

# **КОМПЛЕКС ДОСЛІДЖЕНЬ І РОЗРОБОК З ПІДВИЩЕННЯ ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК**

Реферат роботи, яка подається для участі у конкурсі зі здобуття  
Державної премії України в галузі науки і техніки 2020 року

## **Актуальність роботи**

Функціонування основних енергетичних потужностей України базується на принципах непрямого перетворення енергії первинного її джерела. Генерація та перенесення теплоти є найважливішими, критичними ланками у ланцюгу процесів таких перетворень.

Теплогідравлічні процеси, які протікають в енергетичних установках, супроводжуються зміною властивостей і режимів руху теплоносіїв, їх агрегатного стану, високими значеннями температур і тисків. Ці фактори визначають умови роботи теплогенеруючого, теплообмінного і допоміжного обладнання, трубопроводів, насосів, інших елементів теплової схеми, їх спроможність надійно і безаварійно працювати впродовж визначеного періоду експлуатації. Визначальною є роль теплогідравлічних процесів і при виникненні аварійних ситуацій, коли для мінімізації їх наслідків необхідно забезпечити ефективне і надійне відведення залишкового тепловиділення від теплогенеруючих установок, особливо ядерних реакторів.

Важливим також є те, що відносна частка теплогенеруючого та теплообмінного обладнання енергогенеруючих об'єктів за сумарною масою, трудомісткістю виготовлення і вартістю є превалюючою. Значення цих ключових характеристик напряму пов'язані з досконалістю організації теплогідравлічних процесів в енергетичному обладнанні, ступенем їх інтенсифікації, оптимізацією співвідношення інтенсивності переносу теплоти та імпульсу.

З огляду на вищезазначене, представлені в даній роботі дослідження і розробки з підвищення теплогідравлічної ефективності та надійності енергетичних установок, безумовно, є актуальними.

**Метою роботи** є підвищення ефективності, надійності функціонування і безпеки експлуатації енергетичних установок шляхом поглибленого аналізу, інтенсифіка-

ції і оптимізації теплогідравлічних процесів в енергетичному обладнанні, розробки і впровадження науково обґрунтованих технічних рішень з його удосконалення.

**Робота являє собою комплекс фундаментальних і прикладних досліджень і розробок** за тематикою, яка включає: процеси в парорідинних потоках, в тому числі, термоакустичні явища та теплогідродинамічну нестійкість; теплогідравлічні процеси при надкритичних параметрах теплоносія в тепловидільних збірках активних зон перспективних атомних реакторів; процеси конвективного теплообміну в розвинених теплообмінних поверхнях; високоефективні системи теплопередачі випарувально-конденсаційного типу; оптимізацію ефективних стратегій управління надійністю енергообладнання. Значна частина отриманих результатів досліджень є унікальними.

**Робота спрямована** на забезпечення надійного прогнозування кризових явищ і аварійних ситуацій, розробку методів їх запобігання, підвищення ефективності теплообмінних процесів, розвинення пасивних методів теплопередачі, тепловідведення і теплового захисту.

### **Основні науково-технічні результати роботи і їх новизна**

З метою підвищення надійності роботи трубопровідних систем другого контуру ядерних енергетичних установок проведено дослідження низькошвидкісних двофазних потоків і отримано наступні фундаментальні результати. Вперше розкрито особливості механізму течії двофазних потоків через ділянки труб з місцевими гідравлічними опорами, показано наявність 4-х характерних режимів течії, відповідальних за значну вібрацію труб у таких випадках, отримано узагальнену криву кипіння, яка також пояснює нестійкість течії в парогенеруючих каналах. Крім того, проведено серію унікальних експериментів з визначення швидкості звуку в низькошвидкісних двофазних потоках. Вперше показано, що швидкість звуку визначається дискретною структурою двофазного потоку, а процеси низькочастотної акустики і динаміки такого потоку в цілому визначаються пружно-інерційними властивостями двофазної суміші як дискретної структури осциляторів "рідина-газовий снаряд або бульбашка". Вперше визначено залежності для ро-

зрахунку швидкості звуку в двофазних середовищах і в підкипаючих потоках з бульбашками на стінці труби.

