

ОПИС ЗАВЕРШЕНОЇ РОЗРОБКИ

Дослідження теплогідралічних процесів в елементах систем тепловідведення для перспективних об'єктів атомної енергетики

Study of thermohydraulic processes in the elements of heat removal systems for advanced nuclear engineering facilities

1. Номер державної реєстрації, номер реєстрації в університеті: № 0119U001065, КПІ ім. Ігоря Сікорського – 2207-п.

2. Науковий керівник: ПИСЬМЕННИЙ Євген Миколайович, доктор технічних наук, професор.

Scientific advisor: Pis'mennyi Ye. N., doctor of technical science, professor.

3. Суть розробки, основні результати:

(укр.)

Постановка і проведення даної роботи обумовлені: 1) неприйнятною невизначеністю температурних режимів тепловиділяючих елементів (твєлів) перспективних реакторів в умовах, близьких до погіршеної тепловіддачі (ПТВ); 2) практичною неможливістю досліджувати температурні режими тепловидільних збірок в реальних умовах ядерних реакторів (ЯР); 3) посиленням пріоритетної орієнтації на пасивні методи тепловідведення в атомних енерготехнологіях; 4) необхідністю підвищення ефективності і надійності перспективних пасивних систем тепловідведення випаровувально-конденсаційного типу (ВКТ); 5) необхідністю підвищення точності визначення і прогнозування меж режимів нормального функціонування зазначених систем.

Для концепції ЯР з надкритичними параметрами (НКП) теплоносія дуже важливим є прогнозування погіршеного тепловіддачі, а також впливу цього явища на основні характеристики перспективної активної зони. Виділені дві основні проблеми, які стосуються методів прогнозування характеристик ПТВ: проблема застосування неявних емпіричних залежностей і проблема «ускладнення» постановок при моделюванні за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки (CFD). Основна ідея, яка стосується CFD в контексті виконаної роботи, полягає в тому, щоб, базуючись на відносно простих і економічних RANS моделях турбулентності, оцінити їх можливості з точки зору адаптації до умов нелінійного теплообміну при НКП. Обрано три моделі турбулентності, серед яких дві двопараметричні (RNG та SST) і однопараметрична – EVT, які валідовані (кваліфіковані) на основі комплексних зондових досліджень структури турбулентного потоку двоокису вуглецю з урахуванням підйомної сили. Основною метою даного аналізу була оцінка «чутливості» транспортних рівнянь турбулентних характеристик, а також можливості універсальних пристінкових функцій (УПФ). В результаті досліджень обрані моделі кваліфіковано як з точки зору їх прогнозних властивостей, так і їх можливої адаптації для задач теплообміну з надкритичними параметрами. На основі експериментальних досліджень КПІ ім. Ігоря Сікорського на 3-ох та 7-ми стрижневих збірках з водою НКП розроблені відповідні CFD моделі і проведено оцінку їх прогнозних властивостей в умовах ПТВ. Проаналізовано вплив кількісних та якісних відмінностей між розрахунками та експериментом на напружений стан імітаторів твєл. Запропонована адаптація УПФ в контексті створення спеціальної температурної пристінкової функції (СПФ). Отримано трансцендентну залежність для оцінки температури стінки на основі розподілу основних характеристик потоку в пристінковій області при використанні high-Re моделей турбулентності. Запропонована температурна СПФ дозволяє отримувати прогнозні температурні поля для режимів ПТВ. Запропонована оригінальна процедура вирішення системи нелінійних диференціальних та трансцендентних рівнянь, яка базується на відомому методі передаточних матриць (ТММ). Переваги теплогідралічної реалізації ТММ продемонстровані на основі неявних кореляцій. На основі проведеного CFD дослідження запропонована методика аналізу впливу ПТВ на напружений

стан перспективних збірок. Реалізований інструментарій може застосовуватися при проєктуванні перспективних активних зон.

