

УДК 621.039.50

В.В. Гальченко, В.С. Ковальчук

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПІДГОТОВКИ МАЛОГРУПОВИХ КОНСТАНТ  
З РОЗПОДІЛОМ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛОНОСІЯ ПО РАДІУСУ КАСЕТИ  
ТА З ВИКОРИСТАННЯМ ЇЇ ОСЕРЕДНЕНОГО ЗНАЧЕННЯ**

Influence of account of distributing of temperature of teplonosiya is studied on the radius of TVZ on the sizes of macroscopic sections of co-operation by the software products of Solidworks and Wimsd-5b. The macroscopic sections of co-operation were determined depending on composition of fuel, his burning down, position of organs of adjusting, closeness of teplonosiya, temperature of teplonosiya, temperature of fuel and concentration of liquid absorber. The method of dataorigination consisted in oserednenni of the indicated parameters of fuel and teplonosiya on the cut of TVZ. The conducted researches rotined that the account of distributing of temperature of teplonosiya on the cut of TVZ substantially did not have influenced on the homogenized macroscopic descriptions of the system in the “thermal” area of energies, but found out serious influence on descriptions in the “rapid” area of energies of neutrons and on some effects of reactivity. The got results testify to the necessity of subsequent leadthrough of researches for this direction.

### Вступ

Під час проведення нейтронно-фізичних розрахунків різних станів реакторної установки дуже важливу роль відіграє питання підготовки малогрупових констант. Від того, як це було зроблено, залежить якість і точність подальших розрахунків.

Існує велика кількість різних кодів, таких як WIMS, КАСЦЕТА, Casmo, SRAC тощо, які використовуються для підготовки малогрупових констант і включають в себе різні методи розрахунку (наприклад, такі, як імовірності перших зіткнень, Монте-Карло, дискретних ординат), різне константне забезпечення, математичні моделі.

Макроскопічні перерізи взаємодії визначаються залежно від композиції палива, його вигорання, положення органів регулювання, густини теплоносія, температур теплоносія і палива та концентрації рідкого поглинача. Методика підготовки даних полягає в осередненні вказаних параметрів палива і теплоносія по перерізу тепловиділяючої збірки (ТВЗ). Проводиться велика кількість розрахунків, в яких окремо змінюється температура палива і теплоносія та інших параметрів. Отримані таким чином набори залежностей макроскопічних перерізів взаємодії від параметрів палива і теплоносія апроксимуються відповідними функціональними залежностями, які є вхідними даними для так званих програмних продуктів тривимірної кінетики, за допомогою яких і виконуються подальші розрахунки різних станів реакторної установки – від стаціонарної

задачі (визначення характеристик паливного завантаження) до аналізу різних перехідних процесів, які можуть мати місце в реакторних установках.

Зазвичай досліджується вплив різних розрахункових методів, які знайшли своє застосування в різних програмних продуктах [1–3] і лише останнім часом, з покращенням можливостей обчислювальної техніки, стало можливим вивчати вплив просторового розподілу характеристик на зміну макроскопічних величин. На сьогодні такі роботи проводяться доволі активно [4, 5].

### Постановка задачі

Класичний розподіл енерговиділення по радіусу активної зони реактора має вигляд функції Бесселя нульового порядку першого роду, а розподіл енерговиділення по висоті – функції косинуса [6]. Профілювання енерговиділення по висоті враховується відповідним чином під час подальших розрахунків при створенні тривимірних розрахункових схем активних зон реактора. Профілювання енерговиділення по радіусу і, як наслідок, зміна температури теплоносія по перерізу ТВЗ не враховується при підготовці макроскопічних перерізів взаємодії та при подальших розрахунках різних станів реакторної установки.

Мета роботи полягає у вивченні впливу врахування розподілу температури теплоносія по радіусу ТВЗ на величини макроскопічних перерізів взаємодії.

### Розрахунок температури теплоносія в ТВЗ

Розрахунок розподілу температури теплоносія по висоті та перерізу ТВЗ проведено з використанням програмного продукту SolidWorks [7].

SolidWorks – програмний комплекс САПР для автоматизації робіт промислового підприємства на етапах конструкторської та технологічної підготовки виробництва, розроблений компанією SolidWorks Corporation, яка є незалежним підрозділом компанії Dassault Systemes (Франція).

