

Секція: 7. Енергетика та енергозбереження

**АНОТОВАНИЙ ЗВІТ**  
**за завершеним фундаментальним науковим дослідженням, виконання якого**  
**здійснювалось у 2015–2017 роках**

Назва: Теоретичні основи експлуатації ВВЕР-1000 з мінімальною ймовірністю накопичення пошкодження оболонок твелів

Керівник роботи: Максимов Максим Віталійович

Номер державної реєстрації: 0115U000407

Номер облікової картки заключного звіту: \_\_\_\_\_

Повна назва організації-виконавця: Одеський національний політехнічний університет

Назва пріоритетного тематичного напрямку організації-виконавця: Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України та сталого розвитку суспільства і держави.

Строк виконання: початок - 02.01.2015 р., закінчення - 31.12.2017 р.

Обсяг коштів, виділених на виконання НДР за весь період (згідно із запитом / фактичний) 630,0 / 478,3 тис. грн.

## **1. КОРОТКИЙ ЗМІСТ ЗАПИТУ**

1.1. Дослідження спрямоване на вирішення фундаментальної наукової проблеми, а саме на розробку теоретичних основ експлуатації ВВЕР-1000 з мінімальною ймовірністю накопичення пошкодження оболонок твелів, що забезпечить цілісність оболонок за рахунок мінімізації ймовірності їх деформаційного руйнування. Чинний підхід до експлуатації ВВЕР-1000 не передбачає мінімізацію ймовірності деформаційного руйнування оболонок твелів з урахуванням впливу змін потужності реакторної установки (РУ), розташування органів регулювання (ОР), нерівномірності енерговиділення в тепловидільних збірках (ТВЗ), перестановок ТВЗ на пошкодження оболонок, шляхом врахування повзучості як основного процесу їх руйнування. Таким чином, невирішеність проблеми відсутності теоретичних основ експлуатації ВВЕР-1000 з мінімальною ймовірністю накопичення пошкодження оболонок твелів перешкоджає еволюційному розвитку РУ в напрямку підвищення енергонапруженості активної зони реактора (АКЗ), тривалості кампанії та глибини вигорання палива.

1.2. Об'єкт дослідження – твели ядерного реактора ВВЕР-1000 за нормальних умов експлуатації. Предмет дослідження – моделі та методи обґрунтування безпечної експлуатації твелів ВВЕР-1000.

1.3. Мета дослідження – розробка теоретичних основ експлуатації ВВЕР-1000 з мінімальною ймовірністю накопичення пошкодження оболонок твелів, для забезпечення цілісності оболонок за рахунок мінімізації ймовірності їх деформаційного руйнування.

Основні завдання дослідження:

- аналіз моделей і методів розрахунку ймовірності деформаційного руйнування оболонок твелів ВВЕР-1000;
- розробка математичної моделі зміни ймовірності деформаційного руйнування оболонки твела, що враховує основний процес накопичення пошкодження його оболонки і параметри, які визначають пошкодження за нормальних умов експлуатації ВВЕР-1000;
- розробка методу розрахунку ймовірності деформаційного руйнування оболонки твела за нормальних умов експлуатації з урахуванням впливу нерівномірності енерговиділення в тепловидільних збірках (ТВЗ), основного процесу накопичення пошкодження та параметрів, що її визначають;
- розробка моделі ефективності управління властивостями твелів, що враховує ймовірність деформаційного руйнування оболонок твелів та вимоги з економічності їх експлуатації;
- розробка методу управління властивостями твелів, що враховує ймовірність деформаційного руйнування оболонок твелів, баланс безпеки та економічності експлуатації твелів.

## 2. ОПИС ПРОЦЕСУ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Метод варіації постійних, енергетичний варіант теорії повзучості (ЕВТП), моделювання зміни пошкодження оболонок твелів ВВЕР-1000 залежно від режимних параметрів РУ і конструкційних параметрів твела, розміщення і вертикального переміщення ОР, перестановок ТВЗ, комп'ютерне моделювання, врахування неоднорідності розподілу енерговиділення серед твелів ТВЗ ВВЕР-1000, врахування невизначеності вхідних параметрів моделі розрахунку пошкодження, одночасне врахування пошкодження оболонок твелів, стійкості аксіального офсету та глибини вигорання ядерного палива ВВЕР-1000.

2.2. Однією з основних ідей проекту є необхідність, для підвищення безпеки експлуатації й надійності ядерного палива реакторів ВВЕР-1000, розвитку методів контролю ймовірності розгерметизації оболонок твелів за механізмом накопичення деформаційної пошкоженості, оскільки для цих реакторів причина розгерметизації оболонок твелів, як правило, вірогідно невідома. Також важливою ідеєю є рішення задачі оптимізації перемикачів статичних програм регулювання потужності ВВЕР-1000 за рахунок знаходження розв'язку цільової функції, яка об'єднує в собі такі характеристики, як економічність та безпека експлуатації.

2.3. Важливою гіпотезою було припущення, що величина деформаційного пошкодження оболонок відіграє значну обмежуючу роль при розрахунковій оцінці граничного стану твела. Ця гіпотеза була підтверджена при виконанні НДР шляхом розрахункового аналізу на основі використання ЕВТП, моделювання зміни пошкодження оболонок твелів ВВЕР-1000 залежно від сукупностей параметрів РУ і твелів, що визначають пошкодження оболонок, а також завдяки врахуванню неоднорідності розподілу енерговиділення серед твелів в ТВЗ, при застосуванні розробленого методу прогнозування розгерметизації оболонок твелів ВВЕР-1000 враховуючи неоднорідність розподілу енерговиділення серед твелів в ТВЗ. Другою важливою гіпотезою було припущення, що в результаті оптимізації перемикачів статичних програм регулювання потужності ЯЕУ з ВВЕР-1000 відхилення значень основних технологічних параметрів реактора залишатимуться в зоні допустимих величин, що дозволить безударно перемикачів статичні програми на рівні 80 % потужності ЯЕУ.

2.4. Розроблений новий метод прогнозування розгерметизації оболонок твелів ВВЕР-1000 враховуючи неоднорідність розподілу енерговиділення серед твелів в ТВЗ. Також розроблений новий метод моделювання експлуатації ЯЕУ з ВВЕР-1000 на основі вдосконаленої математичної моделі, яка включає цільову функцію, що враховує такі критерії, як пошкодження паливної оболонки, глибина вигорання ядерного палива та

аксіальний офсет. Ця цільова функція дозволила знайти рішення задачі оптимізації перемикачів статичних програм регулювання потужності ЯЕУ з ВВЕР-1000 та запропонувати метод управління властивостями твेलів, що враховує ймовірність деформаційного руйнування оболонок твелів, баланс безпеки та економічності експлуатації твелів, який значно поліпшує конкурентоспроможність АЕС серед інших джерел вироблення електричної енергії в Україні.

2.5. Робота виконувалась на кафедрі автоматизації теплоенергетичних процесів ОНПУ, за організаційної підтримки Шведського агентства з радіаційної безпеки. Для виконання роботи використовуються програмні продукти, які пройшли міжнародну верифікацію та внесені до NEA Data Bank або в реєстр ПЗ ДАН РФ: ANC-N, FEMAXI, «Імітатор реактора». Також використовувались інформаційні ресурси:

1) Міжнародна комп'ютерна база даних та програм Агентства з атомної енергії країн ОЕСР (NEA Data Bank);

2) Світова бібліографічна база даних «Ulrichsweb»;

3) Загальнодержавна реферативна база даних «Україніка наукова» (Україна);

4) Національна БД «Российский индекс научного цитирования» (Росія).