Стосовно до теплопередавальних пристроїв ВКТ як перспективних елементів пасивних систем тепловідведення і теплового захисту в ядерній енергетиці, виявлено закономірності впливу вихідних структурних параметрів на специфічні структурні характеристики, характеристики гідравлічного опору, капілярний тиск та капілярно-фільтраційні властивості ефективних пористих металоволокнових капілярних структур (МВКС) для теплопередавальних пристроїв ВКТ, та отримано розрахункові залежності для визначення зазначених характеристик і властивостей. В результаті дослідження процесів, обмежуючих теплопередавальну здатність випаровувально-конденсаційних пристроїв за умовами капілярного транспорту при одномірній фільтрації проміжного теплоносія та при взаємодії капілярних і масових сил, виявлено закономірності впливу характеристик МВКС, теплофізичних властивостей теплоносія, геометричних параметрів пристрою, його орієнтації в полі масових сил на граничні теплові потоки, та на цій основі отримано залежності для визначення граничних теплових потоків, а також оптимальних структурних параметрів МВКС з точки зору забезпечення екстремальних (максимальних) величин граничних теплових потоків. Для підвищення точності визначення капілярно-транспортного обмеження теплопередавальної здатності запропоновано двомірну модель фільтрації в капілярній структурі теплопередавального елемента (ТЕ) ВКТ. Для підвищення теплопередавальної здатності ТЕ ВКТ запропоновано і реалізовано капілярно-артеріальну систему в трьох зонах, а також створення капілярно-артеріальної системи в зоні випаровування, відокремлених каналів для пари і конденсату в транспортній зоні та організацію супутнього руху потоків у зоні конденсації. Розроблено технологічні процеси створення ТЕ ВКТ з металевими КС волокнової будови із заданими характеристиками. Розроблено технологічні рішення зі створення ТЕ із зміненням параметрів КС за напрямками капілярної фільтрації. Розроблено схемно-конструктивні рішення щодо надійних та ефективних пасивних випаровувально-конденсаційних систем (ВКС) для тепловідведення при аваріях із втратою теплоносія, які захищені патентами України.

The essence of development, the main results: (англ.)

The formulation and conduct of this work are due to: 1) unacceptable uncertainty of temperature regimes of fuel elements (fuel rods) of promising reactors in conditions close to the deteriorated heat transfer (DHT); 2) the practical impossibility of studying the temperature regimes of fuel assemblies in real conditions of nuclear reactors (NR); 3) strengthening the priority focus on passive methods of heat dissipation in nuclear energy technologies; 4) the need to increase the efficiency and reliability of promising passive heat dissipation systems of the evaporation-condensation type (ECT); 5) the need to improve the accuracy of determining and forecasting the limits of the modes of normal operation of these systems.

For the concept of NR with supercritical parameters (SCP) of the coolant is very important to predict the deterioration of heat transfer (DHT), as well as the impact of this phenomenon on the main characteristics of the promising active zone. There are two main problems related to methods for predicting the characteristics of DHT: the problem of applying implicit empirical dependencies and the problem of "complicating" statements in modeling using computational hydrodynamics (CFD). The main idea, which concerns CFD in the context of the work performed, is to, based on relatively simple and economical RANS models of turbulence, evaluate their capabilities in terms of adaptation to the conditions of nonlinear heat transfer in SCP. Three turbulence models were selected, including two two-parameter (RNG and SST) and one-parameter - EVT, which are validated (qualified) on the basis of complex probe studies of the structure of turbulent carbon dioxide flow taking into account the lifting force. The main purpose of this analysis was to assess the "sensitivity" of the transport equations of turbulent characteristics, as well as the possibility of universal near wall functions (UNWF). As a result of research, the selected models are qualified

both in terms of their predictive properties and their possible adaptation for heat transfer problems with supercritical parameters. Based on experimental studies of KPI name Igor Sikorsky on the 3rd and 7th rod assemblies with SCP water developed the appropriate CFD models and evaluated their predictive properties in the conditions of DHT. The influence of quantitative and qualitative differences between calculations and experiment on the stress state of fuel rod simulators is analyzed. The adaptation of UNWF in the context of creation of special temperature wall function (SNWF) is offered. A transcendental dependence for estimating the wall temperature based on the distribution of the main flow characteristics in the near-wall region using high-Re turbulence models is obtained. The proposed temperature SNWF allows to obtain predicted temperature fields for DHT modes. An original procedure for solving a system of nonlinear differential and transcendental equations based on the known method of transfer matrices (TMM) is proposed. The advantages of thermohydraulic realization of TMM are demonstrated on the basis of implicit correlations. On the basis of the conducted CFD research the technique of the analysis of influence of DHT on a stressful condition of perspective assemblies is offered. Realized tools can be used in the design of promising active zones.

