

**Дослідження теплопередачі в моделях тепловидільних пучків і систем пасивного тепловідведення для підсилення бар'єрів безпеки в атомній енергетиці**

**Исследование теплопередачи в моделях тепловыделяющих пучков и систем пассивного теплоотвода для усиления барьеров безопасности в атомной энергетике**

**Investigation of heat transfer in the simulators of fuel bundles and passive heat-removal systems for strengthening of safety barriers in nuclear power engineering**

**1. Номер державної реєстрації теми: 0216U004806**

**2. Науковий керівник:** Письменний Є.М., д.т.н., професор, Письменный Е.Н.,  
Pis'mennyi Ye.N

**3. Суть розробки, основні результати:**

**(укр.)**

Постановка і проведення даної роботи обумовлені: 1) нагальною необхідністю підтримання і підсилення бар'єрів безпеки в атомній енергетиці пасивними методами тепловідведення; 2) перспективністю створення пасивних систем випарувально-конденсаційного типу (ВКТ) для тепловідведення і теплового захисту; 3) значною обмеженістю зазначених досліджень та розробок і відсутністю їх практичного застосування в ядерних енерготехнологіях; 4) вкрай недостатньою базою експериментальних даних щодо температурних режимів в активній зоні реакторів нового покоління з надкритичними параметрами теплоносія (НКТ) і, як наслідок, відсутністю надійних емпіричних залежностей для розрахунку припустимих, тобто безпечних теплових навантажень активної зони, що дозволило би максимально підвищити коефіцієнт корисної дії енергоблоків і, таким чином, зменшити питомі капіталовкладення для спорудження АЕС.

Розроблено нову методику розрахунку теплопередачі в тепловидільних елементах (твелах) на основі їх експериментальних теплогідрравлічних характеристик. CFD-моделювання (аналітичні та диференціальні процедури тривимірної обчислювальної гідродинаміки) теплогідрравлічних процесів здійснювалось з використанням методу DNS (безпосереднє числове моделювання) як результат тестування обчислювальних кодів FLUENT, DNS, TEMPA-SC, модифікації k-ε-моделі, який дав можливість отримати інформацію про внутрішні причини особливостей теплообміну при НКТ. Результати CFD моделювання підтвердили адекватність фізичної концепції виникнення погіршеної тепловіддачі (ПТВ) при певних параметрах води НКТ в обігрівальних каналах внаслідок термічного прискорення потоку, яке призводить до його ламінаризації і зростання термічного опору в пристінному шарі. Експериментальне дослідження режимів ПТВ в трубах, кільцевих каналах та імітаторі 3-стрижневої тепловидільної збірки (ТВЗ) показало, що, всупереч поширеному висновку про неможливість таких режимів при опускному русі теплоносія (і води при надкритичному тиску, зокрема), вони при певних умовах, мають місце і в цьому випадку, але при більшому тепловому навантаженні каналу. Інший важливий висновок полягає в тому, що ПТВ небезпечна, перш за все, не стільки високим абсолютним рівнем температури стінки, скільки її великою залежністю від навіть незначної зміни режимних параметрів. Для ітераційного розрахунку температурного режиму в трубах, кільцевих каналах та в імітаторі 3-стрижневої ТВЗ при підйомному та опускному русі води НКТ розроблено систему з двох кореляційних рівнянь. Розроблено залежність для розрахунку густини теплового потоку  $q_w$ , вище якого настає погіршення тепловіддачі в трубах, в кільцевих каналах і в імітаторі 3-стрижневої ТВЗ.

На основі досліджень закономірностей впливу теплофізичних факторів на теплопередавальну спроможність отримано залежності для визначення основних теплотехнічних характеристик систем пасивного тепловідведення ВКТ. Сформульовані основні положення і принципи теплових розрахунків відповідно до характерних теплових схем таких систем. Отримано залежності для визначення оптимального співвідношення довжин зон, при якому теплообмінна система має мінімальний термічний опір теплопередачі. На основі виконаних досліджень теплотехнічних характеристик модельних зразків довгомірних теплопроводів випарувально-конденсаційного типу встановлено їх високу теплопередавальну

здатність, сталу і надійну роботу, а також відповідність їх теплопередавальній здатності рівню теплових навантажень для систем тепловідведення та теплового захисту, які можуть бути створені на базі подібних теплопередавальних елементів.

Вогневі дослідження теплотехнічних характеристик модельних зразків теплопередавальних елементів (ТЕ) ВКТ в умовах температурного режиму пожежі показали, що межа вогнестійкості теплопередавальних елементів ВКТ з вогнезахисним покриттям товщиною приблизно 5 мм, металокопункцій з таким же покриттям і споряджених ТЕ ВКТ перевищила 1 годину, тоді як для металевих копункцій з таким же покриттям тієї ж товщини, але без спорядження їх ТЕ, межа вогнестійкості складала близько 15 хвилин.

Розроблено специфічні технологічні рішення щодо забезпечення ефективності та надійності функціонування пасивних систем теплопередачі ВКТ. Розроблено оригінальні схемно-копунктивні рішення пасивних систем теплопередачі ВКТ для підтримання цілісності бар'єрів безпеки ядерних реакторів, для безпечного зберігання відпрацьованого ядерного палива в сховищах, а також для теплового захисту будівельних металокопункцій енергооб'єктів в екстремальних умовах, які захищені патентами України.

**(рос.)**

Постановка и проведение данной работы обусловлены: 1) насущной необходимостью поддержания и усиления барьеров безопасности в атомной энергетике пассивными методами теплоотвода; 2) перспективностью создания пассивных систем испарительно-конденсационного типа (ИКТ) для теплоотвода и тепловой защиты; 3) значительной ограниченностью указанных исследований и разработок и отсутствием их практического применения в ядерных энерготехнологиях; 4) крайне недостаточной базой экспериментальных данных по температурным режимам в активной зоне реакторов нового поколения со сверхкритическими параметрами теплоносителя (СКД) и, как следствие, отсутствием надежных эмпирических зависимостей для расчета допустимых, то есть безопасных тепловых нагрузок активной зоны, что позволило бы максимально повысить коэффициент полезного действия энергоблоков и, таким образом, уменьшить удельные капиталовложения для строительства АЭС.