### 3. ОДЕРЖАНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ

#### 3.1. Результати етапів

Таблиця 1

Номер етапу, строки	Назва етапу згідно з технічним завданням	Заплановані результати	Отримані результати
1. з 02.01.15 по 31.12.15	Розробка моделі зміни ймовірності деформаційного руйнування оболонки твела за нормальних умов експлуатації ВВЕР-1000	Математична модель зміни ймовірності деформаційного руйнування оболонок твелів, що враховує основний процес накопичення пошкодження його оболонки і параметри, які визначають пошкодження за нормальних умов експлуатації ВВЕР-1000.  2 публікації у журналах та збірниках наукових праць, що входять до наукометричних баз даних (Scopus, WOS).  2 публікації у журналах, що включені до переліку наукових фахових видань України.  2 публікації у матеріалах конференцій  —	Математична модель зміни ймовірності деформаційного руйнування оболонок твелів, що враховує основний процес накопичення пошкодження його оболонки і параметри, які визначають пошкодження за нормальних умов експлуатації ВВЕР-1000.  1 публікація у журналі Scopus  4 публікації у журналах, що включені до переліку наукових фахових видань України.  4 публікації у матеріалах конференцій  4 навчальні посібники без

		— Захист 2 магістерських робіт.  Анотований звіт.	грифу МОН України. Захищено 2 кандидатські дисертації. Захищено 2 магістерські роботи.  Анотований звіт.
2. з 02.01.16 по 31.12.16	Розробка методу розрахунку ймовірності деформаційного руйнування оболонки твела за нормальних умов експлуатації ВВЕР-1000	Метод розрахунку ймовірності деформаційного руйнування оболонки твела за нормальних умов експлуатації, з урахуванням впливу нерівномірності енерговиділення в ТВЗ, основного процесу накопичення пошкодження та параметрів, що його визначають.  2 публікації у журналах та збірниках наукових праць, що входять до наукометричних баз даних (Scopus, Web of Science).  2 публікації у журналах, що включені до переліку наукових фахових видань України.  2 публікації у матеріалах конференцій  1 підручник  Захист 2 магістерських робіт  Захист кандидатської дисертації  Заявка на патент України  Анотований звіт	Метод розрахунку ймовірності деформаційного руйнування оболонки твела за нормальних умов експлуатації, з урахуванням впливу нерівномірності енерговиділення в ТВЗ, основного процесу накопичення пошкодження та параметрів, що його визначають.  3 публікації у журналах БД Scopus  2 публікації у журналах, що включені до переліку наукових фахових видань України.  3 публікації у матеріалах конференцій  7 навчальних посібників без грифу МОН України  Захищено 2 магістерські роботи  Підготовлено до захисту 2 кандидатські дисертації  Отримано 2 патенти на винахід (патент України та патент Росії)  Анотований звіт
3. з 02.01.17	Метод управління властивостями	Модель ефективності управління властивостями	Модель ефективності управління властивостями

по 31.12.17	твелів ВВЕР-1000	<p>твелів, що враховує ймовірність деформаційного руйнування оболонок твелів та вимоги з економічності їх експлуатації;</p> <p>Метод управління властивостями твелів, що враховує ймовірність деформаційного руйнування оболонок твелів, баланс безпеки та економічності експлуатації твелів.</p> <p>2 публікації у журналах та збірниках наукових праць, що входять до наукометричних баз даних (Scopus, WOS).</p> <p>2 публікації у журналах, що включені до переліку наукових фахових видань України.</p> <p>2 публікації у матеріалах конференцій</p> <p>—</p> <p>Захист 2 магістерських робіт.</p> <p>Захист кандидатської дисертації.</p> <p>Монографія.</p> <p>Анотований звіт.</p> <p>Заключний звіт.</p>	<p>твелів, що враховує ймовірність деформаційного руйнування оболонок твелів та вимоги з економічності їх експлуатації;</p> <p>Метод управління властивостями твелів, що враховує ймовірність деформаційного руйнування оболонок твелів, баланс безпеки та економічності експлуатації твелів.</p> <p>2 публікації у журналі Scopus.</p> <p>2 публікації у журналах, що включені до переліку наукових фахових видань України.</p> <p>2 публікації у матеріалах конференцій</p> <p>11 навчальних посібників без грифу МОН України.</p> <p>Захищено 2 магістерські роботи.</p> <p>Захищено 2 кандидатські дисертації.</p> <p>Підписаний контракт на підготовку монографії у 2018 р.</p> <p>Анотований звіт.</p> <p>Заключний звіт.</p>
-------------	------------------	---	---

3.2. На основі розробленої моделі зміни ймовірності деформаційного руйнування оболонки твела за нормальних умов експлуатації ВВЕР-1000 був запропонований метод оцінки пошкодження оболонок твелів з врахуванням неоднорідності розподілу енерговиділення серед твелів ТВЗ ВВЕР-1000 (метод прогнозування розгерметизації оболонок твелів ВВЕР-1000), який дозволив вперше оцінити вплив неоднорідності

розподілу енерговиділення серед твелів на ймовірність деформаційного руйнування оболонок ВВЕР-1000. Вперше доведено, що величина деформаційного пошкодження оболонок твелів ВВЕР-1000 відіграє значну обмежуючу роль при розрахунковій оцінці граничного стану твела, оскільки раніше вважалося загальноприйнятим, що контроль неперевищення гранично допустимих величин для тангенціального і еквівалентного напружень в оболонках твелів є головним методом при оцінці граничного стану оболонок. Вперше запропоновані умова допустимості алгоритму перестановок ТВС і критерій мінімальності ймовірності розгерметизації твелів за механізмом накопичення деформаційного пошкодження оболонок, які рекомендовані до використання в автоматизованій системі забезпечення герметичності оболонок твелів при експлуатації реактора типу ВВЕР.

Отримала подальший розвиток багатозонна модель реактора, що дало можливість враховувати виділення енергії не тільки від U-235, а й Pu-239 в кожному з десяти шарів активної зони реактора. До існуючої математичної моделі реактора додано моделі аксіального офсету як кількісної міри сталості реактора, глибини вигорання палива як міри ефективності експлуатації та пошкодження оболонок твелів як міри безпеки експлуатації, що дозволило провести моделювання експлуатації ЯЕУ з ВВЕР-1000 й отримати необхідні дані для розв'язку задачі оптимізації. Запропоновано моделювання експлуатації ЯЕУ з ВВЕР-1000 на основі вдосконаленої математичної моделі, яка включає синтезовану цільову функцію, що враховує такі критерії, як глибина вигорання палива, пошкодження паливної оболонки та аксіальний офсет. Ця цільова функція дозволяє знайти рішення задачі оптимізації перемикання статичних програм регулювання потужності ЯЕУ з ВВЕР-1000, отже утримувати відхилення значень основних технологічних параметрів реактора в зоні допустимих величин, що дозволяє безударно перемикати статичні програми на рівні 80 % потужності ЯЕУ. Використання запропонованого методу управління властивостями твелів значно поліпшує конкурентоспроможність АЕС серед інших джерел вироблення електричної енергії в Україні.

3.3. За допомогою програмних продуктів «Імітатор Реактору» і «Femaxi» проведено верифікацію показників надійності ( $\omega$ ) і економічності ( $B$ ) експлуатації ЯЕУ з ВВЕР-1000 з даними, отриманими в MATLAB Simulink. Відносна похибка отриманих даних в різних програмних засобах не перевищує 2,3 %, що дає можливість стверджувати про адекватність вдосконаленої математичної моделі ЯЕУ з ВВЕР-1000. Наукові результати є обґрунтованими, оскільки вони засновані на експериментально верифікованому енергетичному варіанті теорії повзучості (ЕВТП). Розроблений метод прогнозування розгерметизації оболонок твелів ВВЕР-1000 за механізмом накопичення деформаційних пошкоджень в оболонках, які характеризуються параметром пошкодження оболонок  $\omega(\tau)$ , що враховує для кожної ТВЗ історію її навантаження та розподіл  $\omega(\tau)$  серед твелів, потребує подальшого розвитку шляхом його верифікації у рамках міжнародного проекту SCIP-III (Studsvik Cladding Integrity Project). Ця робота планується та виконується за підтримки Шведської агенції з радіаційної безпеки (Swedish Radiation Safety Authority, SSM), у кооперації з науково-педагогічними закладами Європейського Союзу.