In relation to heat transfer devices ECT as promising elements of passive heat dissipation systems and thermal protection in nuclear energy. Regularities of influence of initial structural parameters on specific structural characteristics, characteristics of hydraulic resistance, capillary pressure and capillary-filtration properties of effective porous metal-fiber capillary structures (MFCS) for heat transfer devices of ECT as perspective elements of passive systems of heat dissipation and thermal protection in nuclear power are revealed. dependences to determine these characteristics and properties. As a result of research of the processes limiting heat transfer capacity of evaporating and condensing devices under conditions of capillary transport at one-dimensional filtration of the intermediate heat carrier and at interaction of capillary and mass forces, regularities of influence of MFCS characteristics, thermophysical properties of heat carrier, geometrical parameters of the device marginal heat fluxes, and on this basis the dependences for determining the marginal heat fluxes, as well as the optimal structural parameters of the MFCKS in terms of providing extreme (maximum) values of marginal heat fluxes. To increase the accuracy of determining the capillary-transport limitation of heat transfer capacity, a two-dimensional model of filtration in the capillary structure of the heat transfer element (HE) of ECT is proposed. To increase the heat transfer capacity of HE ECT, a capillary-arterial system in three zones is proposed and implemented, as well as the creation of a capillary-arterial system in the evaporation zone, separate channels for steam and condensate in the transport zone and the organization of concomitant flow in the condensation zone. Technological processes of HE ECT creation with metal CS of fiber structure with the set characteristics are developed. Technological solutions for the creation of HE with changes in the parameters of the CS by capillary filtration directions were developed. Schematic and constructive solutions for reliable and effective passive evaporation-condensation systems for heat dissipation in accidents with loss of coolant, which are protected by patents of Ukraine.

4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності:

- патенти

1. Пат. 133700 Україна, МПК E04C 3/02. Вогнестійка стальна ферма покриття будівель / О.П.Ніщик, О.Н.Гершуні, Є.М.Письменний (Україна). – № u201808662 ; заявл. 13.08.2018 ; опубл. 25.04.2019, Бюл. № 8. Власник „КПІ ім. Ігоря Сікорського”.

2. Пат. 136468 Україна, МПК F28F 1/10, F28F 1/12, HO1F 27/08. Пасивна система охолодження трансформатора / О.П.Ніщик, О.М.Терех, М.М.Вознюк (пош.), О.І.Руденко (Україна). – № u201900729 ; заявл. 24.01.2019 ; опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16. Власник „КПІ ім. Ігоря Сікорського”.

3. Пат. 138689 Україна, МПК G21C 15/18, G21C 15/257. Система пасивного тепловідведення від парогенератора ядерного реактора / О.П.Ніщик, О.Н.Гершуні,

Є.М.Письменний (Україна). – № u201904955 ; заявл. 10.05.2019 ; опубл. 10.12.2019, Бюл. № 23. Власник „КПІ ім. Ігоря Сікорського”.

4. Пат. 140448 Україна, МПК F28F 3/02. Пластинчасто-ребриста теплообмінна поверхня / О.П.Ніщик, О.М.Терех, О.І.Руденко, М.М.Вознюк (пош.) (Україна). – № u201908595 ; заявл. 18.07.2019 ; опубл. 25.02.2020, Бюл. № 4. Власник „КПІ ім. Ігоря Сікорського”.

5. Пат. 141967 Україна, МПК G21C 9/016, G21C 15/18, G21C 15/257. Пристрій для уловлювання і охолодження розплаву активної зони ядерного реактора / О.П.Ніщик, О.Н.Гершуні, Є.М.Письменний (Україна). – № u201908596 ; заявл. 18.07.2019 ; опубл. 12.05.2020, Бюл. № 9. Власник „КПІ ім. Ігоря Сікорського”.

6. Пат. 145895 Україна, МПК F28F 1/10, F28F 1/12, H01F 27/12. Трансформатор / О.І.Руденко, О.П.Ніщик, О.М.Терех, С.В.Бахмачук, О.В.Кривда (Україна). – № u202005019 ; заявл. 04.08.2020 ; опубл. 06.01.2021, Бюл. № 1. Власник „КПІ ім. Ігоря Сікорського”.

