тексті дисертації відведено значний об'єм на загальновідому інформацію з основного обладнання атомних станцій. Вважаючи на конкретику теми дисертації було б доцільно зосередитись на конструктивних та експлуатаційних особливостях саме сепаратора пароперегрівача ВВЕР-1000, а не на станціях.

9. В роботі пропонується для стабілізації роботи сепараційних пакетів використання капілярно-пористої структури поверхні стінок каналів, але розрахункові співвідношення для меж стійкості плівки наводяться лише для сіткового капілярно-пористого покриття і то для протитечійного режиму руху плівки та пари.

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

### **Висновок про дисертаційну роботу**

Одержані автором нові теоретично та експериментально обґрунтовані результати у сукупності розв'язують важливе науково-практичне завдання – забезпечення ефективної роботи сепараційних пристроїв пари, як вагового фактора тривалої безаварійної роботи турбінного обладнання АЕС.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Кулеша Назарія Сергійовича "Тепломасообмін та гідродинаміка елементів сепаратора пароперегрівача ВВЕР-1000" виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності, є закінченим науковим



дослідженням, за своїм змістом, 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, а 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., завідувач кафедри теплоенергетики  
та холодильної техніки Національного  
університету харчових технологій  
МОН України

*В. Петренко*

Валентин ПЕТРЕНКО

М.П. «02» вересня 2024 року



*Валентин Петренко*  
завіряю  
*В. Петренко*  
*М. Петренко*