3.4. На сьогоднішній день для реакторів ВВЕР-1000 причина розгерметизації оболонок твелів, як правило, достовірно не відома [1–2], а наявна на АЕС з ВВЕР-1000 система контролю герметичності оболонок твелів шляхом епізодичного радіохімічного аналізу проб води 1-го контуру не дозволяє аналізувати умови розгерметизації твелів [3]. Очевидна суперечність між нормативними документами і практикою експлуатації ВВЕР-1000: контроль ймовірності розгерметизації оболонок твелів необхідний, проте статистики локалізації негерметичних ділянок оболонок не ведеться. У цьому зв'язку вперше розроблений метод прогнозування розгерметизації оболонок твелів за механізмом накопичення параметра деформаційної пошкоженості за нормальних умов експлуатації ВВЕР-1000, включаючи змінні режими навантаження ЯЕУ, з врахуванням неоднорідності

розподілу енерговиділення серед твेलів в ТВЗ, не має аналогів у світі і має великі перспективи для практичного впровадження на АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000 [3].

#### 4. ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1. Розроблені метод розрахунку ймовірності деформаційного руйнування оболонок твелів з врахуванням неоднорідності розподілу енерговиділення серед твелів в ТВЗ, за нормальних умов експлуатації ВВЕР-1000, включаючи змінні режими навантаження ЯЕУ, а також метод управління властивостями твелів для оптимізації перемикачів статичних програм регулювання потужності ЯЕУ з ВВЕР-1000 даватимуть змогу значно зменшити ймовірність руйнування оболонок шляхом управління властивостями твелів ВВЕР-1000 шляхом розробки автоматизованої системи забезпечення герметичності оболонок твелів. Це дозволить підвищити якість електроенергії в об'єднаній енергосистемі України та інтегрувати її в об'єднану енергосистему Європи.

4.2. Отримані результати мають велику цінність для підготовки фахівців з таких галузей знань:

— Енергетика і енергетичне машинобудування за фахом «Атомна енергетика та технологія теплоносіїв та поводження з радіоактивними відходами на атомних електростанціях»;

— Автоматика і управління за фахом «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізації «Автоматизоване управління технологічними процесами» та «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва».

При підготовці кандидатів та докторів наук зі спеціальностей:

— Теплові та ядерні енергоустановки;

— Автоматизація процесів керування.

При розробці та впровадженні нових циклів лабораторних робіт та лекційних курсів в навчальному процесі кафедри АТП (КТА) ОНПУ з дисциплін:

— Фізика ядерно-фізичних процесів;

— Фізичні основи типових об'єктів енергетики;

— Системний аналіз;

— Об'єктно орієнтований аналіз;

— Моделювання процесів і систем;

— Нестационарні процеси і регулювання ЯЕУ;

— Структурна оптимізація обладнання АСУ ТП.

Теми досліджень студентів, аспірантів і докторантів, кількість місяців їх роботи за темою з оплатою наведені у Додатку 2.

#### 5. ОСНОВНІ ПОКАЗНИКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗА ТЕМОЮ

5.1.

Таблиця 2

№	Повні дані про статті з веб-адресою електронної версії; <u>підкреслити прізвища авторів</u> , які належать до списку виконавців	Наукометр. база даних
1	<u>Максимов, М.В.</u> Способ управления ядерной установкой с ВВЭР-1000 в маневренном режиме / <u>М.В. Максимов, Т.А. Цисельская, Е.А. Кокол</u> // Проблемы управления и информатики. – 2015. – № 3. – С. 59-74. <a href="http://inform.icybcluster.org.ua/zhurnal-3-2.html#more-869">http://inform.icybcluster.org.ua/zhurnal-3-2.html#more-869</a>	Scopus
2	<u>Пелих, С. М.</u> Аналіз пошкоджуваності оболонок твелів, що враховує неоднорідність розподілу енерговиділення в тепловиділяючих збірках / <u>С. М. Пелих, М. В. Максимов, С.Д. Рябчиков</u> // Ядерна фізика та енергетика. – 2016. – Т. 17, № 1. – С. 27–37. <a href="http://jnprae.kinr.kiev.ua/17.1/Articles_PDF/jnprae-2016-17-0027-">http://jnprae.kinr.kiev.ua/17.1/Articles_PDF/jnprae-2016-17-0027-</a>	Scopus

	<a href="#">Pelykh.pdf</a>	
3	<u>Pelykh, S.N.</u> The prediction problems of VVER fuel element cladding failure theory / <u>S.N. Pelykh</u> , <u>M.V. Maksimov</u> , <u>S.D. Ryabchikov</u> // Nuclear Engineering and Design. – 2016. – Vol. 302, Part A, (June). – P. 46–55. <a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549316300231">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549316300231</a>	Scopus
4	<u>Kokol, E.</u> Research on manoeuvring capabilities of a nuclear power plant when switching in-use control programmes / <u>E. Kokol</u> // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 2, Iss. 8 (80). – P. 4-13. <a href="http://journals.uran.ua/eejet/issue/view/4037">http://journals.uran.ua/eejet/issue/view/4037</a>	Scopus
5	<u>Zhou, H.</u> An improved method for automated control of the WWER-1000 power maneuvering / <u>H. Zhou</u> , <u>S.N. Pelykh</u> , <u>T.V. Foshch</u> , <u>O.B. Maksymova</u> // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. – 2017. – Iss. 5(111). – P. 57–64. <a href="http://vant.kipt.kharkov.ua/TABFRAME.html">http://vant.kipt.kharkov.ua/TABFRAME.html</a>	Scopus
6	<u>Foshch, T.</u> Automated control models and methods of power change at the power unit of NPP with VVER-1000 / <u>T. Foshch</u> , <u>M. Maksimov</u> , <u>S. Pelykh</u> , <u>O. Maksimova</u> // Nuclear and Radiation Safety. – 2017. – Iss. 4. <a href="http://www.sstc.com.ua/journal/ru">http://www.sstc.com.ua/journal/ru</a>	Scopus

Анотації статей українською мовою, які представляють основні результати дослідження, наведені у Додатку 3

5.2. —

5.3.

