

## Секція 7. Енергетика та енергозбереження

### Назва пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки згідно з Законом України

3.1. 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.

### Назва напрямку секції ( не більше 2)

10. Науково-технічні проблеми дослідження, створення та експлуатації теплових та ядерних енергоустановок.

### Назва піднапрямку секції

10.1. Теоретичні, експериментальні, методологічні, технічні і технологічні основи створення та експлуатації теплових і ядерних енергоустановок, парогенераторів та камер згоряння.

## **АНОТОВАНИЙ ЗВІТ**

**за завершеною науково-дослідною роботою за 2012-2014 роки  
(Характер НДР: фундаментальне дослідження)**

- 1. Тема НДР:** Фізико-технічні методи управління властивостями ТВЗ для забезпечення балансу безпеки та ефективності
- 2. Керівник НДР:** Максимов Максим Віталійович
- 3. Номер державної реєстрації НДР:** 0111U010454
- 4. Номер облікової картки заключного звіту:**
- 5. Назва вищого навчального закладу, наукової установи:** Одеський національний політехнічний університет
- 6. Терміни виконання:** початок - 01.2012 р., закінчення - 12.2014 р.
- 7. Обсяг коштів, виділених на виконання НДР за весь період (згідно з запитом / фактичний) 540,00/540,00 тис. гривень.**
- 8. Короткий зміст запиту (до 40 рядків):**

- предмет дослідження — моделі і методи управління властивостями ядерного палива при експлуатації АЕС із ВВЕР;

- об'єкт дослідження — складові паливної збірки та паливного елемента, такі як оболонки паливних елементів та паливна матриця, паливна збірка в цілому (тепловидільна збірка – ТВЗ), активна зона ядерного реактора в режимах нормальної експлуатації;

- мета науково-дослідної роботи — забезпечення балансу рівнів безпеки та ефективності АЕС з ВВЕР і наукове обґрунтування єдиного комплексу взаємозалежних моделей і фізико-технічних методів управління властивостями ТВЗ, спрямованих на визначення часу виникнення їх граничного стану при роботі реакторної установки в нормальних експлуатаційних умовах. Конкретна фундаментальна задача — розробка єдиного комплексу

моделей оболонки паливного елемента, паливної матриці та паливної збірки в цілому, створення на цій базі методів управління властивостями ТВЗ.

**- основні завдання, задачі чи проблеми, які необхідно було вирішити для досягнення мети:**

- провести аналіз і виконати класифікацію методів управління властивостями ТВЗ, визначити системні зв'язки режимів функціонування реакторної установки і стану ТВЗ;
- розробити інтегральний критерій для визначення стану ТВЗ та оцінки міцності оболонок твелів ТВЗ і метод перерахунку характеристик ТВЗ, що надаються різними виробниками ядерного палива;
- розробити математичну модель ТВЗ ВВЕР-1000 для оцінки міцності оболонок твелів залежно від режиму змінного навантаження;
- визначити вплив режимних параметрів активної зони, конструкційних характеристик ТВЗ, алгоритму переміщення ТВЗ по активній зоні та розміщення органів регулювання системи управління і захисту (СУЗ), що використовуються при маневрі, на зміну властивостей оболонок твелів і ТВЗ в цілому;
- дослідити вплив різних конструкцій ТВЗ на руйнування оболонок твелів;
- формалізувати завдання управління властивостями ТВЗ, у тому числі їх цілісності, при роботі реакторної установки в нормальних експлуатаційних умовах до граничного стану шляхом розробки імовірно-детерміністичної моделі стану паливного завантаження ВВЕР-1000 в цілому;
- провести аналіз ефективності використання ТВЗ з урахуванням зміни її стану, обрати і обґрунтувати критерії такої оцінки на підставі даних про ядерно-фізичні характеристики ядерного палива і розподіл продуктів його поділу;
- розробити метод управління потужністю ВВЕР-1000, який приймає до уваги поточний стан паливного завантаження реактора та забезпечує принцип балансу безпеки та ефективності АЕС з ВВЕР;

## **9. Опис процесу наукового дослідження (40-50 рядків):**

**- використані методи наукових досліджень, методики, обладнання:**

Для оцінки змін властивостей паливної матриці і оболонки твела розроблено метод аналізу міцності оболонки твела на основі енергетичного варіанту теорії повзучості (ЕВТП). Метод аналізу міцності оболонки твела базується на використанні верифікованих програмних засобів, що доступні виконавцям проекту через міжнародну базу даних NEA DATABANK (FEMAXI, Японія), або за умовами міжнародної науково-технічної кооперації («Імитатор Реактора», Росія), що виключає залежність України від методик та баз даних різних виробників ядерного палива, які не знаходяться у відкритому доступі.

