

## ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертаційної роботи **Кандала Степана Михайловича** за темою «Ресурс елементів внутрішньокорпусних пристроїв реактора ВВЕР-1000 з урахуванням залишкових зварювальних напружень», поданої на здобуття наукового ступеню доктора філософії за спеціальністю 132 Матеріалознавство

Дисертаційна робота присвячена виконанню актуального науково-практичного завдання - прогнозуванню ресурсу елементів внутрішньокорпусних пристроїв реактора ВВЕР-1000 за результатами проведення розрахункової оцінки зміни зазорів між вигородкою, шахтою внутрішньокорпусною і тепловиділяючими збірками (ТВЗ), а також крихкої міцності вигородки реактора ВВЕР-1000 з урахуванням залишкових технологічних зварювальних напружень для обґрунтування продовження терміну безпечної експлуатації (до 60 років) в умовах інтенсивного радіаційного опромінення

### **Актуальність роботи**

Вигородка і внутрішньо-корпусна шахта (ШВК) є елементами внутрішньокорпусних пристроїв (ВКП), що визначають та обмежують залишковий ресурс реакторів ВВЕР-1000 при подовженні терміну експлуатації. Тому дослідження і розвиток підходів розрахункового обґрунтування міцності і ресурсу елементів ВКП є дуже актуальною проблемою для атомної енергетики і енергетичної незалежності України. Елементи ВКП виготовляються за технологією електрошлакового зварювання. Згідно з вимогами нормативних документів всі зварні з'єднання елементів обладнання АЕС з аустенітної сталі після електрошлакового зварювання піддаються термообробці за режимом аустенізації, процес якої передбачає нагрів до 1100°C, короткочасну витримку і швидке охолодження на повітрі. Геометрія вигородки є неоднорідною по товщині, тобто в процесі охолодження можуть виникати значні температурні градієнти, які призводять до утворення високих залишкових напружень в об'ємі вигородки.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Результати дисертаційної роботи пов'язані з такими науковими програмами:

1. Наукова робота 1.6.2.34.77 (К-1-25) «Оцінка напружено-деформованого стану зварних конструкцій внутрішньокорпусних пристроїв реактора ВВЕР-1000» за цільовою комплексною програмою наукових досліджень НАН України «Наукове забезпечення розвитку ядерно-енергетичного комплексу та перспективних ядерних технологій» (2016 – 2018 рр.)
2. Наукова робота 34/44 «Розробка рекомендацій для удосконалення прийнятих розрахункових методів оцінки технічного стану та продовження строку експлуатації внутрішньокорпусних пристроїв, а також підходів визначення залишкових напружень в зоні зварних з'єднань і наплавлень корпусів реактора ВВЕР-1000» за цільовою комплексною програмою наукових

досліджень НАН України «Надійність та довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд» (Ресурс-2, 2019 р.)

#### **Наукова новизни отриманих результатів:**

– Вперше виявлена можливість завдання вхідних даних за розподілом флюенсу (швидкості набору пошкоджуючої дози) і об'ємних тепловиділень у вигляді апроксимаційних функцій, як в поперечному перерізі ВКП (2D) так і по всьому об'єму (3D), що дозволяє суттєво знизити трудомісткість підготовки вхідних даних для кожної із паливних кампаній для моделювання радіаційного розпухання матеріалу елементів ВКП під час довгострокової експлуатації.

– Визначено, що післязварювальна термічна обробка елементів ВКП ВВЕР-1000 (вигородка і ШВК) за режимом аустенізації ( $T=1100^{\circ}\text{C}$ ) дозволяє істотно релаксувати залишкові зварювальні напруження, однак висока швидкість охолодження при інтенсивному теплообміні на повітрі та значна геометрична неоднорідність вигородки призводять до появи градієнта температур, і як наслідок, утворення високих залишкових розтягуючих напружень в об'ємі вигородки та стискаючих напружень на поверхні (осьові до 320 МПа, окружні до 180 МПа).