Таблиця 4

№	Повні дані про статті з веб-адресою електронної версії, або вихідні дані про охоронні документи; <u>підкреслити прізвища авторів</u> , які належать до списку виконавців
1	<u>Никольский, М. В.</u> Аксиальный офсет как мера устойчивости легководного ядерного реактора при маневрировании мощностью / <u>М.В. Никольский</u> // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2015. – Вып. 1 (45). – С. 58–65. <a href="http://www.pratsi.opu.ua/app/webroot/articles/1428476242.pdf">www.pratsi.opu.ua/app/webroot/articles/1428476242.pdf</a>
2	<u>Pelykh, S.N.</u> Search for the best power control program at NPP with VVER-1000 using gradient descent method / <u>S.N. Pelykh</u> , <u>E.O. Odrehovska</u> , <u>O.B. Maksymova</u> // Automation of technological and business-process. – 2016. – Vol. 8, Iss. 3. – P. 36–40. <a href="http://www.journal-atbp.com/art/27/%D1%F2%E0%F2%FC%FF%204~SEARCH%20FOR%20THE%20BEST%20POWER%20CONTROL%20PROGRAM%20AT%20NPP%20WITH%20VVER-1000%20USING%20GRADIENT%20DESCENT%20METHOD~Pelykh%20S.N.%2C%20Odrehovska%20E.A.%2C%20Maksymova%20O.B.~%D1%F2%E0%F2%FC%FF%204.pdf">http://www.journal-atbp.com/art/27/%D1%F2%E0%F2%FC%FF%204~SEARCH%20FOR%20THE%20BEST%20POWER%20CONTROL%20PROGRAM%20AT%20NPP%20WITH%20VVER-1000%20USING%20GRADIENT%20DESCENT%20METHOD~Pelykh%20S.N.%2C%20Odrehovska%20E.A.%2C%20Maksymova%20O.B.~%D1%F2%E0%F2%FC%FF%204.pdf</a>
3	<u>Стефаник, В.М.</u> Компьютерно-интегрированная система управления перестановками ТВС в АКЗ ВВЭР-1000 с учетом поврежденности оболочек твэлов / <u>В.М. Стефаник</u> // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – 2016. – Т. 8, № 1. – С. 83–89. <a href="http://www.journal-atbp.com/journals/ATBP_mart_2016.pdf">http://www.journal-atbp.com/journals/ATBP_mart_2016.pdf</a>
4	<u>Foshch, T.</u> Regression Models of the Nuclear Power Unit VVER-1000 Using Data Mining Techniques / <u>T. Foshch</u> , <u>F. Portela</u> , <u>J. Machado</u> , <u>M. Maksimov</u> // Procedia Computer Science. – 2016. – Vol. 100. – С. 253–262. <a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050916323195">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050916323195</a>
5	<u>Pelykh, S.N.</u> The problem of minimizing the radioactive leakage into the VVER circuit under normal conditions / <u>S. N. Pelykh</u> , <u>M.A. Frolov</u> , <u>A.V. Nalyvayko</u> , <u>H. Zhou</u> // Odes'kyi Natsional'nyi Politechnichniy Universytet. Pratsi. – 2017. – Iss. 2(52). – P. 39–44. <a href="http://pratsi.opu.ua/articles/show/11686">http://pratsi.opu.ua/articles/show/11686</a>



6	<u>Foshch, T.</u> Improved models and method of power change of NPP unit with VVER-1000 / <u>T. Foshch, S. Pelykh</u> // Automation of technological and business-processes. – 2017. – Vol. 9, Iss. 1. – P. 56-66. <a href="http://www.oaji.net/pdf.html?n=2017/1004-1493794682.pdf">www.oaji.net/pdf.html?n=2017/1004-1493794682.pdf</a>
7	<u>Пелых, С.Н.</u> Метод минимизации вероятности накопления поврежденности оболочек твэлов ВВЭР-1000 с учетом неравномерности энерговыделения в ТВС / <u>С. Н. Пелых, М. В. Максимов, М.В. Никольский, С.Д. Рябчиков</u> // Тезисы докладов XXII ежегодной науч. конф. Ин-та ядерных исследований НАН Украины, 26–30 января 2015 г. – К.: Ин-т ядерных исследований НАН Украины, 2015. – С. 106. <a href="http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2015/abstracts.html">http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2015/abstracts.html</a>
8	<u>Цисельская, Т. А.</u> Анализ устойчивости энергоблока с ВВЭР-1000 при маневрировании мощностью в различных режимах эксплуатации / <u>Т. А. Цисельская, М. В. Никольский</u> // Матеріали 22-ої Міжнар. конф. з автоматичного управління «Автоматика 2015», Одеса, 10-11 вересня 2015 р. - С. 287 – 288. <a href="http://www.dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/2212/1/111-112.pdf">www.dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/2212/1/111-112.pdf</a>
9	<u>Фощ, Т.В.</u> Модель распределения энерговыделения в КИСУ ВВЭР-1000 / <u>Т. В. Фощ</u> // Автоматика – 2015 : матеріали XX II міжнар. конф. з автомат. упр. - Одеса : ОНПУ, 2015. – С. 121-122. <a href="http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/5354">http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/5354</a>
10	<u>Фощ, Т.В.</u> Упрощенная модель энерговыделения в многоточечной модели ВВЭР-1000 / <u>Т. В. Фощ</u> // I Всеукраїнська науково-технічна конференція «Автоматизація, контроль та управління: пошук ідей та рішень». – 2015 – С. 383 – 384. <a href="http://donntu.edu.ua/praciv/aku-2015.html">http://donntu.edu.ua/praciv/aku-2015.html</a>
11	<u>Пелых, С.Н.</u> Метод прогнозирования разгерметизации твэлов ВВЭР с учетом распределения энерговыделения в ТВС / <u>С.Н. Пелых, М. В. Максимов</u> // Тезисы докладов XXIII ежегодной науч. конф. Ин-та ядерных исследований НАН Украины 01 - 05 февраля 2016 г. – К.: Ин-т ядерных исследований НАН Украины, 2016. – С. 103–104. <a href="http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2016/abstracts.html">http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2016/abstracts.html</a>
12	<u>Пелых, С.Н.</u> Метод прогнозирования разгерметизации твэлов ВВЭР с учетом распределения энерговыделения в ТВС / <u>С.Н. Пелых, М. В. Максимов</u> // Тезисы докладов XXIII ежегодной науч. конф. Ин-та ядерных исследований НАН Украины 01 - 05 февраля 2016 г. – К.: Ин-т ядерных исследований НАН Украины, 2016. – С. 103–104. <a href="http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2016/pdf/book%20of%20abstracts.pdf">http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2016/pdf/book%20of%20abstracts.pdf</a>
13	<u>Pelykh, S.</u> Improvement of PWR safety by means of improved controlling the fuel cladding fracture due to damage accumulation / <u>S. Pelykh</u> // The 2nd UNI-SET Energy Clustering Event: Universities in the Energy Transition: Focus on Energy Efficient Systems and Nuclear Safety 26-28.09.2016. –Turin: the Politecnico di Torino, Italy, 2016. <a href="http://www.eua.be/activities-services/events/event/2016/09/26/default-calendar/2nd-uni-set-energy-clustering-event?tab=presentations">http://www.eua.be/activities-services/events/event/2016/09/26/default-calendar/2nd-uni-set-energy-clustering-event?tab=presentations</a>
14	<u>Pelykh, S.</u> Minimizing the radioactive leakage into the reactor circuit under extreme conditions of normal operation / <u>S. Pelykh, H. Zhou, M. Maksymov</u> // European Commission funded International Workshop “Materials resistant to extreme conditions for future energy systems”, 12-14 June 2017. – Kyiv: Ukraine, Book of Abstracts, 2017. – P. 84. <a href="http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC106748/kjna28632enn.pdf">http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC106748/kjna28632enn.pdf</a>
15	<u>Фощ, Т.В.</u> Усовершенствованный метод автоматического управления мощностью энергоблоком ЯЭУ с ВВЭР-1000 / <u>Т.В. Фощ, Х. Чжоу, С.Н. Пелых</u> // XXIV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. - Київ: Ін-т ядерних дослідж. - 2017. - С. 131. <a href="http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2017/">http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2017/</a>

16	Пат. України на винахід № 111549, МПК G21C17/035. Спосіб визначення рівня теплоносія в ядерному реакторі і система для його здійснення / <u>Максимов М.В., Кокол Є.О.</u> ; заявник та патентовласник <u>Максимов М.В., Кокол Є.О.</u> – № а201501081; заявл. 10.02.2015; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 9. <a href="http://uapatents.com/7-111549-sposib-viznachennya-rivnya-teplonosiya-v-yadernomu-reaktori-i-sistema-dlya-jjogo-zdijsnennya.html">http://uapatents.com/7-111549-sposib-viznachennya-rivnya-teplonosiya-v-yadernomu-reaktori-i-sistema-dlya-jjogo-zdijsnennya.html</a>
17	Пат. Росії на изобретение № 2602813, МПК G21C17/035. Способ определения уровня теплоносителя в ядерном реакторе и система для его осуществления / <u>Максимов М.В., Кокол Е.А.</u> ; заявитель и патентообладатель <u>Максимов М.В., Кокол Е.А.</u> <a href="http://www.findpatent.ru/patent/260/2602813.html">http://www.findpatent.ru/patent/260/2602813.html</a>

5.4. Опублікованих за темою монографій немає, але 21.11.2017 р. Пелихом С.М. був підписаний контракт з видавництвом “Cambridge Scholars Publishing” (Велика Британія) на підготовку монографії з оптимізації ядерного палива у 2018 р. Назва монографії: «The change of paradigm in nuclear fuel optimization: from conservatism to synergy».