Разработана новая методика расчета теплопередачи в тепловыделяющих элементах (ТВЭлах) на основе их экспериментальных теплогидравлических характеристик. CFD-моделирование (аналитические и дифференциальные процедуры трехмерной вычислительной гидродинамики) теплогидравлических процессов осуществлялось с использованием метода DNS (непосредственное численное моделирование) как результат тестирования вычислительных кодов FLUENT, DNS, TEMPA-SC, модификации k-ε-модели, который дал возможность получить информацию о внутренних причинах особенностей теплообмена при СКД. Результаты CFD моделирования подтвердили адекватность физической концепции возникновения ухудшенной теплоотдачи (УТО) при определенных параметрах воды СКД в обогревательных каналах вследствие термического ускорения потока, которое приводит к его ламинаризации и росту термического сопротивления в пристеночном слое. Экспериментальное исследование режимов УТО в трубах, кольцевых каналах и имитаторе 3-стержневой тепловыделяющей сборки (ТВС) показало, что, вопреки распространенному выводу о невозможности таких режимов при опускном движении теплоносителя (и воды при сверхкритическом давлении, в частности), они при определенных условиях, имеют место и в этом случае, но при большей тепловой нагрузке канала. Другой важный вывод заключается в том, что УТО опасна, прежде всего, не столько высоким абсолютным уровнем температуры стенки, сколько ее большей зависимостью от даже незначительного изменения режимных параметров. Для итерационного расчета температурного режима в трубах, кольцевых каналах и в имитаторе 3-стержневой ТВС при подъемном и опускном движении воды СКД разработана система из двух корреляционных уравнений. Разработана зависимость для расчета плотности теплового потока  $q_w$ , выше которой наступает ухудшение теплоотдачи в трубах, в кольцевых каналах и в имитаторе 3-стержневой ТВС.

На основе исследований закономерностей влияния теплофизических факторов на теплопередающую способность получены зависимости для определения основных теплотехнических характеристик систем пассивного теплоотвода ВКТ. Сформулированы основные положения и принципы тепловых расчетов в соответствии с характерными

тепловыми схемами таких систем. Получены зависимости для определения оптимального соотношения длин зон, при котором теплообменная система имеет минимальное термическое сопротивление теплопередачи. На основе выполненных исследований теплотехнических характеристик модельных образцов длинномерных теплопроводов испарительно-конденсационного типа установлены их высокая теплопередающая способность, устойчивая и надежная работа, а также соответствие их теплопередающей способности уровню тепловых нагрузок для систем теплоотвода и тепловой защиты, которые могут быть созданы на базе подобных теплопередающих элементов. Огневые исследования теплотехнических характеристик модельных образцов теплопередающих элементов (ТЭ) ИКТ в условиях температурного режима пожара показали, что предел огнестойкости теплопередающих элементов ИКТ с огнезащитным покрытием толщиной примерно 5 мм, металлоконструкций с таким же покрытием и оснащенных ТЭ ИКТ превысила 1 час, тогда как для металлических конструкций с таким же покрытием той же толщины, но без ТЭ, предел огнестойкости составил около 15 минут.

Разработаны специфические технологические решения по обеспечению эффективности и надежности функционирования пассивных систем теплопередачи ИКТ. Разработаны оригинальные схемно-конструктивные решения пассивных систем теплопередачи ИКТ для поддержания целостности барьеров безопасности ядерных реакторов, для безопасного хранения отработанного ядерного топлива в хранилищах, а также для тепловой защиты строительных металлоконструкций энергообъектов в экстремальных условиях, которые защищены патентами Украины.

**(англ.)**

Statement and performance of the research under consideration are substantiated by: (1) vital necessity of support and strengthening of safety barriers in nuclear power engineering by passive methods heat removal; (2) availability of vaporization-and-condensation type (VCT) systems creation for heat removal and thermal shielding; (3) significant limitation of the noted R&D and absence of its implementation in nuclear power technologies; (4) extremely insufficient experimental data base as to core temperature mode in the SCW reactors of a new generation resulting in absence of reliable empirical correlations for prediction of allowable, i.e., core safe thermal loads to provide higher thermal efficiency of power units and thus to decrease specific capital investments into NPP construction.

New approach to estimation heat transfer in fuel rods by using their experimental thermohydraulic characteristics was developed. CFD modeling (analytical and differential procedures of 3-D computational hydrodynamics) of thermohydraulic phenomena consisted in testing of FLUENT, DNS, and TEMPA-SC computational codes,  $k-\varepsilon$  model modification that gave the possibility to obtain the information on internal reasons of heat transfer under supercritical pressure of water SCW). The results of CFD confirmed adequacy of the physical concept of deteriorated heat transfer (DHT) under certain SCW parameters in heated channels due to thermal acceleration of flow causing its laminarization and thermal resistance increasing in near-wall layer. Experimental investigation of DHT modes in tubes, annuli, and simulator of 3-rod fuel assembly revealed that despite widespread conclusion on impossibility of such modes under downward flow of coolant (and, in particular, of SCW) under certain conditions they take place in such cases but under higher thermal load of a channel. Another important conclusion consists in that DHT is dangerous, first of all, not by so high absolute level of wall temperature, as its strong dependence upon even insignificant change in operating conditions. For iterative prediction of the temperature mode in tubes, annuli, and simulator of 3-rod fuel assembly under up- and downward flow of SCW the system of two correlations was derived. The relationship determining heat flux  $q_b$ , exceeding of which leads to DHT in the said channels, was obtained.