7. Пат. 146206 Україна, МПК G21C 9/016, G21C 15/18, G21C 15/257. Система пасивного захисту ядерного реактора / О.П.Ніщик, О.Н.Гершуні, Є.М.Письменний (Україна). – № u202005579 ; заявл. 28.08.2020 ; опубл. 27.01.2021, Бюл. № 4. Власник „КПІ ім. Ігоря Сікорського”.

8. Пат. 148169 Україна, МПК F28F 1/10, F28F 1/12, F28F 13/02. Теплообмінна ребриста поверхня / О.П.Ніщик, О.М.Терех, О.І.Руденко, М.М.Вознюк, В.А.Кондратюк, С.О.Кириченко (Україна). – № u202100684 ; заявл. 17.02.2021 ; опубл. 14.07.2021, Бюл. № 28. Власник „КПІ ім. Ігоря Сікорського”.

9. Пат. 148303 Україна, МПК F28F 1/02, F28F 1/12. Композиційна теплообмінна труба / Письменний Є.М., Вознюк М.М., Ніщик О.П., Терех О.М. (Україна). – № u202101699 ; заявл. 01.04.2021 ; опубл. 21.07.2021, Бюл. № 29. Власник „КПІ ім. Ігоря Сікорського”.

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Отримані результати відповідають світовому рівню. КПІ ім. Ігоря Сікорського – єдиний учасник від України у Спільному Скоординованому Дослідницькому Проекті МАГАТЕ “Осмилення і прогнозування теплогідрравлічних явищ, що мають місце в водяних реакторах з надкритичними параметрами” (IAEA Coordinated Research Project: “Understanding and Prediction of Thermohydraulic Phenomena Relevant to Supercritical Water Cooled Reactors”) (SCWRs), який в рамках досліджень теплообміну в імітаторах ТВЗ співпрацює з представниками США, Китаю, Японії, Канади та Південної Кореї. Виконані в даній роботі комплексні дослідження теплогідрравлічних характеристик моделей твелів з метою з’ясування механізму виникнення і прогнозування погіршеної тепловіддачі проводяться також в Японії на імітаторі трикутної компоновки, а в США і Китаї – на імітаторах ТВЗ квадратної компоновки. Результати даної роботи є дуже важливими для забезпечення умов надійного охолодження реакторів 4-го покоління, зокрема для забезпечення інженерних розрахунків водо-водяних реакторів НКП.

В роботі виявлено закономірності з управління капілярно-транспортними характеристиками МВКС, створено надійні методики прогнозування теплопередавальної здатності випарувально-конденсаційних систем з МВКС та запропоновано ефективні методи підвищення рівня граничних теплових потоків в цих системах тепловідведення. Обґрунтовано високі ефективність і технологічність пористих металоволокнових матеріалів в якості капілярних структур ВКС, що дозволяє отримати теплофізичні характеристики ВКС, наближені до їх потенційного рівня і, відповідно, розширити можливості практичного застосування цих систем.

6. Економічна привабливість для просування на ринок (вартість реалізації проекту, терміни впровадження та окупності, показники).

Результати роботи є значним внеском у вирішення основної теплофізичної проблеми концепції ядерних реакторів з теплоносієм НКП, а саме надійного прогнозування режимів

ПТВ. Тому отримані результати сприяють пришвидшенню практичної реалізації атомних енергоблоків з НКП, які у порівнянні з традиційними енергоблоками характеризуються значно більшим ККД, значно меншою витратою теплоносія, в кілька разів зменшеним об'ємом контейнменту, меншими експлуатаційними витратами.

При впровадженні результатів роботи стосовно до теплопередавальних пристроїв ВКТ як перспективних елементів пасивних систем тепловідведення і теплового захисту в ядерній енергетиці, економічний ефект буде полягати у зменшенні капітальних та експлуатаційних витрат внаслідок зниження маси і габаритів теплопередавальних систем, конструктивного спрощення, відмови від систем енергозабезпечення і притаманного активним системам дублювання обладнання. Соціальний ефект буде полягати у підвищенні безпеки і надійності експлуатації і недопущенні аварійних ситуацій шляхом забезпечення необхідних теплових режимів атомного енергетичного устаткування.