5.5. Перелік опублікованих за темою проекту підручників, навчальних посібників, словників, довідників

Таблиця 6

№	Повні дані про підручники, навчальні посібники, словники, довідників; <u>підкреслити прізвища авторів, які належать до списку виконавців</u>
1	Методичні вказівки «Моделювання теплоенергетичних систем» по курсам «Моделювання теплоенергетичних систем з розподіленими параметрами» та «Моделювання стохастичних систем» для студ. напряму 6.050202 «Автоматизація І комп'ютерно-інтегровані технології» ден. та заоч. форм навчання, код МВ06377, зареєстровано 27.04.2015 / Уклад.: <u>С.М. Пелих</u> — Одеса: ОНПУ, 2015.—27 с.
2	Методичні вказівки «Основи ядерної та нейтронної фізики» по курсу «Фізика ядерно-фізичних процесів» для студ. напряму 6.050202 «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» ден. та заоч. форм навч., код МВ06381, зареєстровано 28.04.2015 / Уклад.: <u>С.М. Пелих</u> — Одеса: ОНПУ, 2015.— 14 с.
3	Конспект лекцій з дисципліни «Системний аналіз»: для студ. напряму 6.050202 "Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології" ден. та заоч. форм навч., код КЛ06662, зареєстровано 03.11.2015 / Уклад.: <u>С. М. Пелих.</u> – Одеса: ОНПУ, 2015. - 29 с.
4	Конспект лекцій з дисципліни "Фізика ядерно-фізичних процесів": для студ. напряму 6.050202 "Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології" ден. та заоч. форм навч., код КЛ06663, зареєстровано 03.11.2015 / Уклад.: <u>С. М. Пелих.</u> - Одеса: ОНПУ, 2015. - 74 с.
5	Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Фізика ядерно-фізичних процесів» для студ. напряму 6.050202 «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» ден. та заоч. форм навч., код МВ06885, зареєстровано 06.04.2016 / Уклад.: <u>С.М. Пелих.</u> – Одеса: ОНПУ, 2016. – 12 с.
6	Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з дисципліни «Фізика ядерно-фізичних процесів» для студ. напряму 6.050202 «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» ден. та заоч. форм навч., код МВ06886, зареєстровано 27.01.2016 / Уклад.: <u>С. М. Пелих.</u> – Одеса: ОНПУ, 2016. – 11 с.
7	Конспект лекцій з дисципліни «Моделювання теплоенергетичних систем з розподіленими параметрами»: для студ. спеціальності 8.05020201 «Автоматизоване управління технологічними процесами» ден. та заоч. форм навч., код КЛ07075, зареєстровано 03.03.2016 / Уклад.: <u>С.М. Пелих.</u> – Одеса: ОНПУ, 2016. – 40 с.

8	Конспект лекцій з дисципліни «Моделювання стохастичних систем»: для студ. спеціальності 8.05020202 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва» ден. та заоч. форм навч., код КЛ07076, зареєстровано 03.03.2016 / Уклад.: <u>С.М. Пелих</u> . – Одеса: ОНПУ, 2016. – 40 с.
9	Конспект лекцій з дисципліни «Системний аналіз та моделювання теплоенергетичних систем»: для аспір. напряму 6.050202 «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» ден. форми навч. / Уклад.: <u>С.М. Пелих</u> . – Одеса: ОНПУ, 2016. – 102 с.
10	Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Системний аналіз та моделювання теплоенергетичних систем»: для аспір. напряму 6.050202 «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» ден. форми навч. / Уклад.: С. М. Пелих. – Одеса: ОНПУ, 2016. – 19 с.
11	Методичні вказівки до самостійної роботи аспірантів з дисципліни «Системний аналіз та моделювання теплоенергетичних систем»: для аспір. напряму 6.050202 «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» ден. форми навч. / Уклад.: <u>С.М. Пелих</u> . – Одеса: ОНПУ, 2016. – 22 с.
12	Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з дисципліни «Системний аналіз»: для магістрантів спец. 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» ден. форми навч. / Уклад.: <u>С.М. Пелих</u> . – Одеса: ОНПУ, 2017. – 13 с.- № 4486-РС-2017.
13	Методичні вказівки до лабораторних занять з дисципліни «Системний аналіз»: для магістрантів спец. 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» ден. форми навч. / Уклад.: <u>С.М. Пелих</u> . – Одеса: ОНПУ, 2017. – 7 с. - № 4482-РС-2017.
14	Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з дисципліни «Моделювання теплоенергетичних систем з розподіленими параметрами»: для магістрантів спец. 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» ден. форми навч. / Уклад.: <u>С.М. Пелих</u> . – Одеса: ОНПУ, 2017. – 11 с. № 4484-РС-2017.
15	Методичні вказівки до лабораторних занять з дисципліни «Моделювання теплоенергетичних систем з розподіленими параметрами»: для магістрантів спец. 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» ден. форми навч. / Уклад.: С. М. Пелих. – Одеса: ОНПУ, 2017. – 11 с. № 4480-РС-2017.
16	Методичні вказівки по виконанню РГР з дисципліни «Моделювання теплоенергетичних систем з розподіленими параметрами»: для магістрантів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» ден. форми навч. / Уклад.: <u>С.М. Пелих</u> . – Одеса: ОНПУ, 2017. – 16 с. - № 4488-РС-2017.
17	Конспект лекцій з дисципліни «Об'єктно-орієнтований аналіз»: для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Уклад.: <u>С.М. Пелих</u> . – Одеса: ОНПУ, 2017. – 28 с. - № 4478-РС-2017.
18	Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з дисципліни «Об'єктно-орієнтований аналіз»: для магістрантів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» ден. форми навч. / Уклад.: <u>С.М. Пелих</u> . – Одеса: ОНПУ, 2017. – 12 с. - № 4485-РС-2017.
19	Методичні вказівки до лабораторних занять з дисципліни «Об'єктно-орієнтований аналіз»: для магістрантів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» ден. форми навч. / Уклад.: <u>С.М. Пелих</u> . – Одеса: ОНПУ, 2017. – 7 с. № 4481-РС-2017.
20	Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з дисципліни «Моделювання стохастичних систем»: для магістрантів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» ден. форми навч. / Уклад.: <u>С.М. Пелих</u> . – Одеса: ОНПУ, 2017. – 11 с. - № 4483-РС-2017.

21	Методичні вказівки до лабораторних занять з дисципліни «Моделювання стохастичних систем»: для магістрантів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» ден. форми навч. / Уклад.: <u>С.М. Пелих</u> . – Одеса: ОНПУ, 2017. – 10 с. - № 4479-РС-2017.
22	Методичні вказівки по виконанню РГР з дисципліни «Моделювання стохастичних систем»: для магістрантів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» ден. форми навч. / Уклад.: <u>С.М. Пелих</u> . – Одеса: ОНПУ, 2017. – 14 с. - № 4487-РС-2017.

5.6. Перелік захищених докторських і кандидатських (доктора філософії) дисертацій виконавцями проекту.