Basing on the investigated regularities of thermophysical factors' impact on a heat transferring ability of a medium the correlations determining the main heat engineering properties of the VCT systems of passive heat removal were deduced. The general rules and principles of thermal calculations related to relevant thermal designs of such systems are defined. The relationships for prediction of an optimal ratio of zones' length corresponding to the minimal thermal resistance of heat exchanging system to heat transfer are obtained. The performed investigations of heat engineering

properties of the model samples of elongated VCT heat conductors enabled to find their high heat transferring ability, steady and reliable operation, as well as compliance of their ability with thermal load for the systems of heat removal and thermal shielding that could be created on the basis of similar heat transferring elements (HTE) of fire thermal mode revealed that fire durability limit of metal structures with approximately 5-mm fire-protection coating and shielded with VCT THE exceeded 1 hr, while without VCT THE it was about 15 min.

Specific technological solutions providing efficiency and reliability of VCT passive heat-transferring system operation are developed. Original schemes and designs of VCT passive heat-transferring systems to maintain integrity of the barriers of nuclear reactor safety, to provide storage of depleted fuel, and to provide thermal shielding of building metal structures of power-supplying facilities under extreme conditions developed and protected by the patents of Ukraine.

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

##### **- патенти**

1. Патент на корисну модель № 108649, Україна. Деаератор / Письменний Є.М., Руденко О.І., Ніщик О.П., Терех О.М., Вознюк М.М. // - Опубл. 25.07.2016.- Бюл. № 14.

2. Патент на корисну модель № 110702, Україна. Спосіб енергозбереження при експлуатації апарату повітряного охолодження / Письменний Є.М., Терех О.М., Руденко О.І., Ніщик О.П., Вознюк М.М. // - Опубл. 25.10.2016.- Бюл. № 20.

3. Патент на корисну модель № 112627, Україна. Пасивна система охолодження пристрою локалізації розплаву активної зони ядерного реактора водо-водяного типу / Ніщик О.П., Гершуні О.Н., Письменний Є.М. – Опубл. 26.12.2016.-Бюл. № 24.

4. Патент на корисну модель № 113974, Україна. Пасивна система утримання розплаву активної зони в корпусі ядерного реактора водо-водяного типу / Ніщик О.П., Гершуні О.Н., Письменний Є.М. - Опубл. 27.02.2017.- Бюл. № 4.

5. Патент на корисну модель № 116108, Україна. Конденсатор / Руденко О.І., Трокоз Я.Є., Туз В.О., Ніщик О.П., Терех О.М. - Опубл. 10.05.2017.- Бюл. № 9/2017.

6. Патент на корисну модель № 117554, Україна. Теплообмінна біметалева труба / Ніщик О.П., Терех О.М., Руденко О.І., Вознюк М.М., Письменний Є.М., Рогачов В.А. - Опубл. 26.06.2017.- Бюл. № 12.

7. Патент на корисну модель № 119859, Україна. Система утримання розплавленої активної зони в корпусі ядерного реактора середньої потужності водо-водяного типу / Ніщик О.П., Гершуні О.Н., Письменний Є.М. - Опубл.10.10.2017.- Бюл. № 19.

8. Патент на корисну модель № 120616, Україна. Пристрій для нагрівання і термообробки в'язкого матеріалу / Ніщик О.П., Терех О.М., Руденко О.І., Вознюк М.М., Письменний Є.М., Рогачов В.А. - Опубл. 10.11.2017.- Бюл. № 21.

9. Патент на корисну модель № 120682., Україна. Теплообмінна труба / Письменний Є.М., Ніщик О.П., Терех О.М., Руденко О.І., Баранюк О.В. - Опубл. 10.11.2017.-Бюл. № 21.

10. Патент на корисну модель № 120683, Україна. Система пасивного відведення залишкових тепловиділень / Ніщик О.П., Гершуні О.Н., Письменний Є.М. - Опубл. 10.11.2017.- Бюл. № 21.

11. Патент на корисну модель № 123699, Україна. Пасивна система тепловідведення від другого контуру ядерної установки / Ніщик О.П., Гершуні О.Н., Письменний Є.М. - Опубл. 12.03.2018.- Бюл. № 5.

12. Патент на корисну модель № 125288, Україна. Теплообмінна труба / Рогачов В.А., Ніщик О.П., Вознюк М.М., Терех О.М., Руденко О.І. - Опубл.10.05.2018.- Бюл. № 9.

13. Патент на корисну модель № 126085, Україна. Система тепловідведення від пристрою для уловлювання розплавлених матеріалів з ядерного реактора / Ніщик О.П., Гершуні О.Н., Письменний Є.М. - Опубл. 11.06.2018.-Бюл. № 11.

14. Патент на корисну модель № 126549, Україна. Басейн витримки відпрацьованого ядерного палива/Ніщик О.П., Гершуні О.Н., Письменний Є.М. - Опубл. 25.06.2018.- Бюл. № 12.

15. Патент на корисну модель № 128747, Україна. Теплообмінна труба / Письменний Є.М., Багрій П.І., Вознюк М.М., Семеняко О.В., Ніщик О.П. - Опубл. 10.10.2018.- Бюл. № 19.

16. Патент на корисну модель № 129678, Україна. Парова камера / Письменний Є.М., Кравець В.Ю., Алексеїк Є.С., Ніщик О.П. - Опубл. 12.11.2018.- Бюл. № 21.

17. Патент на корисну модель № 129839, Україна. Теплообмінна труба / Терех О.М., Ніщик О.П., Вознюк М.М., Руденко О.І., Рогачов В.А. - Опубл. 12.11.2018.- Бюл. № 21.

- **заявки** на патент

1. Заявка на винахід № а201802719, Україна. Теплообмінна труба / Письменний Є.М., Багрій П.І., Вознюк М.М., Семеняко О.В., Ніщик О.П. –від 19.03.2018 р.