Представлено результати експериментальних досліджень формування кризи течії в двофазному потоці, що рухається у трубопроводі. Виявлено фізичний механізм самоорганізації течії двофазного потоку в кризу течії, яка полягає в тому, що при прискоренні потоку відбувається дроблення його дискретної структури (рідина – пар) і збільшення частоти коливань тиску, які поширюються через вихід трубопроводу. Ступінь затухання хвиль тиску, що розповсюджуються назустріч потоку, пропорційний квадрату характерної частоти коливального процесу або обернено пропорційний квадрату розміру дискретних структур (рідини та пари). Подальше підвищення перепаду тиску на трубопроводі та, відповідно, збільшення швидкості потоку призводять до умов, коли збурення тиску, спричинені проходженням дискретної структури потоку через вихід трубопроводу, будуть затухати на відстанях, порівняних з розмірами його газорідинних структур, що визначатиме величину стрибка ущільнення. Сигнали про зміну тиску на виході трубопроводу не проходять на його вхід, внаслідок чого питома витрата потоку стає незалежною від протитиску. При цьому ознаки кризи течії проявляються в наступному:

- швидкість потоку на виході трубопроводу дорівнює локальній швидкості звуку;
- має місце стрибок тиску з коливанням його меж в протифазі.

Проблема дослідження впливу вібрації поверхні трубопроводу і коливань тиску в трубопроводі на гідравлічний опір каналу є дуже актуальною. В роботі виконано серію експериментів з дослідження гідравлічного опору трубчастих каналів, що обігриваються змінним струмом. Дослідженнями встановлено, що зниження гідравлічного опору склало 22%, що важливо враховувати при проектуванні струмопроводів генераторів і прямоточних електронагрівачів.

Проведено дослідження зниження вібрації трубопроводів з двофазними потоками шляхом переведення снарядного режиму в кільцевий шнековим завихрювачем. Для вирішення цього завдання розроблено метод розрахунку осьового шнекового завихрювача з безударним входом та змінним кутом. Дослідження пульсацій тиску в двофазному потоці після завихрювача показали, що вони в середньому в  $2,5 \div 3,0$

рази нижчі, ніж без нього. При цьому сплески тиску, пов'язані з ударом рідкої пробки, знижуються в  $8 \div 10$  разів. Установка завихрювача на конденсатопроводі КС-1 турбіни К500-65/3000 призвела до зниження розмаху вібрацій в  $5 \div 7$  разів.

В результаті проведених експериментальних досліджень енергетичної арматури різних типів вперше отримано критерій, що дозволяє діагностувати пошкодження та контролювати герметичність арматури при вхідному контролі та після ремонту.

Представлено оригінальне технічне рішення з використання енергії пари для організації підживлення парогенераторів АЕС в умовах її повного електрознеструмування. Для забезпечення надійної роботи приводу підживлювального насоса може бути застосована комбінована конструкція турбоприводу, що складається з насаджених на один вал лопаткової турбіни Лаваля і передвключеної дискової турбіни (турбіни Тесла). Дослідження показали, що процес розширення пари в такій двоступеневій конструкції турбоприводу проходить при вологості пари меншій, ніж  $12 \div 14\%$ , що є цілком задовільним за умов ерозійних руйнувань.

В результаті серії досліджень, проведених при параметрах, близьких до параметрів першого контуру реакторної установки ВВЕР-1000 (16 МПа), встановлено, що основною причиною акустичних явищ при наявності течії теплоносія з високими параметрами є швидкість його струменя, а не особливості потоку, що закипає. Встановлена можливість проведення діагностики протікання теплоносія в умовах промислових шумів в діапазоні ультразвукових коливань (біля 40 кГц). Представлено рекомендації щодо системи моніторингу протікання фланців верхнього блоку реактора ВВЕР-1000.