7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, відомства, підприємства, організації).

Сферою застосування результатів роботи є атомна енергетика.

Створена в даній роботі наукова продукція призначена для подальшого її використання при проведенні дослідно-конструкторських робіт, при розробці необхідної технічної документації на конструкції теплопередавальних пристроїв і систем на їх основі, а також для розробки методик визначення безпечних теплових режимів активної зони ядерних реакторів з теплоносієм надкритичного тиску.

Користувачами результатів роботи можуть бути проектні, конструкторські, виробничі організації і підприємства, що працюють в атомній енергетиці і загалом в паливо-енергетичному комплексі, включаючи ДП “Національна атомна енергогенеруюча компанія “Енергоатом”, Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки (ДНТЦ ЯРБ), АТ “Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут “Енергопроект”, АТ “Харківський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут “Енергопроект”, Державна інспекція ядерного регулювання України (Держатомрегулювання) та ін.

8. Стан готовності розробки.

Отримані результати досліджень, валідація трьох моделей турбулентності, розроблені CFD моделі прогнозування умов погіршення тепловіддачі потоку води НКТ і проведена оцінка їх прогнозних властивостей в умовах ПТВ, отримана залежність для оцінки температури стінки на основі розподілу основних характеристик потоку в пристінковій області при використанні high-Re моделей турбулентності, запропонована температурна спеціальна пристінкова функція, запропонована методика аналізу впливу ПТВ на напружений стан перспективних збірок можуть бути використані при проектуванні перспективних активних зон.

Результати досліджень характеристик металевих капілярних структур волокнової будови, граничної теплопередавальної здатності випаровувально-конденсаційних пристроїв з такими капілярними структурами, розроблені методи підвищення рівня і точності визначення граничної теплопередавальної здатності ВКС з МВКС і розроблені технологічні методи їх створення є основою для впровадження таких систем пасивного тепловідведення в атомній енергетиці.

9. Існуючі результати впровадження.

Результати експериментальних досліджень та розроблені моделі тепломасопереносу розширили базу даних щодо характеристик теплогідравлічних процесів і є суттєвим внеском у забезпечення безаварійних режимів роботи активної зони реакторів з теплоносієм НКТ. Частина досліджень виконувалась в рамках міжнародних програм МАГАТЕ, і їх результати включені у звітні документи МАГАТЕ (звіт ІАЕА-TECDOC-1900, 2020, 546 с.). Впровадження результатів роботи забезпечить зменшення капітальних і експлуатаційних витрат на об'єктах

атомної енергетики та підвищення рівня безпеки і надійності експлуатації атомного енергетичного устаткування.

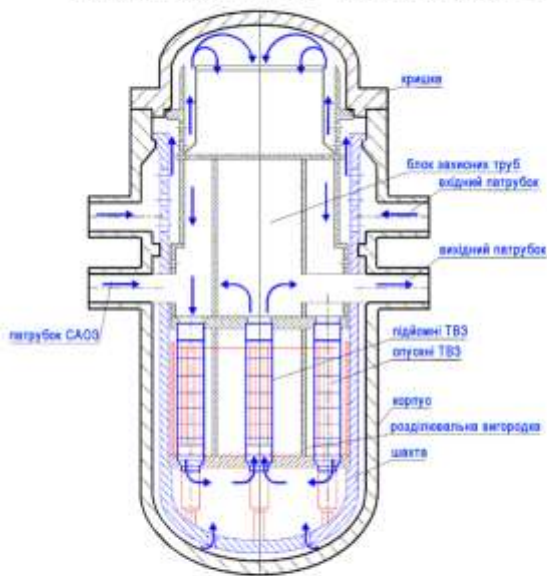
10. Назва підрозділу, телефон, e-mail:

КПІ ім. Ігоря Сікорського, теплоенергетичний факультет (ТЕФ), кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики (АЕС і ІТФ), робочий тел.: (044) 204-95-26, (044) 204-80-92, nirtef@kpi.ua

11. Фото або кілька слайдів презентації з фото розробки в електронному вигляді (рекламного характеру).