2. Заявка на корисну модель № u201805137, Україна. Трубчасто-ребриста поверхня / Ніщик О.П., Терех О.М., Руденко О.І., Рогачов В.А., Кравець В.Ю. –від 10.05.2018 р.

3. Заявка на корисну модель № u201808662, Україна. Вогнестійка стальна ферма покриття будівель / Ніщик О.П., Гершуні О.Н., Письменний Є.М. – від 13.08.2018 р.

## **5. Порівняння зі світовими аналогами.**

Отримані результати відповідають світовому рівню. Відповідно виконаному аналізу, дослідження теплообміну в імітаторах тепловиділяючих збірок проводяться в США, Китаї, Японії, РФ, Канаді та Південній Кореї, а КПІ ім. Ігоря Сікорського є єдиним представником Спільного Проекту МАГАТЕ від України. Спеціальні верифікаційні тести створюються на основі експериментальних даних для удосконалення підходів до моделювання турбулентності, які використовують наукові групи для подальших досліджень, про що свідчать публікації останніх років, наприклад: Pucciarelli A. Computational fluid dynamics prediction of heat transfer in rod bundles with water at supercritical pressure / A. Pucciarelli, W. Ambrosini // J. of Nuclear Eng. and Radiation Sci.-2016.-V.2.-No.1 або Jackson J.D. Models of heat transfer to fluids at supercritical pressure with influences of buoyancy and acceleration / J.D. Jackson // Applied Thermal Eng.-2017.-V. 124.-P. 1481-1491. Найсучасніші дослідження теплогідравлічних характеристик твєлів АЗ реакторів НКТ проводяться або експериментально на 3-, 4- та 7-стрижневих імітаторах ТВП здебільшого на сурогатному теплоносії (діоксиді вуглецю) або аналітично за допомогою числової гідродинаміки. Режимні параметри (тиск, теплове навантаження, вхідна температура та масова швидкість теплоносія) повинні відповідати або номінальним одного з вірогідних проектів або проміжним (аварійним). Для проектів реакторів з двозаходним потоком теплоносія актуальною є задача виявлення співвідношень режимних параметрів при підйомному і опускному русі теплоносія, при яких виникає погіршення тепловіддачі або виникають термоакустичні коливання тиску, які можуть спричинити руйнування каналу. На даний час практично відсутня достовірна інформація про рівень допустимих теплових навантажень тепловидільних пучків, при перевищенні яких виникає погіршення тепловіддачі. Отримання таких даних, на що зокрема була спрямована дана робота, являє собою найактуальнішу проблему для подальшого розвитку інженерних розрахунків водо-водяних реакторів НКТ.

Вперше отримано статистично представницьку базу даних для узагальнення результатів експериментів на імітаторах ТВЗ реакторів 4-го покоління, виконаних в рамках наукового проекту МАГАТЕ “Аналіз і прогнозування теплогідравлічних явищ, характерних для реакторів, охолоджувальних водою з надкритичними параметрами”; запропоновано фізично обґрунтовану емпіричну залежність для розрахунку припустимого теплового потоку замість умовних обмежень його величини, які в деяких випадках в 1,5...2 рази зменшують реально можливе навантаження твєлів; експериментально визначено причину погіршення тепловіддачі воді НКТ в каналах як при підйомному, так і при опускному русі в умовах її сильного розігріву; і запропоновано систему рівнянь для ітераційного розрахунку температури в трубах, кільцевих каналах і ТВЗ.

При виконанні даної наукової роботи отримано нові наукові знання щодо пасивних систем тепловідведення, які в порівнянні з існуючими багатоканальними складними за побудовою та обслуговуванням активними системами охолодження мають важливі переваги. Ці системи здатні надійно працювати в умовах відсутності живлення та обслуговування, що дає можливість зменшити кратність резервування або зовсім відмовитися від нього, а також дає можливість покращити масогабаритні показники систем тепловідведення і зменшити витрати на їх виготовлення та експлуатацію. Особливою відмінною ознакою цих систем є їх здатність виключити можливість потрапляння радіоактивних матеріалів в довкілля.

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

Практична цінність результатів роботи обумовлена розробленими удосконаленими моделями турбулентного переносу тепла і маси для використання їх в розрахунках безпечних теплових режимів активної зони реакторів з надкритичним тиском води на різних рівнях потужності блоків, зокрема, методика спільного рішення емпіричних залежностей для коефіцієнтів тепловіддачі та гідравлічного опору тертя обігрівного каналу, а також використання залежності для визначення теплового навантаження, припустимого в межах нормальної тепловіддачі, сприятимуть підвищенню безпеки роботи реактора з максимальним коефіцієнтом корисної дії.

При впровадженні результатів роботи буде забезпечено зменшення капітальних та експлуатаційних витрат на об'єктах атомної енергетики за рахунок зниження масогабаритних показників і матеріалоемності пасивних систем теплопередачі, відмови від резервування, живлення, спрощення обслуговування. Застосування систем пасивного тепловідведення, що забезпечені розробленими науково обґрунтованими методиками раціонального проектування та розробленими науково-технологічними та схемно-конструктивними рішеннями для ефективного і надійного їх функціонування, захищених патентами України, створить умови для недопущення аварійних ситуацій або оперативного припинення їх розвитку на об'єктах атомної енергетики.

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

Сферою застосування результатів роботи є атомна, тепла, альтернативна енергетика.

Створена в даній роботі наукова продукція є необхідною основою для подальшого проведення дослідно-конструкторських робіт, проведення розрахунків як конструкції активної зони реакторів, так і безпечних її теплових режимів на різних рівнях потужності блоків, що працюють на надкритичних параметрах теплоносія, розробки технічної документації на конструкції теплопередавальних пристроїв і пасивних систем теплопередачі та організації їх виробництва.