Розглянуто основні положення моделювання умов виникнення критичних гідроударів внаслідок інерційності напірно-витратної характеристики насосів та проведено верифікацію такого методу з застосуванням отриманих результатів експериментальних досліджень. Враховуючи невизначеність окремих вихідних даних, можна вважати, що результати розрахункового моделювання задовільно узгоджуються з експериментальними даними щодо коливань тиску в робочих режимах поршневих насосів. Запропоновано оригінальний підхід до визначення умов гідродинамічних ударів при закритті арматури як наслідку аперіодичної не-

стійкості. На відміну від відомих підходів запропонований метод враховує умови формування гідродинамічного удару в залежності від коефіцієнту гідродинамічного опору і швидкості закриття арматури, конструкційно-технічних характеристик елементів трубопровідної системи, теплофізичних властивостей потоку та інших визначальних чинників. За результатами числового інтегрування отримано область значень критеріїв виникнення гідродинамічних ударів як наслідок аперіодичної нестійкості при трансзвукових течіях двофазних парорідинних потоків.

На підставі проведеного аналізу положень оптимізації стратегій управління надійністю енергообладнання встановлено визначальний критерій оптимізації ефективних стратегій управління надійністю.

Отримала розвиток теорія конвективного теплообміну в оребрених поверхнях нагрівання, що відкриває реальні шляхи підвищення ефективності і надійності теплообмінного обладнання енергетичних установок. Зокрема, виявлено існування у кореня ребер інтенсивних вторинних відривних течій, що значною мірою визначають характер розподілу інтенсивності тепловіддачі по поверхні ребристих труб. Виявлено два типи вторинних течій, які виникають перед лобовою частиною циліндра, що несе оребрення. Виявлено і досліджено аеродинамічну і теплову взаємодію труб, зібраних у пакет. Показано, що геометрія розміщення і ступінь оребрення значною мірою визначають рівень збуреності і рівень локальних швидкостей течії на поверхні ребристих труб, з якими пов'язана інтенсивність локального і середньоповерхневого теплообміну. Вперше створено фізичну модель процесів течії і теплообміну на поверхні ребристих труб. Отримано універсальні узагальнюючі залежності для визначення характеристик інтенсивності теплообміну і аеродинамічного опору в пакетах оребрених і гладких труб в діапазонах геометричних і режимних параметрів, що відповідають вимогам існуючих і можливих потреб.

На основі виявлених закономірностей запропоновано нові методи інтенсифікації теплообміну в пакетах оребрених труб і нові типи розвинених поверхонь — плоскоовальні труби з неповним поперечним оребренням, труби з конфузорно підігнутими ребрами, труби з накатним пелюстковим оребренням та гвинтоподібні труби з рівнорозвиненими зовнішньою і внутрішньою поверхнями. Запропоновані

і досліджені нові типи розвинених поверхонь дозволяють покращити масогабаритні показники теплообмінного обладнання на  $30 \div 50$  %, знизити аеродинамічний опір в  $2 \div 2,5$  рази, підвищити його надійність і поліпшити експлуатаційні характеристики.

Аналіз особливостей теплових процесів і можливостей традиційних способів теплопередачі в енергетичних установках показує актуальність і доцільність створення і впровадження високоефективних систем теплопередачі випаровувально-конденсаційного типу (ВКТ). Тому в роботі виявлено та проаналізовано теплофізичні переваги теплообмінників ВКТ, якими є: можливість ефективного розвинення поверхні зі сторін обох теплообмінних середовищ, можливість перерозподілу довжин теплообмінних зон теплопередавальних елементів ВКТ, можливість організації протитоку теплообмінних середовищ. Комплекс цих переваг відповідає вимогам і умовам, що висуваються до пасивних систем тепловідведення і теплового захисту в атомній енергетиці, а також забезпечує створення високоефективних теплообмінних апаратів для енергетичних і енергозберігаючих технологій.