Дослідження теплопередачі і гідравлічного опору в каналах, що охолоджуються водою при надкритичних параметрах (НКП)

Одноконтурний реактор ВВЕР- НКП з двоазходною АЗ



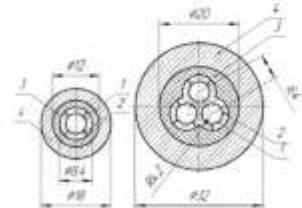
Очікувані переваги концепції ВВЕР-НКП:

- 1) збільшення ККД до 44...45 % замість теперішніх 33...34 %;
- 2) Зменшення у 8...10 разів витрати теплоносія крізь активну зону (АЗ) через відсутність багатократної циркуляції і підігрівання теплоносія в АЗ на (250...300) °С в порівнянні з підігріванням на (30...35) °С в існуючих реакторах;
- 3) прямиоточна схема (відмова від парогенераторів та іншого устаткування другого контуру);
- 4) застосування освоєного серійного устаткування машзалів теплових електростанцій;
- 5) значно (приблизно на порядок) зменшені об'єм захисної оболонки (контейнменту) та будівельні об'єми;
- 6) зменшені експлуатаційні витрати.

Основні особливості теплогідравлічних процесів в таких реакторах обумовлені значною і навіть екстремальною залежністю густини та теплоємності води при надкритичних параметрах ($T_n = 374,1^\circ\text{C}$; $P_n = 22,06$ МПа) від її температури. Крім постійної проблеми забезпечення нормального тепловідведення від реактора і основного обладнання, що знаходиться в контейнменті, та надійного його охолодження в аварійних режимах, існує теплофізична проблема, пов'язана з можливістю погіршення тепловіддачі в АЗ з дуже небезпечними наслідками для цілісності тепловідільних збірок (ТВЗ).

В роботі представлені результати досліджень, основними з яких є:

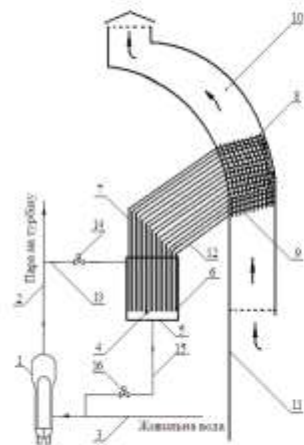
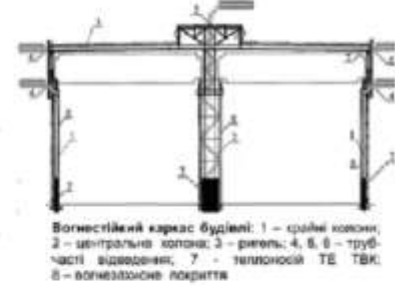
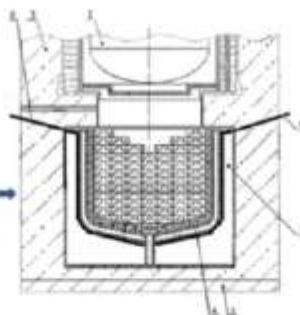
- нові методики як визначення, так і розрахунку теплогідравлічних характеристик потоку води при надкритичних параметрах в трубах, кільцевих каналах та тепловідільних збірках з трикутною решіткою, які використовуються на українських АЕС), що імітують твेलі за формою та гідравлічним діаметром;
- залежність для прогнозування максимально припустимого теплового навантаження твелів, вище якого при певному тепловому стані охолоджувальної води однозначно виникне погіршення тепловіддачі.



Створення і впровадження пасивних систем тепловідведення і теплового захисту випаровувально-конденсаційного типу (ВКТ) для підсилення бар'єрів безпеки в атомній енергетиці

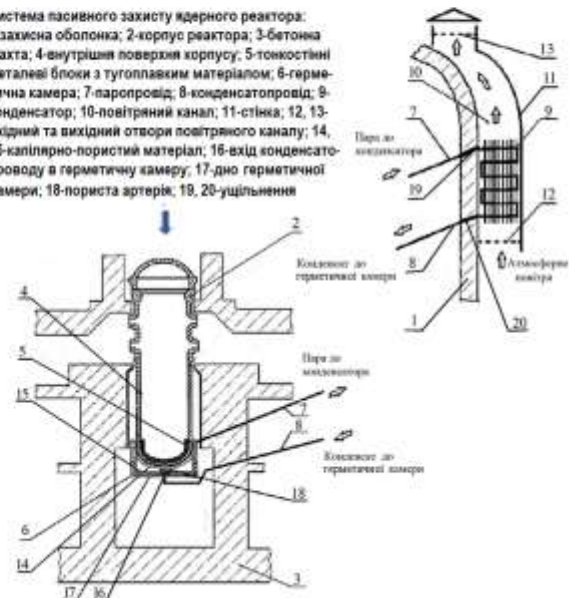
(запропоновано схемно-конструктивні рішення)