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

## **8. Стан готовності розробки.**

Отримані дані експериментальних досліджень та розроблені вдосконалені моделі турбулентного переносу тепла і маси для розрахунку як конструкції активної зони реакторів, так і безпечних теплових режимів активної зони на різних рівнях потужності блоків, що працюють на надкритичних параметрах теплоносія. Отримані дані експериментальних досліджень теплотранспортних характеристик зразків теплопередавальних елементів випаровувально-конденсаційного типу та розроблені на їх основі методики раціонального проектування для створення і впровадження систем пасивного тепловідведення для підсилення бар'єрів безпеки в атомній енергетиці.

## **9. Існуючі результати впровадження.**

Результати держбюджетної роботи № 2902-ф впроваджено в навчальний процес на теплоенергетичному факультеті: в лекційному курсі “Енерго- і ресурсозбереження в енергетиці”, зокрема в новому розділі до цього курсу “Сучасний стан і шляхи удосконалення енергетичних технологій”, для вдосконалення лекційного курсу “Методи дослідження процесів генерації пари” для студентів спеціальностей 142 Енергетичне машинобудування та 144 Теплоенергетика. Введена нова тема на практичних заняттях по навчальній дисципліні “Енерго-

і ресурсозбереження в енергетиці”, а саме: “Пасивні методи тепловідведення і теплового захисту в атомних енерготехнологіях”.

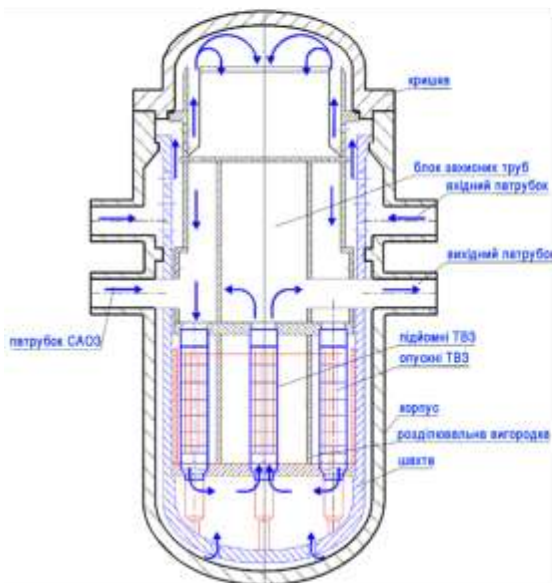
## 10. Назва підрозділу, телефон, e-mail:

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

## 11. Фото розробки.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ І ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ В КАНАЛАХ, ЩО ОХОЛОДЖУЮТЬСЯ ВОДОЮ ПРИ НАДКРИТИЧНИХ ПАРАМЕТРАХ (НКП)

Одноконтурний реактор ВВЕР- НКП з двофазною АЗ



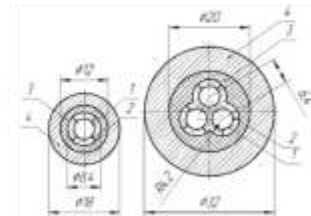
Очікувані переваги концепції ВВЕР-НКП:

- 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) прямоточна 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 (контанайменту) та будівельні об'єми;
- 6) зменшені експлуатаційні витрати.

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

В роботі представлені результати експериментальних досліджень, основними з яких є:

- нові методи як визначення, так і розрахунку теплогідролічних характеристик потоку води при надкритичних параметрах в трубах, кільцевих каналах та тепловидільних збірках з трикутною решіткою, які використовуються на українських АЕС), що імітують твєли за формою та гідролічним діаметром;
- емпірична залежність для прогнозування максимально припустимого теплового навантаження твєлів, вище якого при певному теплому стані охолоджувальної води однозначно виникне погіршення тепловіддачі.



## 12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання:

### - монографії:

1. E.N. Pis'mennyi, G. P. Polupan, I. Carvajal- Mariscal, F. Sanches-Silva, I.Piolo. HANDBOOK FOR TRANSVERSELY FINNED TUBE HEAT EXCHANGER DESIGN.- Amsterdam: Elsevier, 2016.- 188 p.

2. Когенерационные системы с тепловыми двигателями. Инновационные технологии для когенерации (глава 3 “Электрические и когенерационные станции на основе газовых двигателей как новый сектор энергетики”) / Е.Н.Письменный, П.И.Багрий. -К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2016.-528 с. (гл. 3-74 с.)

### - навчальні посібники:

1. Methods engineering calculations transversely fined convective heating surfaces. Handbook for workshops students specialties „Energy Engineering” „Nuclear Power Engineering” and „Heat Power Engineering” / Comp.: Eugene Pis'mennyi. – K.: NTU “KPI”, 2016. – 223 с.

2. Навчальний посібник до практичних занять з грифом „КПІ ім. Ігоря Сікорського” . Письменный Є.М., Рогачев В.А., Баранюк О.В., Вознюк М.М. Теплообмінні апарати систем повітряного охолодження ТЕС та АЕС. – К.: „КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2016. – 87 с.

3. Турбулентність та методи її вимірювання [Електронний ресурс] : методичні вказівки до виконання самостійної роботи студентів для студентів напряму підготовки 6.050601



“Теплоэнергетика”, специальностей 8.05060102, 7.05060102 “Теплофизика” / НТУУ “КПІ” ; уклад. >С.М.Письменний<, О.В.Баранюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 270 Кбайт). – Київ : НТУУ “КПІ”, 2016. – 21 с.