Виявлено, досліджено і проаналізовано теплофізичні фактори, що обмежують теплопередавальну здатність пасивних систем теплопередачі ВКТ. Отримано закономірності і залежності для визначення величин максимальних теплових потоків, які відповідають кожному з обмежувальних факторів і є функціями конструктивних параметрів, режимних характеристик процесів, теплофізичних властивостей теплообмінних середовищ і проміжного теплоносія.

В результаті проведеного порівняння теплопередавальної здатності теплообмінників ВКТ і рекуперативних трубчатих теплообмінників отримано та проаналізовано співвідношення теплопередавальних характеристик вказаних типів теплообмінних систем. Аналіз показав перевагу за теплопередавальною здатністю (в  $1,5 \div 3$  рази) теплообмінників ВКТ над рекуперативними трубчатими теплообмінниками. Ступінь цієї переваги залежить від конструктивних характеристик і параметрів пакетів труб, схем течій середовищ, співвідношень характеристик інтенсивності теплообміну, термодинамічних характеристик процесів теплопередачі, теплофізичних властивостей середовищ і проміжного теплоносія.

Вирішено задачу оптимізації параметрів капілярної структури теплопередавального елемента ВКТ з метою мінімізації його термічного опору. Розглянуто основні загальні характеристики трубного пакету теплообмінної системи ВКТ з точки зору можливості їх оптимізації для забезпечення мінімуму термічного опору теплопередачі. Отримано функціональні залежності для визначення оптимального співвідношення довжин зон, при якому теплообмінна система має мінімальний термічний опір. Проаналізовано особливості проведення теплових розрахунків пасивних систем теплового захисту на основі теплопередавальних елементів ВКТ в умовах складного теплообміну в зоні теплопідведення і вільної повітряної конвекції в зоні тепловідведення. Проведено оптимізацію характерного конструктивного параметра розвиненої поверхні тепловідведення з точки зору мінімуму зовнішнього термічного опору тепловіддачі до оточуючого повітря.

Результати проведених експериментальних досліджень теплофізичних характеристик розроблених зразків теплопередавальних елементів ВКТ свідчать про відповідність їх теплопередавальній здатності рівню теплових навантажень для систем тепловідведення і теплового захисту.

Експериментально досліджено теплогідравлічні характеристики 3- та 7-стрижневих моделей тепловидільних збірок (ТВЗ) активної зони реакторів 4-го покоління, яка має охолоджуватись водою надкритичних параметрів (SCWR).

Розроблено методику розрахунку теплогідравлічних характеристик потоку води надкритичних параметрів (НКП) в трубах, кільцевих та технологічних каналах, які імітують твели за формою та гідравлічним діаметром. Досліджені режимні параметри відповідають або номінальним для одного з вірогідних проектів (наприклад, ВВЕР-НКП) або проміжним (аварійним) параметрам.

Доведено можливість і визначено умови погіршення тепловіддачі, здатного зруйнувати ТВЗ або порушити їх герметичність і цим вивести з ладу енергоблок.

Запропоновано фізично обґрунтовану залежність між геометричними та режимними параметрами і максимально припустимим тепловим навантаженням (ПТН) ТВЗ. Отримані експериментальні дані узагальнено системою ітераційних емпіричних рівнянь для розрахунку температурного режиму збірок.

Створено унікальну базу ПТН в широкому діапазоні режимних параметрів для систем з 1, 3 і 7 твелями, яка дозволяє екстраполювати значення ПТН на ТВЗ з більшою кількістю твелів, а також вдосконалювати CFD моделі турбулентності, розвиток яких стримується гострою нестачею експериментальних даних. В результаті були визначені і протестовані теплогідравлічні характеристики потоку надкритичного тиску в 3- і 7-стрижневій ТВЗ на підставі числового моделювання з використанням RNG k-ε моделі турбулентності.