– Доведено, що залишкові зварювальні напруження суттєво впливають на опір крихкому руйнуванню вигородка і ШВК при довгостроковій експлуатації та під час аварійних ситуацій, і це необхідно враховувати при визначенні ресурсу ВКП ВВЕР-1000. Урахування ЗЗН дозволяє значно знизити консервативність при оцінці ОКР вигородки для поверхневих напівеліптичних тріщин, розташованих на зовнішній поверхні вигородки, де в процесі виготовлення утворюються залишкові напруження стискання. В зв'язку з утворенням високих розтягуючих напружень в об'ємі вигородки більш небезпечними з точки зору ОКР були визначені підповерхневі еліптичні тріщини.

– Виявлено несуттєвий вплив ЗЗН на кінетику зазорів між ТВЗ, вигородкою і ШВК, що впливає на консервативність оцінки ресурсу ВКП ВВЕР-1000. При максимальних накопичених дозах (120 зна) контакт між вигородкою і ШВК можливий, а врахування ЗЗН може відстрочити момент контакту приблизно на 2 роки. Також визначено, що зазор між вигородкою і ТВЗ за 60 років експлуатації при різних можливих рівнях накопиченої дози не буде вичерпаний.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

1. Виконано порівняльний аналіз існуючих моделей радіаційного розпухання аустенітної сталі 08X18N10T і близького за хімічним складом аналога AISI 304 із визначення радіаційного розпухання матеріалу вигородки реактора ВВЕР-1000 в процесі довготривалої експлуатації, результати якого довели, що прийнята ДП «НАЕК «Енергоатом» модель для розрахунку радіаційного розпухання, яка враховує накопичену дозу, температуру опромінення, напружений стан і процеси радіаційної повзучості в матеріалі, є досить консервативною і добре узгоджується з результатами, отриманими за іншими моделями в інтервалі вхідних параметрів, характерних для експлуатаційних режимів енергоблоків ВВЕР-1000, а саме: в інтервалі

максимальних температур матеріалу вигородки 380...390°C і накопиченої дози за 60 років експлуатації не більше 120 зна.

2. При розробці методології розрахункового визначення НДС в зоні зварних з'єднань елементів ВКП при виготовленні і подальшій довгострокової експлуатації вдосконалено існуючі розрахункові методи обґрунтування подовження ресурсу ВКП реактора типу ВВЕР-1000, а саме:

– Розроблена методика параметричного опису вхідних даних по об'ємним тепловиділенням і швидкості набору пошкоджуючої дози, як в максимальному перерізі ВКП в двомірному випадку так і по всьому об'єму, що дозволяє знизити трудомісткість підготовки вхідних даних за паливними кампаніями для моделювання радіаційного розпухання матеріалу елементів ВКП під час довгострокової експлуатації.

– Доведена необхідність врахування послідовності і особливостей паливних кампаній при обґрунтуванні надпроектного терміну експлуатації реактора ВВЕР-1000, оскільки усереднення вхідних даних по об'ємним тепловиділенням і швидкості набору пошкоджуючої дози призводить до суттєвої похибки кінцевого результату при визначенні НДС ВКП ВВЕР-1000.

– Визначено, що післязварювальна термічна обробка елементів ВКП ВВЕР-1000 (вигородка і ШВК) за режимом аустенізації ( $T=1100^{\circ}\text{C}$ ) дозволяє істотно релаксувати залишкові зварювальні напруження, однак висока швидкість охолодження при інтенсивному теплообміні на повітрі та значна геометрична неоднорідність вигородки впливає на нерівномірність охолодження в об'ємі конструкцій, що призводить до появи градієнта температур і як наслідок утворення високих ЗТН.

3. Доведено, що високі ЗТН суттєво впливають на НДС елементів ВКП при довгостроковій експлуатації та під час аварійних ситуацій, і це необхідно враховувати при визначенні ресурсу ВКП ВВЕР-1000. Вперше обґрунтовано, що урахування ЗТН дозволяє значно знизити консервативність при оцінці ОКР вигородки для поверхневих напівеліптичних тріщин, розташованих на зовнішній поверхні вигородки, де в процесі виготовлення утворюються залишкові напруження стискання.

4. Виявлено вплив ЗТН на кінетику змикання зазору між вигородкою та ШВК. При інтенсивному опроміненні вигородки (максимальне значення накопиченої пошкоджуючої дози 120 зна) при врахуванні ЗТН контакт вигородки і ШВК прогнозується на 3 роки раніше ніж в випадку коли ЗТН не були враховані. Зазор між вигородкою і ТВЗ за 60 років експлуатації при різних можливих рівнях накопиченої дози не буде вичерпаний і ресурс безпечної експлуатації забезпечується.