Програмний комплекс SolidWorks включає базові конфігурації SolidWorks Standard, SolidWorks Professional, SolidWorks Premium, а також різні прикладні модулі:

- управління інженерними даними: SolidWorks Enterprise PDM;
- інженерних розрахунків: SolidWorks Simulation Professional, SolidWorks Simulation Premium, SolidWorks Flow Simulation;
- механообробки, числового програмного управління: CAMWorks тощо.

Розрахункова схема створювалася для модернізованої паливної збірки ТВЗА, яка на сьогодні перебуває в експлуатації на більшості енергоблоків ВВЕР-1000 в Україні. Геометричні характеристики ТВЗА, які використовувалися при створенні розрахункової схеми, наведено в таблиці.

Розрахункова схема ТВЗ створювалася повністю тривимірною. Моделювалася лише так звана “частина, що обігривається”, яка відповідає висоті паливного стовпа. Це є прийнятним, оскільки саме по висоті паливного стовпа відбувається енерговиділення. Дистанційовальні решітки в ТВЗ не моделювалися, але враховувалися в розрахунковій схемі як додатковий термічний опір. Розрахункову схему ТВЗ для програмного продукту SolidWorks наведено на рис. 1.

Граничними умовами для розрахунку теплофізичних характеристик задавалися розподіл температур і швидкості теплоносія на вході в ТВЗ, тиск теплоносія на виході з пучка твелів та профіль енерговиділення по висоті ТВЗ. Профіль енерговиділення, який наведено на рис. 2, вибраний з [8] і відповідає реальному розподілу теплового потоку для ТВЗ.

У результаті розрахунків були отримані поля температури та швидкості теплоносія, а також розподіл тиску як по висоті ТВЗ, так і в радіальному перерізі.

Таблиця. Геометричні характеристики ТВЗА

Найменування, одиниці вимірювання	Величина
Кількість твел в ТВЗ, шт	312
Кількість направляючих каналів в ТВЗ, шт	18
Кількість центральних трубок в ТВЗ, шт	1
Довжина твела, що обігривається, мм	3500
Зовнішній діаметр твела, мм	9,1
Зовнішній діаметр паливної таблетки, мм	7,6
Довжина направляючого каналу, мм	3500
Зовнішній діаметр направляючого каналу, мм	12,6
Довжина центральної трубки, мм	3500
Зовнішній діаметр центральної трубки, мм	11,2
Крок твелів у ТВЗ, мм	12,75
Матеріал оболонки твела	Zr
Матеріал паливної таблетки	UO <sub>2</sub>

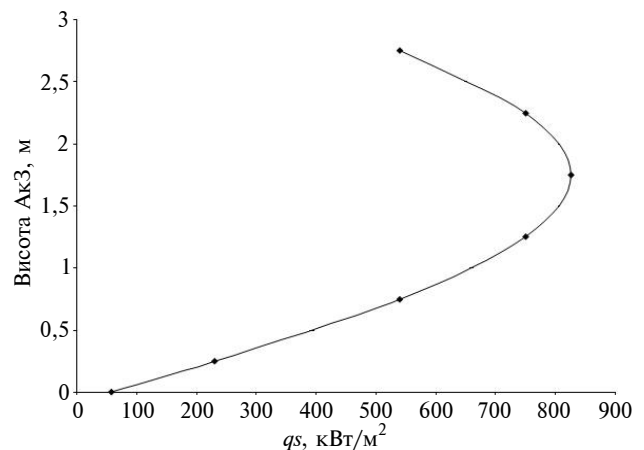


Рис. 2. Розподіл теплового потоку по висоті ТВЗ

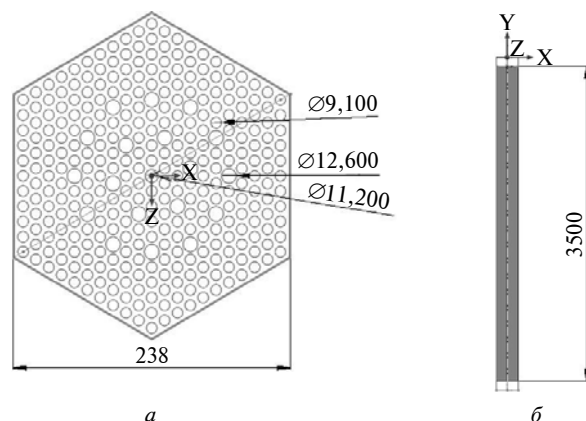


Рис. 1. Розрахункова схема ТВЗ для програмного продукту SolidWorks у площинах XOY (а) і XOZ (б) відповідно

На рис. 3 наведено результати розрахунку розподілу температури теплоносія по перерізу ТВЗ для одного шару по висоті.