Вкрай незадовільна в багатьох випадках точність існуючих численних методик інженерного розрахунку теплових режимів каналів ТВЗ, що охолоджуються водою НКП, значною мірою обумовлена відсутністю в них прямого зв'язку між гідравлічним опором каналу та інтенсивністю теплопередачі в ньому. Тому запропонована нова методика розрахунку теплових режимів, в якій використовується система двох ітераційних залежностей для коефіцієнтів гідравлічного опору тертя та тепловіддачі, виявилась найточнішою для прогнозування режимів, за якими зараз тестуються відомі емпіричні залежності.

Для перспективних проектів реакторів з підйомним і опускним рухом теплоносія на сьогодні практично немає даних про рівень припустимих теплових навантажень ТВЗ. Тому серйозна увага була приділена експериментальному виявленню співвідношень режимних параметрів теплоносія, при яких виникає погіршення тепловіддачі або термоакустичне коливання тиску при обох напрямках руху води НКП. В результаті вперше доведено існування режимів ПТН не тільки при підйомному, а і при опускному русі води НКП в каналах ТВЗ, але зі значно меншим зростанням температури стінки і при більших теплових потоках. Це дає підставу вважати, що небезпечну зону температур води слід розміщувати в опускній частині циркуляційного контуру активної зони.

### **Практична значимість, обсяг впровадження і досягнутий ефект**

Результати роботи впроваджено в обов'язкових до виконання нормативних документах, реалізовано в конструкціях нових типів теплообмінних поверхонь і апаратів, в оригінальних пристроях, методиках і технічних рішеннях.



У напрямку забезпечення проектування та експлуатаційної надійності теплообмінного обладнання АЕС:

– отримано експериментальні дані щодо причин появи термоакустичних коливань та області їх існування, які дозволяють визначати області безпечної експлуатації реакторної установки;

– розроблено основні положення щодо створення акустичної системи моніторингу протікань фланцевих з'єднань верхнього блока реактора ВВЕР-1000;

– розроблено систему контролю герметичності оболонок твелів, яка дозволяє підвищити ступінь надійності виявлення тріщин за рахунок застосування дрібнодисперсного двофазного потоку.

Результати цих досліджень і розробок використовуються в ДП "НАЕК "Енергоатом" та в документах Державної адміністрації ядерного регулювання України.

У напрямку підвищення надійності турбоустановок розроблено рекомендації щодо усунення вібрації та ерозії в трубопроводах. Результати досліджень використовуються в АТ "Турбоатом" а також в КП "Одеські теплові мережі".

За результатами виконаних досліджень і розробок створені та впроваджені в різних секторах енергетики повітропідігрівачі, економайзери, котли-утилізатори газотурбінних і парогазових установок та інші високоефективні теплообмінні апарати, які забезпечують суттєве підвищення показників енергоефективності основного устаткування. На даний час майже 450 теплообмінних апаратів ефективно функціонують протягом кількох років на об'єктах ряду галузей, забезпечуючи реальну річну економію природного газу на рівні 20 млн. м<sup>3</sup>.

Розроблено інженерні методики розрахунку теплообміну й аеродинамічного опору трубчастих поперечно-оребраних конвективних поверхонь, що стали основою Керівного технічного матеріалу РТМ 108.030.140-87 "Розрахунок і рекомендації по проектуванню поперечно-оребраних конвективних поверхонь нагрівання стаціонарних котлів" і розділів останньої редакції "Нормативного методу теплового розрахунку котлів", які є обов'язковими для використання у проектних і конструкторських організаціях енергетичного профілю і застосовуються в багатьох країнах світу.