Таблиця 7

№	Повні дані про дисертації
1	Гонтарь, Р. Л. Технологические основы автоматизированного управления свойствами ядерного топлива АЭС с ВВЭР-1000: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук по спец. 05.14.14 “Тепловые и ядерные энергоустановки” / Р. Л. Гонтарь. – Одесса, 2015. – 114 с.
2	Нікольський, М. В. Вдосконалення методів моделювання пошкодження оболонки паливного елемента ЯЕУ з ВВЕР для підвищення ефективності експлуатації: дис. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спец. 05.14.14 “Теплові та ядерні энергоустановки ” / М. В. Нікольський. – Одеса, 2016. – 131 с.
3	Фощ, Т.В. Методи та моделі автоматичного керування зміною потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000: дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук за спец. 05.13.07 “Автоматизація процесів керування”/ Т.В. Фощ.– Одеса, 2017.– 122 с.
4	Одреховська, Є.О. Оптимізація перемикання статичних програм регулювання потужності ЯЕУ з ВВЕР-1000 в перехідних режимах експлуатації: дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук за спец. 05.13.07 “Автоматизація процесів керування” / Є.О. Одреховська. – Одеса, 2017. – 161 с.

Анотації дисертацій наведені у Додатку 5

5.7. Кількість грантів, за якими працювали виконавці, що фінансувались закордонними організаціями.

Таблиця 8

№	ПІБ виконавців	Назва гранту	Фінансування, тис. грн
1	Фощ Т.В.	Грант на навчання за програмою академічного обміну ERASMUS MINDUS ELECTRA протягом двох академічних семестрів (2015–2016 р.).	120,000
2	Пелих С.М.	Грант Шведської агенції з радіаційної безпеки на участь у навчальному курсі «ARCHER EURO COURSE», 19–20 січня 2015 р., м. Петтен, Нідерланди, під егідою університету м. Штутгарт, Німеччина.	30,000
3	Максимов М.В., Пелих С.М.	Грант Шведської агенції з радіаційної безпеки на здійснення академічного візиту до науково-педагогічних закладів Швеції та Норвегії, 4–8 грудня 2016 р.	60,000
4	Максимов М.В., Пелих С.М.	Грант Шведської агенції з радіаційної безпеки на участь у навчальному курсі "Fermi Course: Leading a Nuclear Business", 29-30 травня 2017 р., м. Уппсала, Швеція, під	60,000

		егідою Європейської асоціації з ядерної освіти (ENEN).	
5	Пелих С.М.	Грант Європейської комісії на участь у міжнародній конференції «Materials resistant to extreme conditions for future energy systems», 12–14 червня 2017 р., м. Київ, НАН України.	15,000
6	Пелих С.М., Максимов М.В.	Грант Шведської агенції з радіаційної безпеки на участь у науковому семінарі Європейського проекту SCIP-III (Studsvik Cladding Integrity Project), 28-30 листопада 2017 р., м. Студзвік, Швеція.	60,000

Короткий зміст досліджень за грантами наведений у Додатку 6

## 6. ВИКОНАВЦІ ПРОЕКТУ

- доктори наук: 2; кандидати наук: 5;
- молоді вчені до 35 років: 5, з них кандидатів наук: 5;
- наукові працівники без ступеня: —;
- інженерно-технічні кадри: —, допоміжний персонал: —;
- студенти: 3.

Р а з о м : 10.

Таблиця 9

### Виконавці проекту\* (з оплатою в межах запиту)

№	Прізвище, ім'я, по батькові	Науковий ступінь	Вчене звання	Посада і місце основної роботи	Вік
1	Максимов Максим Віталійович	д.т.н.	проф.	головний науковий співробітник, завідувач кафедри АТП (КТА) ОНПУ	9.06.1964
2	Пелих Сергій Миколайович	д.т.н.	с.н.с.	провідний науковий співробітник, професор кафедри АТП (КТА) ОНПУ	8.11.1968
3	Нікольський Марк Віталійович	к.т.н.	-	старший науковий співробітник, ОНПУ	22.08.1990
4	Гонтар Роман Леонідович	к.т.н.	-	старший науковий співробітник, ОНПУ	19.06.86
5	Цисельська (Войтецька) Таїсія Олександрівна	к.т.н.	-	старший науковий співробітник, ОНПУ	11.02.1987
6	Фоц Тимур Віталійович	к.т.н.	-	молодший науковий співробітник, ОНПУ	12.06.1988
7	Кокол (Одреховська) Євгенія Олександрівна	к.т.н.	-	молодший науковий співробітник, ОНПУ	29.12.1991

\*вносяться дані про всіх виконавців за весь час виконання робіт, окрім допоміжного персоналу та студентів

**Рішення вченої (наукової, науково-технічної) ради від 04.01.2018р. протокол № 1 щодо завершення роботи**

Керівник роботи

ПІБ: Максимов М.В.

Підпис, дата: \_\_\_\_\_

Проректор

ПІБ: Дмитришин Д.В.

Підпис, дата: \_\_\_\_\_

МП

**Додаток 1.** Список основних публікацій закордонних та вітчизняних вчених, на які посилаються автори роботи для доведення наукової новизни власних результатів

№	Повні дані про статті
1	Nuclear fuel safety criteria technical review. Second edition. // OECD NEA No. 7072.– Issy-les-Moulineaux: Nuclear Energy Agency, 2012. – 83 p.
2	Review of fuel failures in water cooled reactors // IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-2.1.– Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. – 191 p.
3	Pelykh, S.N. The prediction problems of VVER fuel element cladding failure theory / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov, S.D. Ryabchikov // Nuclear Engineering and Design. – 2016. –Vol. 302, Part A, (June). – P. 46–55.

**Додаток 2.** Дані про магістрантів (студентів), аспірантів і докторантів, які працювали за темою з оплатою праці

№ з/п	ПІБ	Статус	Назва теми досліджень	Кількість місяців їх роботи за темою з оплатою
1	Гонтар Р.Л.	Аспірант	Технологічні основи автоматизованого керування властивостями ядерного палива АЕС з ВВЕР-1000.	12
2	Фощ Т.В.	Аспірант	Моделі і методи автоматизованого управління зміною потужності енергоблоку ЯЕУ з ВВЕР-1000	12
3	Кокол Є.О. (Одреховська)	Аспірант	Оптимізація перемикання статичних програм регулювання потужності ЯЕУ з ВВЕР-1000 в перехідних режимах експлуатації	12
4	Нікольський М.В.	Аспірант	Вдосконалення методів моделювання пошкодження оболонки паливного елемента ЯЕУ з ВВЕР для підвищення ефективності експлуатації	12
5	Стефанік В.М.	Магістрант	Дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи управління ректором ВВЕР-1000 з мінімізацією вірогідності пошкодження оболонок твелів	1
6	Наливайко А.В.	Магістрант	Розробка та дослідження автоматизованої системи управління перестановками тепловиділяючих збірок ВВЕР-1000 з врахуванням параметра деформаційного пошкодження оболонок твелів (2017)	1
7	Фролов М.О.	Магістрант	Розробка та дослідження автоматизованої системи управління режимом навантаження реакторної установки з ВВЕР-1000 з врахуванням параметра деформаційного пошкодження оболонок твелів (2017)	1