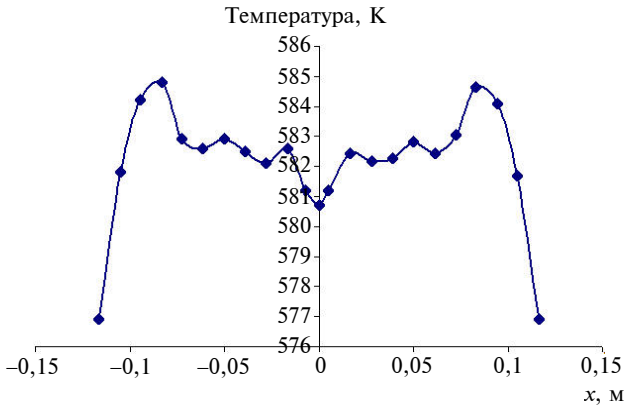


Рис. 3. Розподіл температури теплоносія в радіальному напрямку (центральна частина ТВЗ)

Розподіл температури теплоносія для інших шарів ТВЗ по висоті має ідентичний характер. Отримані результати доволі коректно характеризують розподіл температури теплоносія в радіальному напрямку для ТВЗ. Вода центральної трубки і направляючих каналів ТВЗ нагрівається менше (мінімум на графіку в центрі та перший і другий провали в середній частині графіка), через те що вони не містять палива.

Отриманий таким чином розподіл температур теплоносія по радіусу ТВЗ задавався для подальших розрахунків нейтронно-фізичних характеристик у програму WIMSD-5B.

#### Розрахунок малогрупових характеристик у кодї WIMSD-5B

Для аналізу впливу розподілу температур на макроскопічні характеристики ТВЗ було використано програмний продукт WIMSD5/B. WIMS (Winfrith Improved Multigroup Scheme) — універсальна програма для розрахунку чарунки решітки реактора, яка дає змогу на основі теорії переносу нейтронів розраховувати потік нейтронів залежно від енергії і положення в чарунці [9].

Розрахункова схема ТВЗ ВВЕР-1000 для комп'ютерного коду WIMS та загальний опис характеристик останнього детально наведено в [1, 2], де показані особливості процесу моделювання ТВЗ та наведені порівняльні розрахунки з іншими аналогічними програмними продуктами.

Розрахунки макроскопічних характеристик проводилися в діапазоні вигорання  $0-60000$  МВт·доба/т(U) з кроком по вигоранню в  $3000$  МВт·доба/т(U) для двох випадків. У першому розподіл температури теплоносія по перерізу ТВЗ задавався сталим, тобто задавалося середнє значення температури теплоносія по всьому перерізу ТВЗ. У другому випадку температура теплоносія задавалася відповідно до розподілу, наведеного на рис. 3.

У результаті розрахунку було отримано такі гомогенізовані макроскопічні нейтронно-фізичні характеристики ТВЗ у чотиригруповому енергетичному наближенні, як  $\nu\Sigma_f$  — розмножувальна здатність,  $\text{см}^{-1}$ ;  $\Sigma_f$  — макроскопічний переріз ділення,  $\text{см}^{-1}$ ;  $\nu\Sigma_a$  — макроскопічний переріз поглинання (або поглинаюча здатність),  $\text{см}^{-1}$ ; і  $k_{\text{inf}}$  — коефіцієнт розмноження нейтронів. Деякі результати розрахунків наведено на рис. 4–6.