#### **Особистий вклад здобувача.**

В роботах, опублікованих в співавторстві дисертанту належить участь у постановці задач, розробці математичних моделей та розрахункових алгоритмів, аналізі отриманих результатів та формуванні висновків.

Особиста участь в роботі з продовження терміну експлуатації ВКП енергоблока №2 ПУАЕС та апробації документу ПМ-Т.0.03.333-15, Типовая

программа по оценке технического состояния и продления срока эксплуатации внутрикорпусных устройств ВВЭР-1000, ГП «НАЭК «Энергоатом», (2015).

### **Повнота викладення результатів роботи в наукових виданнях.**

За матеріалами дисертації опубліковано 15 наукових робіт, з яких 7 – публікації в спеціалізованих наукових журналах, та 8 – роботи в збірниках доповідей міжнародних наукових конференцій. 3 наукові роботи внесені до наукометричної бази SCOPUS.

### **Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації**

1. Мірзов І.В., Кандала С.М. (2016). Методика параметрического описания входных данных для расчета радиационного распухания ВКУ ВВЭР-1000. Ядерна і радіаційна безпека. №3, 23-27. Режим доступу: [https://doi.org/10.32918/nrs.2016.3\(71\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2016.3(71).05) (Публікація в українському виданні наукометрична база даних Scopus ISSN. Q4)
2. Makhnenko O. V., Kandala S. M., Cherkashin M. V. (2019). Improving the methods for estimating radiation swelling and progressive dimensional changes of the elements of WWER-1000 internals. Yader. Radiats. Bezp. №. 2(82), 38–45. Режим доступу: [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.2\(82\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.2(82).07) (Публікація в українському виданні наукометрична база даних Scopus ISSN. Q4)
3. Makhnenko O. V., Kandala, S. M., Basistyuk, N.V. (2021). Influence of the heat transfer coefficient on the level of residual stress after heat treatment of the WWER-1000 reactor baffle. Mechanics and Advanced Technologies. №5(2), 254–259. Режим доступу: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.2.245074>. (Публікація в українському виданні категорії Б).
4. Махненко О.В., Кандала С.М., Басистюк Н.Р., Черкашин М.В. (2021). Математичне моделювання залишкових напружень в елементах ВВЕР-1000 після термічної обробки. Автоматичне зварювання. №3, 10-16. Режим доступу: <https://doi.org/10.37434/as2021.03.02>. (Публікація в українському виданні категорії Б).
5. Махненко О.В., Кандала С.М., Савицька О.М. (2021). Порівняльний аналіз моделей радіаційного розпухання для розрахункового визначення НДС вигородки ВВЕР-1000. Проблеми міцності. № 5, 13-22. Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00334-7>. (Публікація в українському виданні наукометрична база даних Scopus ISSN. Q4).
6. Махненко О.В., Кандала С.М. (2022) Вплив залишкових технологічних напружень на опір крихкому руйнуванню вигородки реактора ВВЕР-1000 в умовах аварійної ситуації. Технічна діагностика та неруйнівний контроль. №4, 12-16. Режим доступу: <http://doi.org/10.37434/tdnk2022.04.02>. (Публікація в українському виданні категорії Б)
7. Махненко О. В., Кандала С. М. (2022). Розрахункова оцінка опору крихкого руйнування вигородки реактора ВВЕР-1000 в процесі експлуатації з урахуванням залишкових технологічних напружень. Технічна діагностика та неруйнівний контроль. № 3, 3-11. Режим доступу:

<https://doi.org/10.37434/tdnk2022.03.01> (Публікація в українському виданні категорії Б)