Комплекс переваг випаровувально-конденсаційних систем достатньо точно відповідає вимогам і умовам, що висувуються до пасивних систем тепловідведення і теплового захисту в атомній енергетиці. Зокрема, кожний теплопередавальний елемент (ТЕ) ВКТ (окремо або у складі системи) являє собою автономний циркуляційний контур, який може забезпечити високоєфективний пасивний теплоперенос із зони з радіаційним середовищем в зону кінцевого поглинання теплоти і надійне розділення цих зон.



Система пасивного тепловідведення від парогенератора ядерного реактора: 1-парогенератор; 2-паропровід; 3-трубопровід живильної води; 4-теплообмінник відведення теплоти; 5-герметична камера; 6-ділянки тепловідведення ТЕ ВКТ; 7-ТЕ; 8-ділянки тепловідведення ТЕ ВКТ; 9-ребра; 10-повітряний канал; 11-герметична оболонка; 12-ділянки транспорту ТЕ ВКТ; 13-паропровід; 14-вихідна заслінка; 15-конденсаторовід; 16-вихідна заслінка.

Система пасивного захисту ядерного реактора: 1-захисна оболонка; 2-корпус реактора; 3-бетонна шахта; 4-внутрішня поверхня корпусу; 5-тонкостінні металеві блоки з тугоплавким матеріалом; 6-герметична камера; 7-паропровід; 8-конденсаторовід; 9-конденсатор; 10-повітряний канал; 11-стінка; 12, 13-вихідні та вихідні отвори повітряного каналу; 14, 15-капілярно-пористий матеріал; 16-вихід конденсатороводу в герметичну камеру; 17-діо герметичної камери; 18-пориста артерія; 19, 20-ущільнення.



12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання:

- кандидатська дисертація

Вознюк М.М. “Теплообмін плоскоовальних труб з неповним оребрнням в умовах природної конвекції і природньої тяги”, 2021 р.

- навчальний посібник:

Теорія турбулентності [Текст] : навч. посіб. для здобувачів третього (освітньо-наукового) ступеня вищої освіти за спеціальностями 142 Енергетичне машинобудування та 143 Атомна енергетика / укладач: Є.М. Письменний; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,9 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 127 с. (<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45466>)

- опубліковані статті та тези доповідей:

1. Flow structure definition in the bundles of flat-oval tubes with incomplete finning under conditions of natural draft / M.Vozniuk, E.Pis'mennyi, A.Terekh et al. // Eastern-European Journal of enterprise technologies – 2020. – Volume 5. – No 8(107). – P. 74 – 79.

2. Aerodynamic and heat transfer characteristics of an oval-shaped tube at different reynolds numbers / Zhukova Yu.V., Terekh, A.M., Isaev, S.A., Pismenny, E.N. // Heat Transfer Research – 2020. – Volume 51. –No 15. – P. 1383–1397.

3. Deteriorated Heat Transfer Influence On the Stress-Strain State of SMR SCWR Fuel Bundles / Y.Dubyk, V.Filonov, Y.Filonova, O.Kovalenko // Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science. – September 30, 2021. – Paper No: NERS-21-1082.

4. Probability of Rupture for WWER-1000 Main Piping / Y.Dubyk, M.Zarazovskii, S.Ageiev, V.Filonov // 2020 International Conference on Nuclear Engineering collocated with the ASME 2020 Power Conference – August 4–5, 2020. – Paper No: ICONE2020-16897, V002T10A014. – 8 pages.

5. Гершуні О.Н. Оптимізація характеристик теплообмінників випарувально-конденсаційного типу / О.Н.Гершуні, Є.М.Письменний, О.П.Нищик // Теплофізика та теплоенергетика. – 2019, № 2. – С. 41-47.