На основі результатів проведених теплофізичних досліджень запропоновані нові технічні рішення зі створення пасивних систем ВКТ для аварійного відведення теплоти в ядерних енергетичних установках, охолодження відпрацьованого ядерного палива, протипожежного теплового захисту металоконструкцій будівель теплових і атомних електростанцій. Такі рішення підвищують надійність і безпеку функціонування енергогенеруючих об'єктів, а їх реалізація є менш вартісною внаслідок конструктивного спрощення і можливості відмови від притаманного активним системам дублювання обладнання.

Дослідження теплогідравлічних характеристик моделей ТВЗ активної зони реакторів 4-го покоління виконувалось протягом 2012-2019 років в рамках двох Скоординованих Дослідницьких Програм проекту SCWR МАГАТЕ в тісній співпраці з провідними науковими центрами 11 країн. Для виконання цих досліджень та участі в Міжнародній Експертній Програмі "Посилення ефективності науково-дослідних робіт в світлі аварії на АЕС Фукусіма-1" (2015 р.) були отримані гранти МАГАТЕ. Дані дослідження, методики та унікальна база ПТН в широкому діапазоні режимних параметрів для кільцевих каналів та 3- і 7-стрижневих твелів отримали високу оцінку учасників зазначених Програм, були включені в звітні документи МАГАТЕ про підсумки роботи над першою і другою Програмами і вже використовуються при тестуванні CFD моделей турбулентності з метою отримання надійних теплогідравлічних кодів для прогнозування температурних режимів ТВЗ в умовах проектного і проміжних навантажень SCWRs.

Запропоновано унікальний (по відношенню до відомих закордонних та вітчизняних аналогів) метод визначення умов виникнення та інтенсивності гідродинамічного удару при закритті арматури як наслідок аперіодичної нестійкості. На основі запропонованого методу визначено оптимальні умови швидкості закриття арматури для запобігання гідродинамічного удару.

Запропонована оригінальна методика розрахунку осьових шнекових завихрювачів, яка забезпечує їх використання для широкого кола завдань: створення лінійних деаераторів; зниження динамічних навантажень з боку двофазного потоку на трубопровід; сепарація пароводяних потоків і охолоджувальної води від механі-

чних домішок; сепарація нафтогазового конденсату; інтенсифікація теплообміну і підвищення критичного теплового навантаження в парогенеруючих каналах.

Розроблено систему контролю герметичності оболонок твелів, в якій підвищено ступінь надійності виявлення тріщин за рахунок застосування дрібнодисперсного двофазного потоку.

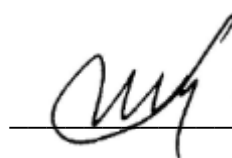
Економічні показники від впровадження окремих результатів роботи надано у додаткових матеріалах до опису роботи. Зокрема, економічний ефект від впровадження тільки частини результатів роботи в атомній енергетиці України складає 773,2 млн. грн.

За тематикою роботи опубліковано 17 монографій (з них 5 видано за кордоном), 9 підручників і навчальних посібників, 520 наукових статей (в тому числі, 76 – в англійських виданнях з імпаکت-фактором), отримано 18 патентів України на винахід (з них 1 є діючим), 3 закордонних патенти, 6 патентів на промисловий зразок, 93 патенти на корисну модель. Загальна кількість посилань на публікації авторів / h-індекс роботи згідно баз даних складають відповідно: Scopus – 183/6, Web of Science – 41/4, Google Scholar – 1000/13. За даною тематикою захищено 9 докторських і 34 кандидатських дисертацій.

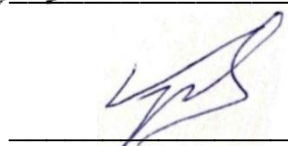
Претенденти:



Є.М. Письменний



П.Я. Павлишин



О.В. Корольов



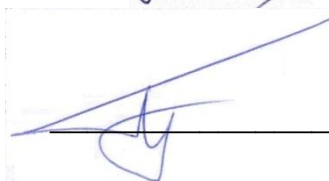
О.Н. Гершуні



І.Л. Козлов



О.П. Ніщик



Г.О. Оборський



В.Г. Розумовський