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

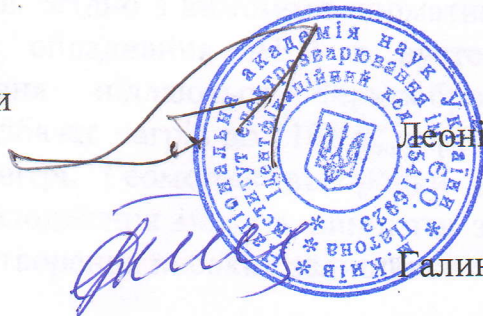
8. Мирзов І.В., Кандала С.М. Особенности формирования входных данных для расчета радиационного распухания сварных конструкций ВКУ ВВЕР-1000. Сборник докладов VIII международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (Одесса, 19-23 сентября 2016г.). Одесса, 2016. — с. 120-124.
9. Makhnenko O., Kandala S. Mathematical modelling of irradiation swelling of the reactor WWER-1000 core baffle. Conference proceedings «Materials resistant to extreme conditions for future energy systems» (Kyiv, 12-14 June 2017). Kyiv, 2017, – p. 63. Режим доступу: <http://doi.org/10.2760/991754>.
10. Махненко О.В., Кандала С.М. Математичне моделювання радіаційного розпухання вигородки реактора ВВЕР-1000. Збірник наукових праць «Сучасні проблеми механіки та математики» (Львів, 22-25 травня 2018 р.). Львів, 2018, – том 1, с. 108-109.
11. Махненко О.В., Кандала С.М. Моделювання радіаційного розпухання вигородки ВКП реактора ВВЕР-1000 при обґрунтуванні продовження експлуатації. Збірник наукових праць міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та фахівців «Проблеми сучасної ядерної енергетики» (Харків, 14-16 листопада 2018 р.). Харків, 2018, – с. 51-52.
12. Махненко О.В., Кандала С.М., Савицька О.М. Моделирование радиационного распухания сварных элементов ВКУ реактора ВВЭР-1000 при обосновании продления эксплуатации. Сборник докладов IX международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (Одесса, 10-14 сентября 2018 г.). Одесса, 2018, – с. 52-58.
13. Makhnenko O., Kandala S, Actual Problems of Structural Integrity Assessment of WWER-1000 Pressure Vessel Internals. Proceedings of the Second International Conference on Theoretical. Applied and Experimental Mechanics (Corfu, 23-26 June 2019). Corfu, 2019, – pp.327-333. Режим доступу: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-21894-2\\_60](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21894-2_60).
14. Махненко О.В., Кандала С.М., Басистюк Н.Р. Залишкові напруження в зварних елементах внутрішньокорпусних пристроїв ВВЕР-1000. Збірник доповідей міжнародної онлайн-конференції «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах» (Київ, 27-28 травня 2021 р.). Київ, – 2021 с. 86-90.
15. Махненко О.В., Кандала С.М. Вплив залишкових технологічних напружень на опір крихкому руйнуванню вигородки реактора ВВЕР-1000. Збірник тез IV Міжнародної конференції “Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику” (Київ, 30 вересня 2022 р.). Київ, 2022 р. – с.72-73.

## ВИСНОВОК

Виходячи з аналізу вищенаведених робіт, можна зробити висновок про успішне виконання встановлених вимог щодо необхідної кількості наукових публікацій перед представленням дисертаційної роботи Кандаля С.М. до захисту, а також про достатню повноту висвітлення наукових і практичних результатів в опублікованих працях.

Розглянута дисертаційна робота провідного інженер відділу математичних методів фізико-хімічних процесів при зварюванні і спецелектрометалургії ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України Кандали Степана Михайловича за темою «Ресурс елементів внутрішньокорпусних пристроїв реактора ВВЕР-1000 з урахуванням залишкових зварювальних напружень», є завершеною науково-дослідницькою роботою, яка за своєю актуальністю, науковою новизною, важливістю отриманих результатів, висновків та рекомендацій, їх практичною цінністю відповідає вимогам, викладеним у Постанові КМУ від 12 січня 2022 року №44 «Порядок присудження ступеню доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії». Робота містить нові науково результати проведених здобувачем досліджень, які мають наукове-практичне значення в галузі матеріалознавства, вона базується на достатній кількості наукових публікацій, не містить текстових запозичень без посилання на джерело (плагіату) і може бути прийнята до захисту на здобуття наукового ступеню доктора філософії за спеціальністю 132 – Матеріалознавство.

Голова семінару  
академік НАН України  
д.т.н., професор



Лесюнд ЛОБАНОВ

Секретар скмінару  
к.т.н., с.н.с.

Галина САПРИКІНА

Учений секретар Інституту  
електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ  
к.т.н. І.М. Клочков