Метод аналізу міцності оболонки твела на основі ЕВТП визначає основні методи управління властивостями ТВЗ для будь-яких умов нормальної експлуатації ВВЕР-1000. До основних методів управління властивостями ТВЗ відноситься вибір:

- оптимального співвідношення базового та змінного режимів навантаження РУ;
- аксіального профілювання конструктивних і фізичних властивостей палива (розміру центрального отвору таблетки та ін.) з урахуванням розміщення максимально навантаженого аксіального сегмента;
- температурного режиму теплоносія;
- алгоритму перестановок ТВЗ по активній зоні в ході кампанії;
- робочої групи органів регулювання системи управління і захисту, що використовується для стабілізації аксіального офсету при зміні потужності;

Робота виконана на кафедрі автоматизації теплоенергетичних процесів ОНПУ.

Для виконання роботи використовувались програмні продукти, які пройшли міжнародну верифікацію та внесені до NEA Data Bank або в реєстр ПЗ ДАН РФ: WWER-1000 Reactor Simulator; FEMAXI; Імитатор Реактора; БИПР-7а.

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).

**- зазначення реалізованих при виконанні НДР ідей та гіпотез, описаних в запиті:**

Основною реалізованою ідеєю проекту є системне врахування впливу режимних параметрів активної зони, конструкційних характеристик ТВЗ, алгоритму переміщення ТВЗ по активній зоні та розміщення робочої групи регулюючих органів СУЗ, які використовуються при маневрі потужністю ВВЕР-1000, на рівень ефективності та безпеки експлуатації АЕС. При цьому визначаючим для безпеки АЕС є зміна властивостей паливної матриці в процесі її експлуатації і вплив цієї зміни на накопичення дефектів в оболонці твела. Оскільки врахування стану паливної матриці і оболонки має бути здійснено за рахунок інструментального контролю в процесі перевантаження ТВЗ, створені наукові передумови для розробки імовірно-детерміністичної моделі оцінки властивостей ядерного палива для нормальних умов експлуатації ВВЕР-1000, а також для проектування на цій основі автоматизованої системи управління властивостями ТВЗ ВВЕР-1000.

**- результати етапу (відповідно до технічного завдання):**

Номер етапу	Назва етапу згідно з технічним завданням	Заплановані результати етапу	Отримані результати етапу
1	Формалізувати завдання управління станом ТВЗ, у тому числі їх цілісність, при роботі реакторної установки в нормальних експлуатаційних умовах до граничного стану. Розробити імовірно-детерміністичні моделі стану ТВЗ, паливного завантаження ВВЕР-1000 в цілому. Розробити модель оцінки зміни властивостей та стану ТВЗ в процесі експлуатації, придатну для реалізації управління станом ТВЗ	Імовірно-детерміністична модель стану ТВЗ, паливного завантаження ВВЕР-1000 в цілому	Імовірно-детерміністична модель стану ТВЗ, паливного завантаження ВВЕР-1000 в цілому
2	Розробити інтегральний критерій для визначення стану ТВЗ і метод перерахунку характеристик ТВЗ, що надаються різними виробниками ядерного палива. Визначити вплив режимних параметрів активної зони,	Інтегральний критерій для визначення стану ТВЗ і метод перерахунку характеристик ТВЗ, що надаються різними виробниками ядерного палива	Інтегральний критерій для визначення стану ТВЗ і метод перерахунку характеристик ТВЗ, що надаються різними виробниками ядерного палива

	конструкційних характеристик ТВЗ, алгоритму переміщення ТВЗ по активній зоні та розміщення робочої групи регулюючих органів СУЗ, які використовуються при маневрі на зміну властивостей оболонки твела, ТВЗ в цілому. Дослідити вплив конструкції ТВЗ на руйнування оболонки твела.		
3	Розробити метод управління потужністю ВВЕР-1000 з урахуванням поточного стану паливного завантаження реактора. Розробити метод управління станом ТВЗ в процесі експлуатації з урахуванням балансу безпеки, надійності та економічної ефективності роботи реактора ВВЕР-1000	Метод управління станом ТВЗ в процесі експлуатації для забезпечення балансу безпеки та ефективності	Метод управління станом ТВЗ в процесі експлуатації для забезпечення балансу безпеки та ефективності

#### **10. Наукова новизна та значимість отриманих наукових результатів (до 30 рядків).**

Обґрунтовано нове розв'язання наукової задачі створення фізико-технічних методів управління властивостями ТВЗ для забезпечення балансу безпеки та ефективності, що є базовим в безпеці експлуатації АЕС.