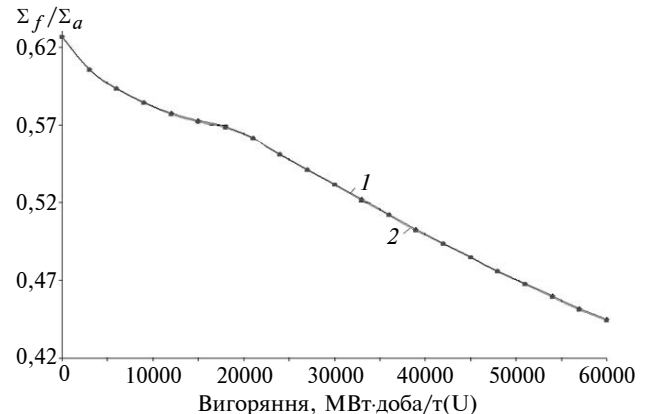


Рис. 4. Зміна  $\Sigma_f/\Sigma_a$  (для четвертої енергетичної групи) з вигоранням: 1 — із урахуванням розподілу температури теплоносія; 2 — із використанням осередненого значення

З наведених рис. 4–6 видно, що відхилення між макроскопічними характеристиками палива для четвертої “теплової” енергетичної групи не перевищують  $0,4\%$ . Це пов’язане з тим, що в “тепловій” області енергій спектр нейтронів відповідає спектру Максвелла [6, 8] з відповідним зміщенням від “ідеального” спектра, яке визначається за допомогою так званої температури нейтронного газу  $T_n$  [8]:

$$T_n = T_m \left( 1 + 1,8 \frac{\Sigma_a}{\xi \Sigma_s} \right), \quad (1)$$

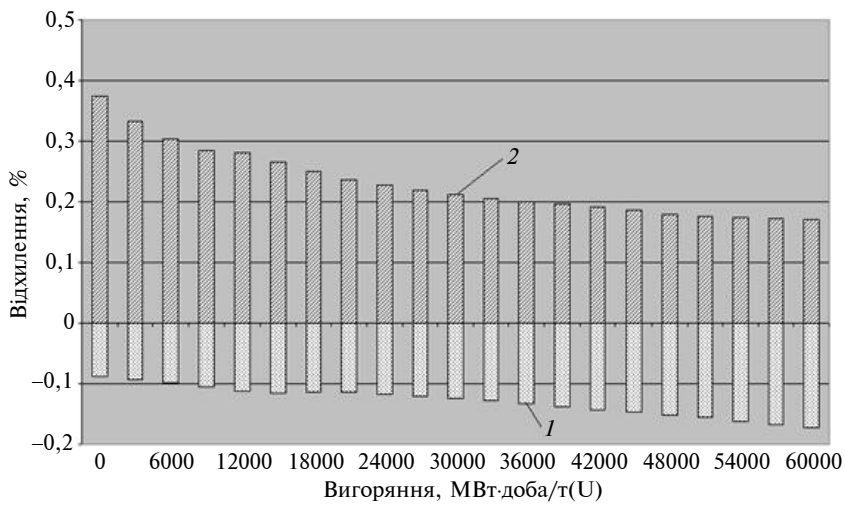


Рис. 5. Відхилення відношення  $\nu\Sigma_f/\Sigma_a$  (1) і перерізу поглинання  $\Sigma_a$  (2) для четвертої "тепловій" енергетичної групи при використанні осередненого значення температур теплоносія і з урахуванням розподілу температури

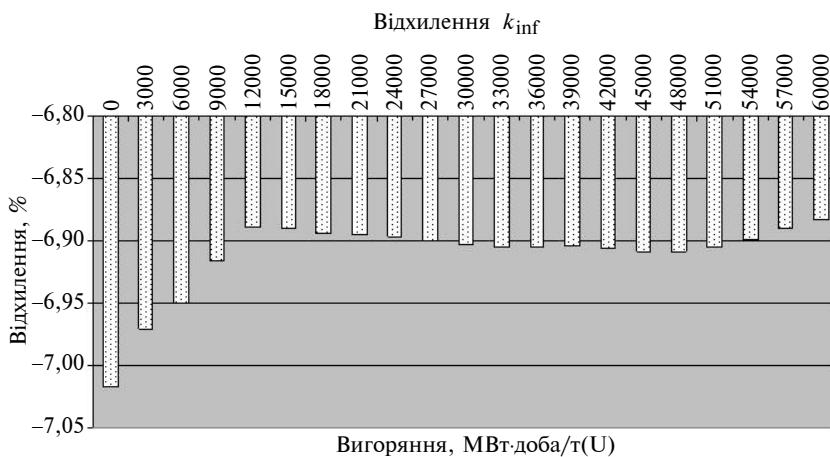


Рис. 6. Відхилення коефіцієнта розмноження нейтронів  $k_{inf}$  при використанні осередненого значення температур теплоносія і з урахуванням розподілу температури