- **опубліковані статті та тези доповідей:**

1. Pis'mennyi E. N. Study and application of heat-transfer surfaces assembled from partially finned flat-oval tubes / E. N.Pis'mennyi // Applied Thermal Engineering.-2016.-V. 106.- 5 August.-P. 1075-1087.
2. Razumovskiy V.G. Experimental heat transfer in an annular channel and 3-rod bundle cooled with upward flow of supercritical water / V.G.Razumovskiy, Eu.N.Pis'mennyi, Kh.Sidawi, I.L.Piolo, A.Eu.Koloskov // Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science.-2016.-V. 2.-№ 1.-P. 011010-1 – 011010-8.
3. Andraka Charles E. High performance felt-metal-wick heat pipe for solar receivers / Charles E. Andraka, Volodymyr Baturkin, Vladlen Zaripov, Oleksandr Nishchuk, Sergii Khairnasov // Joint 18<sup>th</sup> International Heat Pipe Conference and 12<sup>th</sup> International Heat Pipe Symposium, June 12-16, 2016, AIP Conference Proceedings, V. 1734, No. 1, 8 pages.
4. Вознюк М. М. Теплообмін пакетів плоскоовальних оребрених труб в умовах вільної конвекції і природної тяги / М. М. Вознюк, В. А. Рогачов, О. М. Терех, О. В. Баранюк // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. № 2. – С. 46-53.
5. Руденко О. І. Інноваційне енергозберігаюче устаткування для підприємств теплокомунальної енергетики / О. І. Руденко, О.О. Мезенцева, О.М. Терех, М.М. Вознюк // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія „Економіка”. – 2016. – № 2 (47). – С. 228-232.
6. Вознюк М. М. Оптимальная высота поперечных ребер плоскоовальной трубы / М. М. Вознюк, О.В. Семеняко, В.А. Бондар // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2016.- № 4. – С. 60-65.
7. Вознюк М.М. Теплообмін плоскоовальних труб з неповним оребренням в умовах вільної конвекції та природної тяги / М.М.Вознюк, О.М.Терех, О.І.Руденко, С.А.Рева, О.В.Баранюк // ScienceRise. – 2016.- №2/2 (19). – С. 10-14.
8. Gershuni A.N. On experimental simulation of passive evaporation-and-condensation systems of reactor thermal shielding / A.N.Gershuni, A.P.Nishchik, V.G.Razumovskiy, I.L. Piolo // Proc. of the 2016 24th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE24), Charlotte, NC, USA, June 26-30, 2016, Paper ICONE-61159, 6 pages.
9. Razumovskiy V.G. Thermal Acceleration of SCW Flow in Heat-Generating Channels as a Factor of Heat Transfer Deterioration / V.G. Razumovskiy, E.M. Mayevskiy, E.N. Pis'mennyi, A.E. Koloskov. // Technical Meeting on Heat Transfer, Thermal-Hydraulics and System Design for Supercritical Water Cooled Reactors, 22–24 August 2016, The Diamond, The University of Sheffield, United Kingdom, 18 pages.
10. Письменный Е.Н. Эффективные теплоутилизаторы из плоскоовальных труб с неполным оребрением / Е.Н. Письменный, П.И.Багрий, М.М.Вознюк // В кн. докладов и сообщений XV Минского международного форума по тепломассообмену, Май 23-26, 2016.- Минск.-2016.-Т. 1.-С. 181-183.
11. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамическое сопротивление шахматных пакетов плоскоовальных труб с лунками / Е.Н. Письменный, В.А.Кондратюк, А.М.Терех // В кн. докладов и сообщений XV Минского международного форума по тепломассообмену, Май 23-26, 2016.-Минск.-2016.-Т. 1.-С. 184-187.
12. Письменный Е.Н. Теплоаэродинамическая эффективность поперечно омываемых пучков винтообразных труб / Е.Н. Письменный, С.А.Рева, А.М.Терех, А.В.Баранюк // В кн. докладов и сообщений XV Минского международного форума по тепломассообмену, Май 23-26, 2016.-Минск.-2016.-Т. 3.-С. 184-188.
13. Гершуни А.Н. Структурные характеристики металлических пористых тонковолокнистых материалов для систем охлаждения электронной аппаратуры / А.Н.Гершуни, А.П.Нищик - В кн.: Труды семнадцатой Международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии” СИЭТ-2016.- Одесса.-2016.-С. 170-171.



14. Gershuni A.N. Evaporation-condensation cooling systems for electronic equipment / A.N. Gershuni, A.P. Nishchik // *Radioelectronics and Communications Systems*.-2017.-V. 60.- No. 7-P. 312-318.

15. Gershuni, A. Evaporation and condensation devices for passive heat removal systems in nuclear power engineering / A.Gershuni, E.Pismennyi, A.Nishchik // *Nuclear and Radiation Safety*. – 2017. – V. 1 – No. 73. –P. 16-23.

16. Гершуни А.Н. Испарительно-конденсационные устройства для систем пассивного теплоотвода в атомной энергетике / А.Н.Гершуни, Е.Н.Письменный, А.П.Нищик // *Ядерна та радіаційна безпека*. – 2017. № 1(73) . – С.16-23.

17. Письменный Є.М. Теплоаеродинамічна ефективність пакетів гвинтоподібних труб / Є. М. Письменний, С. В. Рева, О. М. Терех, О. В. Баранюк // *Наукові вісті НТУУ „КПІ”*. – 2017. № 2. – С. 7-11.

18. Гершуни А.Н. Испарительно-конденсационные системы охлаждения электронной аппаратуры / А.Н.Гершуни, А.П.Нищик // *Известия вузов. Радиоэлектроника*.-2017.-Т. 60, № 7 (661).-С. 403-411.

19. Khairnasov Sergii. Development of advanced high porosity wicks for the high temperature heat pipes of concentrating solar power / Sergii Khairnasov, Charles E. Andraka, Volodymyr Baturkin, Vladlen Zaripov, Oleksandr Nishchik // *Applied Thermal Engineering*.-2017.-V. 126.- 5 November.- P. 1170–1176.