Додаток 3. Анотації українською мовою статей, що наведені у Таблиці 2

№ з/п	Назви статей та їх анотації
1	<p><u>Максимов, М.В.</u> Способ управления ядерной установкой с ВВЭР-1000 в маневренном режиме / <u>М.В. Максимов, Т.А. Цисельская, Е.А. Кокол</u> // Проблемы управления и информатики. – 2015. – № 3. – С. 59-74.</p> <p>Вимоги, що пред'являються при експлуатації енергоблоку в маневреному режимі, - висока надійність і безпеку енергоблоку, які залежать від стійкості реактора при переході з одного рівня потужності на інший. Кількісною мірою стійкості реактора є аксіальний офсет. Показано, що зміна температури на вході в активну зону реактора завдає неконтрольоване обурення, яке впливає на осьовий офсет і, як наслідок, на стійкість реактора. Розроблено вдосконалена автоматизована система регулювання потужності енергоблоку, особливістю якої є три нових контури регулювання; їх використання забезпечує стійкість реактора під час маневрування потужністю енергоблоку протягом доби.</p>
2	<p><u>Пелих, С.М.</u> Аналіз пошкоджуваності оболонок твелів, що враховує неоднорідність розподілу енерговиділення в тепловиділяючих збірках / <u>С.М. Пелих, М.В. Максимов, С.Д. Рябчиков</u> // Ядерна фізика та енергетика. – 2016. – Т. 17, № 1. – С. 27–37.</p> <p>Розроблено метод прогнозування розгерметизації оболонок твелів реактора типу ВВЕР-1000 за механізмом накопичення деформаційної пошкоджуваності оболонок, що враховує для кожної ТВЗ історію навантаження і неоднорідність розподілу енерговиділення серед твелів. При чотирьох груповій моделі розподілу пошкоджуваності максимальна величина пошкоджуваності, що досягається в чотирирічному паливному циклі, збільшується в порівнянні з одно груповою моделлю приблизно в два рази. Знайдений алгоритм перестановок ТВЗ, для якого перевищуються гранична величина параметра пошкоджуваності і межа безпечної експлуатації реактора. Показано, що величина параметра пошкоджуваності відіграє істотну обмежуючу роль при оцінці граничного стану оболонок. Виведено умову допустимості алгоритму перестановок ТВЗ і критерій мінімальності ймовірності розгерметизації оболонок, які можна використовувати в автоматизованій системі забезпечення герметичності оболонок твелів ВВЕР-1000.</p>
3	<p><u>Pelykh, S.N.</u> The prediction problems of VVER fuel element cladding failure theory / <u>S.N. Pelykh, M.V. Maksimov, S.D. Ryabchikov</u> // Nuclear Engineering and Design. – 2016. – Vol. 302, Part A, (June). – P. 46–55.</p> <p>Розроблено метод розрахункового визначення розгерметизації оболонок твелів ВВЕР внаслідок збільшення параметра деформаційної пошкодженості оболонок, беручи до уваги історію навантаження кожної ТВЗ і розподіл параметра пошкодження серед твелів ТВЗ. Використовуючи концепцію консервативних груп твелів, доведено, що межа безпеки для параметра пошкодження перевищується тоді, коли межі для тангенціального і еквівалентного напруг не досягаються. Цей новий результат суперечить широко поширеному уявленню, що параметр пошкодження не відіграє значної ролі при оцінці граничного стану оболонки. Отримані необхідна умова допустимості алгоритму перестановок ТВЗ і критерій мінімальності ймовірності розгерметизації оболонок через накопичення пошкодженості, – для використання в автоматизованій системі контролю герметичності оболонок твелів ВВЕР-1000.</p>
4	<p><u>Kokol, E.</u> Research on manoeuvring capabilities of a nuclear power plant when switching in-use control programmes / <u>E. Kokol</u> // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 2, Iss. 8 (80). – P. 4-13.</p> <p>Досліджено можливість вибору каналу регулювання ядерної енергоустановки з водояним енергетичним реактором при маневруванні потужністю відповідно до</p>

	добового графіка навантажень енергосистеми під час її експлуатації. Встановлено, що реакторна установка знаходиться у стійкому стані не тільки при нанесенні такого збурення, як зниження або збільшення потужності, але і при перемиканні програми регулювання.
5	<p>Zhou, H. An improved method for automated control of the WWER-1000 power maneuvering / H. Zhou, <u>S.N. Pelykh</u>, <u>T.V. Foshch</u>, O.B. Maksymova // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. – 2017. – Iss. 5(111). – P. 57–64.</p> <p>Багатозонна математична модель процесів в активній зоні (АКЗ) реактора типу ВВЕР-1000, розроблена для автоматизованого управління зміною потужності реактора, вдосконалена за рахунок обліку енерговиділення при розподілі не тільки ядер U-235, а й Pu-239, а також шляхом застосування одночасних дій, що управляють по каналах зміни концентрації розчину борної кислоти в теплоносії 1-го контуру і положення керуючих стрижнів системи управління та захисту реактора. Запропонована розподілена модель процесів в АКЗ, яка дозволяє контролювати зміну технологічних параметрів у виділених секторах симетрії і аксіальних сегментах АКЗ, для груп ТВЗ, що відповідають рокам паливного циклу. Новий метод автоматизованого управління зміною потужності реактора типу ВВЕР-1000, заснований на застосуванні трьох контурів управління, дозволив вдосконалити дві відомі програми управління потужністю реактора.</p>
6	<p><u>Foshch, T.</u> Automated control models and methods of power change at the power unit of NPP with VVER-1000 / <u>T. Foshch</u>, <u>M. Maksimov</u>, <u>S. Pelykh</u>, O. Maksimova // Nuclear and Radiation Safety. – 2017. – Iss. 4.</p> <p>Розглянуто розробку моделей та методів керування зміною потужності ядерної енергетичної установки з ВВЕР-1000, які дають змогу отримати найбільш стабільний аксіальний офсет (АО). Вдосконалено багатозонну математичну модель реактора типу ВВЕР-1000, яка відрізняється від відомих урахуванням виділення енергії в разі поділу ядер як U-235, так і Pu-239, та включає субмодель з розподіленими параметрами. Вперше запропоновано метод автоматизованого керування зміною потужності ЯЕУ з ВВЕР-1000, в якому застосовано три контури керування, один з яких підтримує регламентну зміну потужності реактора за рахунок регулювання концентрації борної кислоти в теплоносії, другий підтримує необхідне значення АО змінням положення стрижнів СУЗ, а третій — температурний режим теплоносія регулюванням положення головних клапанів турбогенератора.</p>

**Додаток 5.** Анотації захищених кандидатських і докторських дисертацій виконавцями проекту що наведені у Таблиці 7

№ з/п	Назви дисертацій та їх анотації
1	<p>Гонтарь, Р. Л. Технологические основы автоматизированного управления свойствами ядерного топлива АЭС с ВВЭР-1000: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук по спец. 05.14.14 “Тепловые и ядерные энергоустановки” / Р. Л. Гонтарь. – Одесса, 2015. – 114 с.</p> <p>Дисертація присвячена підвищенню ефективності експлуатації РУ з ВВЕР-1000 за рахунок розробки технологічних основ автоматизованого керування властивостями ЯП при роботі РУ за будь-якого режиму. Розроблено математичну модель та метод розрахунку зміни з часом аксіальних профілів <math>\omega(\tau)</math> і глибини вигорання ЯП <math>V_U(\tau)</math> з урахуванням історії навантаження ТВЗ для визначення показників безпечності та ефективності експлуатації ядерного палива (ЯП) у змінному режимі навантаження ВВЕР-1000. Досліджено закономірності зміни аксіальних профілів ТВЗ за параметрами <math>\omega(\tau)</math> і <math>V_U(\tau)</math> з урахуванням перестановок</p>