Розроблені інтегральний критерій оцінки міцності оболонок твелів ТВЗ і метод перерахунку властивостей ТВЗ різних виробників ядерного палива. Такий критерій дає змогу створити єдину систему оцінки характеристик ТВЗ різних виробників.

Розроблений метод управління станом ТВЗ в процесі експлуатації ВВЕР-1000, з урахуванням балансу безпеки, надійності та економічної ефективності роботи реактора, для будь-яких умов нормальної експлуатації ВВЕР-1000, фізично обґрунтований метод аналізу міцності оболонки твела на основі ЕВТП, а також значний доробок авторів проекту в царині інструментального контролю стану палива на АЕС з ВВЕР-1000, дали можливість вперше розробити фізично обґрунтовану модель управління властивостями ядерного палива, яка відповідає передовому світовому рівню.

#### **11. Відповідність отриманих наукових результатів сучасному рівню досліджень в даній галузі (до 40 рядків).**

На сьогоднішній день у світі не існує аналогів автоматизованої системи управління властивостями ТВЗ легководного реактора типу ВВЕР/PWR, яка запропонована і розробляється авторами проекту. Дана тематика має високий пріоритет у світі, про що свідчить опублікування авторами проекту впродовж тільки 2012-2014 років 7 статей з даної тематики у провідних міжнародних журналах (системи SCOPUS), а також 2 наукових монографій у провідних світових видавництвах (Rijeka, Palmarium Academic Publishing).

#### **12. Практична цінність результатів НДР (до 30 рядків).**

Розроблений інтегральний критерій оцінки міцності оболонок твелів дає змогу здійснити управління властивостями ТВЗ на етапі планування закупок, що забезпечить

диверсифікацію постачання ядерного палива. Спроектвана на основі моделі управління властивостями ядерного палива автоматизована система управління властивостями ТВЗ ВВЕР-1000 не буде мати аналогів у світі та дозволить кардинально підвищити ядерну безпеку українських АЕС за рахунок зниження імовірності розгерметизації оболонок твєлів з виходом радіоактивних скалок поділу в 1-й контур в кількості, яка не перевищує допустимі норми нормальної експлуатації, а також зниження імовірності розвитку неконтрольованих процесів руйнування каркасу ТВЗ.

Розв'язання цієї фундаментальної наукової проблеми особливо важливе з урахуванням сучасної еволюції об'єктивних економічних і геополітичних чинників у електроенергетиці за яких прискорюється формування таких умов функціонування енергетичного сектора економіки України, коли стає неминучим перехід частини або усіх ядерних енергоблоків українських АЕС до режиму експлуатації у змінній частині графіка електричного навантаження.

Розробка на основі результатів виконання проекту автоматизованої системи управління властивостями ТВЗ ВВЕР-1000, яка не має аналогів у світі, дозволяє підвищити якість електроенергії в енергетичній системі України до рівня міжнародних стандартів, створити передумови для збільшення експорту електроенергії та ступінь інтеграції високотехнологічних країн в ЄС. Крім того, стане можливим науково обґрунтоване прогнозування потреб НАЕК «Енергоатом» в ядерному паливі і створення на цій основі його оперативних і стратегічних запасів.

### 13. Використання результатів у навчальному процесі (до 20 рядків):

- 1) При підготовці спеціалістів та магістрів з таких галузей знань освіти:
  - енергетика і енергетичне машинобудування за фахом «атомна енергетика та технологія теплоносіїв та поводження з радіоактивними відходами на атомних електростанціях»;
  - автоматика і управління за фахом «автоматизоване управління технологічними процесами, комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва, комп'ютеризовані системи управління і автоматика»;
- 2) При підготовці кандидатів та докторів наук зі спеціальностей:
  - теплові та ядерні енергоустановки;
  - автоматизація процесів керування.
- 3) При розробці та впровадженні нових циклів лабораторних робіт та лекційних курсів в навчальному процесі кафедри АТП ОНПУ з дисциплін:
  - Фізика ядерно-фізичних процесів;
  - Системний аналіз;
  - Моделювання теплоенергетичних систем з розподіленими параметрами;
  - Моделювання стохастичних систем.