20. Гершуни А.Н. Гидродинамические характеристики металлических пористых тонковолокнистых материалов для систем охлаждения электронной аппаратуры / А.Н.Гершуни, А.П.Нищик // *Труди XVIII Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні інформаційні та електронні технології” СИЭТ-2017.-Одеса.-2017.-С. 39-41.*

21. Razumovskiy V.G. New heat transfer and pressure drop correlation for SCW in tubes, annuli and bundles / V.G. Razumovskiy, E.N. Pis'mennyi, V.K.Yeryomenko, E.M. Mayevskiy, A.E. Koloskov // 3<sup>rd</sup> Reseach Coordination Meeting (RCM) on “Understanding and Prediction of Thermal-Hydraulics Phenomena Relevant to Supercritical Water Cooled Reactors (SCWRs)”, June 26–29, 2017, University of Wiscousin - Medison, Medison, Wiscousin US, 20 pages.

22. Razumovskiy V.G. Pressure drop correlation, CFD analysis and benchmark / V.G. Razumovskiy, E.N. Pis'mennyi, V.K.Yeryomenko, E.M. Mayevskiy, A.E. Koloskov, V.V.Filonov// 3rd Reseach Coordination Meeting (RCM) on “Understanding and Prediction of Thermal-Hydraulics Phenomena Relevant to Supercritical Water Cooled Reactors (SCWRs)”, June 26–29, 2017, University of Wiscousin - Medison, Medison, Wiscousin US, 22 pages.

23. Razumovskiy V.G. Numerical analysis of HT and PD in 3-rod bundle and benchmark / V.G. Razumovskiy, E.N. Pis'mennyi, V.K.Yeryomenko, A.E. Koloskov, V.V.Filonov // 3rd Reseach Coordination Meeting (RCM) on “Understanding and Prediction of Thermal-Hydraulics Phenomena Relevant to Supercritical Water Cooled Reactors (SCWRs)”, June 26–29, 2017, University of Wiscousin - Medison, Medison, Wiscousin US, 13 pages.

24. Філонов В.В. Вибір оптимальної двопараметричної моделі турбулентності для CDF аналізу теплообміну при надкритичних параметрах / В.В.Філонов, В.А.Кондратюк // *Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів. КПІ ім. Ігоря Сікорського*.- Київ.- 2017.- Т. 1.- С.43.

25. Filonov V.V. On experimental and computational investigation of heat transfer deterioration and hydraulic resistance in annular channel and SCWR 3-rod bundle / V.V.Filonov, Yu.S.Filonova, V.G.Razumovskiy, E.N.Pis'mennyi // *Proc. of the 26th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-26)*, London, England, July 22-26, 2018, Paper No. Icone26-81289, 8 pages.

26. Гершуни А.Н. Капиллярно-транспортные характеристики металлических пористых тонковолокнистых материалов для систем охлаждения электронной аппаратуры / А.Н.Гершуни, А.П.Нищик // *Труди XIX Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні інформаційні та електронні технології” СИЭТ-2018.-Одеса.-2018.-С. 101-103.*

27. Brogna Chiara. Capabilities of high y+ wall approaches in predicting heat transfer to supercritical fluids in rod bundle geometries / Chiara Brogna, Andrea Pucciarelli, Walter Ambrosini, Victor Razumovskiy, Evgeniy Pis'mennyi // *Annals of Nuclear Energy*.-2018.- V.120.- P. 272–278.

- доповіді на конференціях (2 зі студ.):

1. Andraka Charles E. Development of advanced high porosity wicks for the high temperature heat pipes of concentrating solar power / Charles E. Andraka, Volodymyr Baturkin, Vladlen Zaripov, Oleksandr Nishchyk, Sergii Khairnasov // Joint 18<sup>th</sup> International Heat Pipe Conference and 12<sup>th</sup> International Heat Pipe Symposium, June 12-16, 2016.-Jeju, Korea.

2. Gershuni A.N. On experimental simulation of passive evaporation-and-condensation systems of reactor thermal shielding / A.N.Gershuni, A.P.Nishchik, V.G.Razumovskiy, I.L. Pioro // Proc. of the 2016 24th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE24), June 26-30, 2016.- Charlotte, NC, USA.

3. Письменный Е.Н. Эффективные теплоутилизаторы из плоскоовальных труб с неполным оребрением / Е.Н. Письменный, П.И.Багрий, М.М.Вознюк // В кн. докладов и сообщений XV Минского международного форума по теплообмену, Май 23-26, 2016.- Минск.-Республика Беларусь.

4. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамическое сопротивление шахматных пакетов плоскоовальных труб с лунками / Е.Н. Письменный, В.А.Кондратюк, А.М.Терех // В кн. докладов и сообщений XV Минского международного форума по теплообмену, Май 23-26, 2016.-Минск.-Республика Беларусь.

5. Письменный Е.Н. Теплоаэродинамическая эффективность поперечно омываемых пучков винтообразных труб / Е.Н. Письменный, С.А.Рева, А.М.Терех, А.В.Баранюк // В кн. докладов и сообщений XV Минского международного форума по теплообмену, Май 23-26, 2016.-Минск.-Республика Беларусь.

6. Гершуни А.Н. Структурные характеристики металлических пористых тонковолокнистых материалов для систем охлаждения электронной аппаратуры / А.Н.Гершуни, А.П.Нищик // В кн.: Труды семнадцатой Международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии” СИЭТ-2016, май 23-27.-2016.-Одесса.-Украина.

7. Huerta Emmanuel Villalobos. Analysis of the recirculation system of gases in a steam generator furnace of 350 MW in the oxides of nitrogen formation / Emmanuel Villalobos Huerta, Georgiy Polupan, Guillermo Jarquin López, Yevgen Pysmennyu // Prog. VIII Congreso Int. de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (CIIES), 17-21 de octubre, 2016.-México.- Estados Unidos Mexicanos.