	<p>ТВЗ в АКЗ за добовим, тижневим і комбінованим циклами – при змінному режимі навантаження ВВЕР-1000, а також при роботі в базовому режимі навантаження. Визначено АС ТВЗ з максимальними значеннями параметрів <math>\omega(\tau)</math> і <math>V_U(\tau)</math>, а саме – 6-й і 4-й АС, рахуючи від нижнього краю паливного стовпа, відповідно. Запропоновано критерій ефективності експлуатації ЯП, що дозволяє визначати алгоритми перестановок ТВЗ з мінімальними середньоквадратичними відхиленнями значень <math>V_U(\tau)</math> для п'яти АС з найбільшою величиною <math>\omega(\tau)</math>. Отримав подальший розвиток метод контролю герметичності оболонок твелів, відмітною особливістю якого є застосування коліматора детектора з кутом опромінення, що дозволяє підвищити достовірність ідентифікації негерметичних оболонок. Розроблено технологічні основи автоматизованого керування властивостями ЯП, що дозволяють впровадити методику комп'ютерно-інтегрованої оцінки придатності ЯП для подальшої експлуатації на АЕС з ВВЕР-1000, за основу якої прийнятий одночасний облік величин <math>\omega(\tau)</math> і <math>V_U(\tau)</math>. Ключові слова: автоматизоване управління, властивості, глибина вигорання, пошкодженість, модель, оболонка, змінний режим, ВВЕР, PWR, EPR, ТВЕЛ, ТВЗ.</p>
2	<p>Нікольський, М. В. Вдосконалення методів моделювання пошкодження оболонки паливного елемента ЯЕУ з ВВЕР для підвищення ефективності експлуатації: дис. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спец. 05.14.14 “Теплові та ядерні енергоустановки” / М. В. Нікольський. – Одеса, 2016. – 131 с.</p> <p>У дисертаційній роботі запропоновано нове розв’язання науково-прикладного завдання, що полягає у вдосконаленні методу моделювання пошкодження оболонки паливного елемента, який враховує ксенонові і термоциклічні коливання для підвищення ефективності експлуатації ЯЕУ при виконанні вимог безпеки. Проведено аналіз об'єкта керування, методів і моделей, що використовують при моделюванні пошкодження оболонки паливного елемента. Розроблено динамічну імітаційну модель ЯЕУ з ВВЕР із зосередженими параметрами, що складається з моделей парогенератора, турбогенератора і циркуляційного контуру, а також з багат шарової моделі реактора на базі ксенонових і термоциклічних коливань для оцінки аксіального офсету і пошкодження оболонки твела. Досліджено властивості ЯЕУ з ВВЕР-1000 на основі критерію ефективності в циклічних режимах і перехідних процесах для різних статичних програм регулювання, з притаманними їм внутрішніми збуреннями і їх впливом на аксіальний офсет і пошкодження оболонки твелів. Розроблено метод розрахунку ймовірності розгерметизації оболонок твелів в нормальних умовах експлуатації ВВЕР-1000 на основі врахування неоднорідності розподілу енерговиділення в ТВЗ і чинників, що визначають пошкодження. Проведено впровадження отриманих результатів і визначено їх ефективність. Ключові слова: динамічна модель ЯЕУ, пошкодження оболонки, аксіальний офсет, програма регулювання, ТВС, активна зона, перестановки ядерного палива.</p>
3	<p>Фоц, Т.В. Методи та моделі автоматичного керування зміною потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000: дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук за спец. 05.13.07 “Автоматизація процесів керування”/ Т.В. Фоц.– Одеса, 2017.– 122 с.</p> <p>Дисертація присвячена розробці моделей та методів управління зміною потужності ЯЕУ з ВВЕР-1000, які дозволяють отримати найбільш стабільний аксіальний офсет при маневруванні потужністю. Удосконалена багатозонна математична модель реактора типу ВВЕР-1000, яка відрізняється від відомих тим, що враховує виділення енергії як при поділі ядер U-235, так і ядер Pu-239, та включає модель з розподіленими параметрами. Вперше запропоновано метод автоматизованого управління зміною потужності ЯЕУ з ВВЕР-1000, у якому застосовано три контури управління, один з яких підтримує регламентну зміну</p>

	<p>потужності реактора за рахунок регулювання концентрації борної кислоти в теплоносії, другий підтримує необхідне значення АО шляхом зміни положення стрижнів СУЗ, а третій – температурний режим теплоносія за рахунок регулювання положення головних клапанів турбогенератора. Ключові слова: метод автоматизованого управління, моделі та методи управління, ЯЕУ, математична модель, U-235, Pu-239, три контури управління, система автоматичного управління, ВВЕР-1000.</p>
4	<p>Одреховська, Є.О. Оптимізація перемикачів статичних програм регулювання потужності ЯЕУ з ВВЕР-1000 в перехідних режимах експлуатації: дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук за спец. 05.13.07 “Автоматизація процесів керування” / Є.О. Одреховська. – Одеса, 2017. – 161 с.</p> <p>Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі підвищення конкурентоспроможності експлуатації ЯЕУ в енергетичній системі за рахунок пошуку оптимального режиму перемикачів статичних програм регулювання при експлуатації на будь-яких рівнях потужності. Запропоновано імітаційну модель автоматизованої системи керування потужністю, яка заснована на перемикачів статичних програм регулювання за технологічними методами експлуатації енергетичного обладнання, що дозволило сформулювати зміну поточної моделі програми регулювання при потужності об’єкта керування в діапазоні від 80 до 100 %. Отримала подальший розвиток багатозонна математична модель реактора з розподіленими параметрами, яка на відміну від відомих враховує поділ ядер U-235 та Pu-239, а також розраховує аксіальний офсет як кількісну міру сталості реактора, глибину вигоряння палива, як міру ефективності експлуатації та пошкодження оболонок твелів, як міру безпеки експлуатації. Обґрунтована можливість безударного перемикачів енергетичного обладнання в заданому діапазоні зміни навантаження за рахунок мінімізації цільової функції методами оптимізації, що забезпечує мінімізацію поточних зовнішніх та внутрішніх збурень. Це підвищує конкурентоспроможність ЯЕУ з ВВЕР-1000 на енергетичному ринку. Ключові слова: статична програма регулювання, ЯЕУ, ВВЕР-1000, оптимізація, цільова функція, автоматизована система управління.</p>

**Додаток 6.** Короткий зміст (анотації) досліджень за грантами, що наведені у Таблиці 8

№ з/п	Назви грантів та їх анотації
1	<p>Фощ Т.В. Грант на навчання за програмою академічного обміну ERASMUS MINDUS ELECTRA протягом двох академічних семестрів (2015–2016 р.).</p> <p>Робота за темою «Методи та моделі автоматичного керування зміною потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000» в Університеті Минью (University of Minho), м. Брага (Braga), Португалія).</p>
2	<p>Максимов М.В., Пелих С.М. Грант Шведської агенції з радіаційної безпеки на здійснення академічного візиту до науково-педагогічних закладів Швеції та Норвегії, 4–8 грудня 2016 р.</p> <p>Проведення наукових семінарів за темою «Поліпшення балансу між безпекою та ефективністю експлуатації ядерного палива ВВЕР-1000» в Королівському інституті технологій, м. Стокгольм, Швеція, Університеті м. Уппсала, Швеція та Інституті енергетичних технологій, м. Халден, Норвегія.</p>
3	<p>Пелих С.М. Грант Шведської агенції з радіаційної безпеки на участь у навчальному курсі «ARCHER EUROCOURSE», 19–20 січня 2015 р., м. Петтен, Нідерланди, під егідою університету м. Штутгарт, Німеччина.</p> <p>Вивчення питань з проектування ядерного палива для високотемпературних</p>

	ядерних реакторів.
4	Максимов М.В., Пелих С.М. Грант Шведської агенції з радіаційної безпеки на участь у навчальному курсі "Fermi Course: Leading a Nuclear Business", 29-30 травня 2017 р., м. Уппсала, Швеція, під егідою Європейської асоціації з ядерної освіти (ENEN). Вивчення питань з оптимізації режимів експлуатації ядерних реакторів.
5	Пелих С.М. Грант Європейської комісії на участь у міжнародній конференції «Materials resistant to extreme conditions for future energy systems», 12–14 червня 2017 р., м. Київ, під егідою НАН України. Вивчення питань з оптимізації матеріалів ядерного палива.
6	Пелих С.М., Максимов М.В. Грант Шведської агенції з радіаційної безпеки на участь у науковому семінарі Європейського проекту SCIP-III (Studsvik Cladding Integrity Project), 28-30 листопада 2017 р., м. Студзвік, Швеція. Вирішення питань щодо вступу Консорціуму українських науково-педагогічних установ до Європейського проекту SCIP-III.

Керівник роботи

ПІБ: Максимов М.В.

Підпис \_\_\_\_\_

Дата: \_\_\_\_\_