де  $T_m$  – температура сповільнювача, °C;  $\xi\Sigma_s$  – здатність уповільнювати,  $\text{cm}^{-1}$ ;  $\Sigma_a$  – переріз поглинання (або здатність поглинати),  $\text{cm}^{-1}$ . Оскільки температура теплоносія по перерізу ТВЗ максимально змінюється лише на 7–8 градусів, то при корегуванні спектра нейтронів і подальшому "згортанні" макроскопічних характеристик та гомогенізації системи відмінності нівелюються, що і веде до появи незначної відмінності в перерізах.

Оскільки всі основні нейтронно-фізичні процеси в реакторах на теплових нейтронах (до яких належить і ВВЕР) в основному відбуваються саме в "тепловій" області енергій, то кін-

цеве відхилення коефіцієнта розмноження нейтронів до 7% (див. рис. 6) стало дещо несподіваним.

Коефіцієнт розмноження нейтронів визначається за формулою чотирьох співмножників як:

$$k_{inf} = \eta \cdot \theta \cdot \varepsilon \cdot \phi. \quad (2)$$

Коефіцієнти розмноження на теплових нейтронах  $\eta$  і використання теплових нейтронів  $\theta$  відповідальні за процеси в "тепловій" області енергій і, як показано вище, їх зміна має несуттєвий характер. Коефіцієнт розмноження на швидких нейтронах  $\varepsilon$  залежить виключно від характеристик паливної композиції і не залежить від параметрів теплоносія. А от імовірність запобігання резонансній втраті  $\phi$  залежатиме від кількості ядер сповільнювача. Зміна температури теплоносія призводитиме до зміни характеристик сповільнення нейтронів. З рис. 7 видно, що поглинання нейтронів у "швидкій" області енергій зменшилося доволі істотно (до 20%) при заданні розподілу температури теплоносія, на відміну від використання її осередненого значення. Таке зменшення поглинання привело до зростання імовірності запобігання резонансній втраті нейтронів і, як наслідок, до збільшення коефіцієнта розмноження нейтронів на 7–8%.

При подальшій обробці макроскопічних характеристик залежність перерізів від зміни температури теплоносія, палива тощо враховується у вигляді поліноміальної залежності. Ці поліноміальні залежності і задаються як вхідні дані для програм, які і проводять розрахунки різних станів реакторів. Тому таке відхилення для "швидкої" енергетичної групи може призвести до недооцінення ефектів реактивності, що може бути причиною недооцінення ходу протікання перехідного процесу.

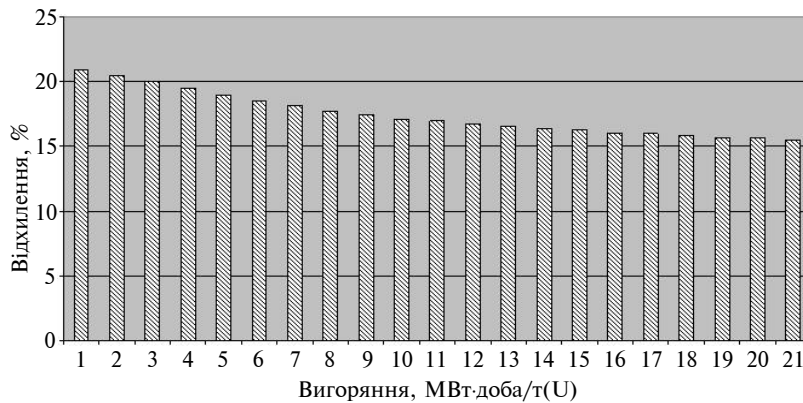


Рис. 7. Відхилення перерізу поглинання  $\Sigma_a$  для “швидкої” енергетичної групи при використанні осередненого значення температур теплоносія і з урахуванням розподілу температури