6. Гершуні О.Н. Підвищення енергетичної ефективності теплообмінників випарувально-конденсаційного типу / О.Н.Гершуні, Є.М.Письменний, О.П.Нищик // Теплофізика та теплоенергетика – 2020. – Т. 42.– № 1. – С. 35-41.

7. Теплообмін поодинокі плоскоовальної труби з неповним оребренням в умовах вільної конвекції / М.М.Вознюк, В.А.Кондратюк, Є.М.Письменний, О.М.Терех // Теплофізика та теплоенергетика – 2020. – Т. 42.– № 3. – С 29 – 38.

8. Аналіз економічної ефективності використання плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах природної тяги / М.М.Вознюк, Є.М.Письменний, О.М.Терех та ін. В.Ю.Ліщишин, Д.В.Конько // Енергетика: економіка, технології, екологія – 2020. – № 1. – С. 60-67.

9. Гершуни А.Н. Обеспечение совместимости сочетания нержавеющей сталь-вода систем теплопередачи испарительно-конденсационного типа для охлаждения электронной аппаратуры / А.Н.Гершуни, А.И.Руденко, А.П.Нищик - В кн.: Труды восемнадцатой Международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии” СИЭТ-2019.- Одесса.-2019.-С. 96-97.

10. Гершуни А.Н. Распределение пор по размерам металлических пористых тонковолокнистых материалов для систем охлаждения электронной аппаратуры / А.Н.Гершуни, А.П.Нищик - В кн.: Труды двадцать первой Международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии” СИЭТ-2020.- Одесса.-2020.-С. 75 - 76.

11. Гершуни А.Н. Ресурсные характеристики тепловых труб для систем охлаждения электронной аппаратуры / А.Н.Гершуни, А.П.Нищик - В кн.: Труды двадцать второй Международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии” СИЭТ-2021.- Одесса.- 2021.-С. 50-51.

- доповіді на конференціях:

1. Гершуни А.Н. Обеспечение совместимости сочетания нержавеющей сталь-вода систем теплопередачи испарительно-конденсационного типа для охлаждения электронной аппаратуры / А.Н.Гершуни, А.И.Руденко, А.П.Нищик - В кн.: Труды восемнадцатой Международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии” СИЭТ-2019, Май 27-31.-2019.- Одесса.-Украина.

2. Гершуни А.Н. Распределение пор по размерам металлических пористых тонковолокнистых материалов для систем охлаждения электронной аппаратуры / А.Н.Гершуни, А.П.Нищик - В кн.: Труды двадцать первой Международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии” СИЭТ-2020, Май 25-29.- 2020.-Одесса.-Украина.

3. Pismenny Evgen. New heat recovery technologies / Evgen Pismenny. XXX Int.Conf. “Problems of Ecology and Operation of Energy Objects”.-Kyiv.-2020.

4. Dubyk Y. Probability of Rupture for WWER-1000 Main Piping / Y.Dubyk, M.Zarazovskii, S.Ageiev, V.Filonov // 2020 International Conference on Nuclear Engineering collocated with the ASME 2020 Power Conference – August 4–5, 2020. Scopus.

5. Гершуни А.Н. Ресурсные характеристики тепловых труб для систем охлаждения электронной аппаратуры / А.Н.Гершуни, А.П.Нищик - В кн.: Труды двадцать второй Международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии” СИЭТ-2021, Май 24-28.- 2021.-Одесса.-Украина.

- **участь у заходах Міжнародної агенції з атомної енергії (МАГАТЕ):**

Доповідь авторів Письменного Є.М., Розумовського В.Г., Філонова В.В. на Міжнародній віртуальній Консультативній зустрічі учасників нової Скоординованої дослідницької програми МАГАТЕ «Розширення наукової бази теплогідравлічного проекту прототипів SCWR», назва доповіді «Перспективи прогнозування режимів погіршеного теплообміну в перспективних реакторах IV покоління з надкритичними параметрами теплоносія», 5-6 листопада 2020 р.

13. Ключові слова до розробки: атомна енергетика, перспективні об'єкти, елементи систем тепловідведення, теплогідравлічні процеси