8. Ramirez Alma E. Air preheater characterization for an industrial boiler of firetube / Alma E.Ramirez, Georgiy Polupan, Guillermo Jarquin, Yevgen Pysmennyu // Prog. VIII Congreso Int. de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (CIIES), 17-21 de octubre, 2016.-México.- Estados Unidos Mexicanos.

9. Salvador Julio César. Analysis termoeconómico del aumento de la eficiencia térmica de una caldera industrial / Julio César Salvador, O.Alvarado Toledo, G.Polupan, G. Jarquin López, Y.Pysmennyu // Prog. VIII Congreso Int. de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (CIIES), 17-21 de octubre, 2016.-México.- Estados Unidos Mexicanos.

10. Гершуни А.Н. Гидродинамические характеристики металлических пористых тонковолокнистых материалов для систем охлаждения электронной аппаратуры / А.Н.Гершуни, А.П.Нищик // В кн.:Труды XVIII Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні інформаційні та електронні технології” СИЭТ-2017, Травень 22-26.-2017.-Одеса.-Україна.

11. Філонов В.В. (студ.).Вибір оптимальної двопараметричної моделі турбулентності для CDF аналізу теплообміну при надкритичних параметрах / В.В.Філонов, В.А.Кондратюк // В кн.: Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Квітень 25-28.- 2017.-Київ.-Україна.

12. Filonov V.V. (студ.). On experimental and computational investigation of heat transfer deterioration and hydraulic resistance in annular channel and SCWR 3-rod bundle / V.V.Filonov, Yu.S.Filonova, V.G.Razumovskiy, E.N.Pis'mennyi // Proc. of the 26th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-26), July 22-26.-2018.-London.- UK.

13. Гершуни А.Н. Капиллярно-транспортные характеристики металлических пористых тонковолокнистых материалов для систем охлаждения электронной аппаратуры / А.Н.Гершуни, А.П.Нищик // В кн.:Труды XIX Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні

інформаційні та електронні технології” СИЭТ-2018, Травень 28-Червень 1.-2018.-Одеса.-Україна.

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

Виконано доповідь авторів В.Г.Розумовського, Є.М.Маєвського, Є.М.Письменного та О.С.Колоскова на 3-й міжнародній конференції з теплопередачі та гідродинаміки при надкритичному тиску «Термічне прискорення потоку води НВТ в теплогенерувальних каналах як фактор погіршення тепловіддачі», яка відбулась в м. Шеффілд (Велика Британія):

Razumovskiy V.G. Thermal Acceleration of SCW Flow in Heat-Generating Channels as a Factor of Heat Transfer Deterioration / V.G. Razumovskiy, E.M. Mayevskiy, E.N. Pis'mennyi, A.E. Koloskov. // Technical Meeting on Heat Transfer, Thermal-Hydraulics and System Design for Supercritical Water Cooled Reactors, 22–24 August 2016.- The Diamond, The University of Sheffield, United Kingdom.

Участь в робочій зустрічі “Third Research Coordination Meeting on Understanding and Prediction of Thermal-Hydraulics Phenomena Relevant to Supercritical Water Cooled Reactors” (Третя Координаційна Нарада по Науково - Дослідницькому Проекту МАГАТЕ № 131025-CR-3 «Осміслення та прогнозування теплогідравлічних явищ, що відбуваються в реакторах, охолоджуваних водою при надкритичному тиску»), що відбулась у Вісконсінському - Медісонівському університеті (м. Медісон, шт. Вісконсін, США) з 26 по 29 червня 2017 г.

Участь в науковій дискусії «Стан досліджень теплогідравлічних процесів в реакторах, що охолоджуються водою надкритичного тиску». Підготовлено доповідь про термічне прискорення потоку води надкритичного тиску в теплогенерувальних каналах як фактор погіршення теплопередачі для її обговорення на технічних зборах, організованих секцією атомних реакторів МАГАТЕ. Матеріали доповіді включено в технічний звіт МАГАТЕ, який розповсюджено серед провідних профільних установ світу.

**Виконано доповіді по трьом темам, в тому числі 2 зі студентом:**

1. Razumovskiy V.G. New heat transfer and pressure drop correlation for SCW in tubes, annuli and bundles / V.G. Razumovskiy, E.N. Pis'mennyi, V.K.Yeryomenko, E.M. Mayevskiy, A.E. Koloskov // 3<sup>rd</sup> Reseach Coordination Meeting (RCM) on “Understanding and Prediction of Thermal-Hydraulics Phenomena Relevant to Supercritical Water Cooled Reactors (SCWRs)”, June 26–29.-2017.- Wiscousin – Medison.-United States.

2. Razumovskiy V.G. Pressure drop correlation, CFD analysis and benchmark / V.G. Razumovskiy, E.N. Pis'mennyi, V.K.Yeryomenko, E.M. Mayevskiy, A.E. Koloskov, V.V.Filonov (студ.). // 3rd Reseach Coordination Meeting (RCM) on “Understanding and Prediction of Thermal-Hydraulics Phenomena Relevant to Supercritical Water Cooled Reactors (SCWRs)”, June 26–29.- 2017.-Wiscousin - Medison.- United States.

3. Razumovskiy V.G. Numerical analysis of HT and PD in 3-rod bundle and benchmark / V.G. Razumovskiy, E.N. Pis'mennyi, V.K.Yeryomenko, A.E. Koloskov, V.V.Filonov (студ.). // 3rd Reseach Coordination Meeting (RCM) on “Understanding and Prediction of Thermal-Hydraulics Phenomena Relevant to Supercritical Water Cooled Reactors (SCWRs)”, June 26–29.-2017.-Wiscousin - Medison.- United States.

Матеріали доповідей включено в технічний звіт МАГАТЕ.

**13. Ключові слова до розробки:** процеси теплопередачі, системи пасивного тепловідведення, бар'єри безпеки