### 14. Результативність виконання науково-дослідної роботи

№ з/п	Критерії	Заплановано	Виконано	%
		(відповідно до запиту)	(за результатами НДР)	виконання
		кількість	кількість	%
1.	<b>Публікації колективу виконавців НДР:</b>			
	1.1. Статті у журналах, що входять до наукометричних баз даних.	7	7	100
	1.2. Публікації в матеріалах конфе-	2	2	100

	нцій, що входять до наукометричних баз даних.			
	1.3. Статті у журналах, що включені до переліку наукових фахових видань України.	7	7	100
	1.4. Публікації у матеріалах конференцій, тезах доповідей та виданнях, що не включені до переліку наукових фахових видань України.	4	4	100
	1.5. Монографії, опубліковані за рішенням Вченої ради ВНЗ (наукової установи).	—	—	—
	1.6. Підручники, навчальні посібники з грифом МОН України.	—	—	—
	1.7. Навчальні посібники без грифу МОН України.	—	—	—
	1.8. Словники, довідники.	—	—	—
2.	<b>Підготовка наукових кадрів:</b>			
	2.1. Захищено докторських дисертацій за тематикою НДР.	1	1	100
	2.2. Подано до розгляду у спеціалізовану вчену раду докторських дисертацій за тематикою НДР.	—	—	—
	2.3. Захищено кандидатських дисертацій за тематикою НДР.	1	1	100
	2.4. Подано до розгляду у спеціалізовану вчену раду кандидатських дисертацій за тематикою НДР.	1	1	100
	2.5. Захищено магістерських робіт за тематикою НДР.	7	7	100
3.	<b>Охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності, які створено за тематикою НДР:</b>			
	3.1. Отримано патентів (свідоцтв авторського права) України.	2	2	100
	3.2. Подано заявок на отримання патенту України.	—	—	—
	3.3. Отримано патентів (свідоцтв авторського права) інших держав.	1	1	100
	3.4. Подано заявок на отримання патенту інших держав.	—	—	—
4.	<b>Участь з оплатою у виконанні НДР:</b>			
	4.1. Студентів.	1	1	100
	4.2. Молодих учених та аспірантів.	2	2	100

**15. Бібліографічний перелік монографій, підручників, посібників, словників, довідників, наукових статей, інших публікацій; подані заявки та отримані патенти; теми захищених та поданих до розгляду у спеціалізовану вчену раду дисертацій (за матеріалами досліджень за період виконання НДР)**

1. Пат. 100070 України, МПК G 21 С 7/00. Спосіб управління ядерною енергетичною установкою з реактором водяного типу при зміні потужності реактора або зовнішнього навантаження / Максимов М.В., Пелих С.М., Баскаков В.Е, Цисельська Т.О.; заявник та патентовласник Максимов М.В., Пелих С.М., Баскаков В.Є, Цисельська Т.О. – № а201102326; заявл. 28.02.2011; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21/2012.
2. Максимов, М.В. Основы управления ресурсом оболочки твэла в переменном режиме нагружения ВВЭР-1000 / М.В. Максимов, С.Н. Пелых, Р.Л. Гонтарь // Атомная энергия. – 2012. – Т. 112, Вып. 4. – С. 199–206.
3. Pelykh, S.N. Theory of fuel life control methods at Nuclear Power Plants (NPP) with Water-Water Energetic Reactor (WWER) / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov // Nuclear Reactors / A.Z. Mesquita. – Rijeka, 2012. – Chapter 10. – P. 197–230.
4. Pelykh, S.N. A model of fuel rearrangement optimization for a VVER-1000 cycling unit considering reactor power growth up to 110 % / S. N. Pelykh // Odes'kyi Natsional'nyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi. – 2012. – Вып. 1(38). – С. 112–117.
5. Пат. 2470391 Российской Федерации, МПК G 21 С 7/00. Способ управления ядерной энергетической установкой с реактором водяного типа при изменении мощности реактора или внешней нагрузки / Максимов М.В., Пелых С.Н., Баскаков В.Е, Цисельская Т.А.; заявитель и патентообладатель Максимов М.В., Пелых С.Н., Баскаков В.Е, Цисельская Т.А. – № 2011121323/07; заявл. 25.05.11; опубл. 20.12.12, Бюл. № 35.
6. Пелых, С.Н. Метод управления свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора / С.Н. Пелых, М.В. Максимов, А.А. Назаренко // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2012. – Вып. 2 (39). – С. 113–123.
7. Pelykh, S.N. A method for VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov, G.T. Parks // Nuclear Engineering and Design. – 2013. –Vol. 257, № 4. – P. 53–60.
8. Pelykh, S.N. VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup / S. N. Pelykh, M.V. Maksimov // Proc. of the 4-th int. conf. “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy”. Book of Abstracts. – K.: Institute for Nuclear Research, 3–7 September 2012. – P. 122–123.
9. Pelykh, S.N. Theory of VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup / S. N. Pelykh, M.V. Maksimov // Proc. of the XX-th Int. Conf. on Physics of Radiation Phenomena and Radiation Material Science. – Alushta: Kharkov Institute of Physics and Technology, 10–15 September 2012. – P. 189–190.
10. Пелых, С. Н. Теоретические и технологические основы безопасной эксплуатации твэлов легководного реактора / С. Н. Пелых, М. В. Максимов // Тезисы докладов XX ежегодной науч. конф. Ин-та ядерных исследований НАН Украины 28 января–01 февраля 2013 г. – К.: Ин-т ядерных исследований НАН Украины, 2013. – С. 94–95.
11. Цисельская, Т. А. Усовершенствование автоматизированной системы регулирования мощности энергоблока АЭС для эксплуатации в маневренных режимах суточного цикла: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук по спец. 05.13.07 “Автоматизация процессов управления” / Т. А. Цисельская. – Одесса, 2013. – 157 с.
12. Пелых, С. Н. Теоретические и технологические основы безопасной эксплуатации твэлов легководного реактора: дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук по спец. 05.14.14 “Тепловые и ядерные энергоустановки” / С. Н. Пелых. – Одесса, 2013. – 243 с.
13. Pelykh, S. N. Theory of VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. – 2013. – Iss. 2(84). – P. 50–54.
14. Пелых, С. Н. Метод управления перестановками ТВС с учетом поврежденности оболочек твэлов и глубины выгорания топлива / С.Н. Пелых, М.В. Максимов // Вопросы

атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2013. – Вып. 5(87). – С. 84–90.

15. Pelykh, S. N. Grounds of VVER-1000 fuel cladding life control / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov, V.E. Baskakov // *Annals of Nuclear Energy*. – 2013. – Iss. 58. – P. 188–197.

16. Пелых, С. Н. Основы управления свойствами твэлов ВВЭР / С.Н. Пелых. – Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. – 168 с.

17. Пелых, С. Н. Метод прогнозирования надежности оболочек твэлов ВВЭР / С. Н. Пелых, М. В. Максимов, М. В. Никольский // *Ядерная физика и энергетика*. – 2014. – Т. 15, № 1 – С. 50–58.

18. Pelykh, S.N. A method for minimization of cladding failure parameter accumulation probability in VVER fuel elements / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov, M.V. Nikolsky // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science*. – 2014. – Iss. 4. – P. 108–116.

19. Пелых, С. Н. Метод ограничения вероятности накопления поврежденности оболочек твэлов ВВЭР / С.Н. Пелых, М.В. Никольский, С.Д. Рябчиков // *Тр. Одес. политехн. ун-та*. – 2014. – Вып. 2 (44). – С. 86–92.

20. Пелых, С. Н. Метод минимизации вероятности накопления поврежденности оболочек твэлов ВВЭР-1000 с учетом неравномерности энерговыделения в ТВС / С.Н. Пелых, М. В. Максимов, М.В. Никольский, С.Д. Рябчиков // *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.

21. 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, 2014. – 135 с (подано до розгляду).

**16. Кількість штатних співробітників** — 0, кількість сумісників — 9, молодих учених з оплатою — 2, кількість студентів з оплатою — 1, які брали участь у виконанні НДР

---

**17. Рішення вченої (наукової, науково-технічної) ради** від \_\_\_\_\_ протокол № \_\_\_\_\_ про закінчення роботи

**Керівник роботи:**

Максимов М. В.

підпис

**Проректор із наукової роботи:**

Дмитришин Д. В.

підпис

**МП**