Ефекти реактивності враховуються за допомогою коефіцієнтів реактивності, які є похідною реактивності за параметром, який змінюється (температура теплоносія, температура палива, концентрація рідкого поглиначка тощо). Ефект реактивності, наприклад, за температурою палива можна оцінити таким чином:

$$\alpha_{T_f} = \frac{\partial \rho}{\partial T_f} = \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial T_f} \approx \frac{1}{k} \frac{\Delta k}{\Delta T_f}, \quad (3)$$

де  $\alpha_{T_f}$  – коефіцієнт реактивності за температурою палива;  $T_f$  – температура палива;

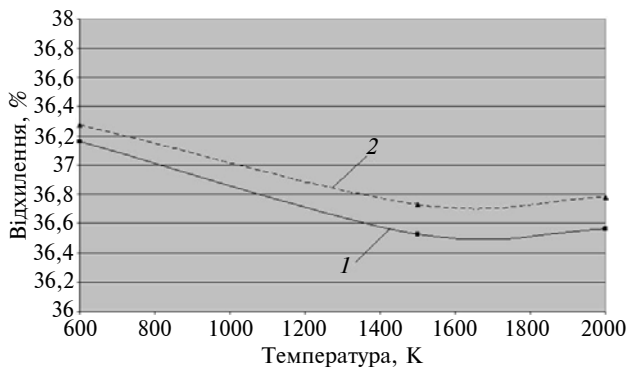


Рис. 8. Відхилення коефіцієнта реактивності за температурою палива при використанні осередненого значення температур теплоносія і з урахуванням розподілу температури для різних глибин вигорання: 1 – 30000 МВт-доба/т(U); 2 – 51000 МВт-доба/т(U)

$\rho = \frac{k-1}{k}$  – реактивність;  $k$  – коефіцієнт розмноження.

Було проведено ряд розрахунків, в яких для обох варіантів змінювалася температура палива. В результаті було розраховано температурний ефект реактивності за температурою палива для обох варіантів, що розглядалися. Відхилення  $\alpha_{T_f}$

для випадків при використанні осередненого значення температур теплоносія і з урахуванням розподілу температури наведено на рис. 8. З нього

видно, що можлива недооцінка ефекту при використанні осередненого значення температури теплоносія сягатиме до 40 %, а це істотно може вплинути на результат перехідного процесу.

## Висновки

Проведені дослідження показали, що врахування розподілу температури теплоносія по перерізу ТВЗ суттєво не вплинуло на гомогенізовані макроскопічні характеристики системи в “тепловій” області енергій, але виявило серйозний вплив на характеристики у “швидкій” області енергій нейтронів і на деякі ефекти реактивності.

На сьогодні ще не можна говорити про необхідність врахування розподілу температур, який досліджувався в роботі. Справа в тому, що оскільки характер самих залежностей не змінюється, то значення похідної функції залежності перерізів від таких параметрів, як температура теплоносія, густина теплоносія, температура палива тощо змінюватиметься не настільки критично.

Остаточні висновки можна буде зробити при подальшому виконанні розрахунків з використанням таких програмних продуктів, як, наприклад, NESTLE або DYN3D, які і призначені для розрахунків активних зон реакторних установок.

1. Гальченко В.В., Неделин О.В. Сравнительный анализ подготовки малогрупповых констант с использованием различных компьютерных кодов. Часть 1 // Ядерная и радиационная безопасность. – Вып. 3, 6. – 2003. – С. 61–68.

2. Гальченко В.В. Сравнительный анализ подготовки данных с использованием различных компьютерных кодов. Часть 2 // Ядерні та радіаційні технології. – 7, № 3-4. – 2007. – С. 29–42.

3. *Кучин А.В., Овдиенко Ю.Н., Халимончук В.А.* Моделирование расчетного бенчмарка АЕР для топливной кассеты реактора ВВЕР-440, содержащей гадолиний, с помощью программы HELIOS // Ядерна та радіаційна безпека. – 2(50). – 2011. – С. 7–12.
4. *Неделин О.В., Гальченко В.В., Маслов О.Б.* Влияние температуры топлива на накопление изотопов плутония в топливе реактора типа ВВЭР // Тр. Одес. политех. ун-та. – Вып. 2(18). – 2002. – С. 58–61.
5. *Климов А.Д., Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф., Цибульский С.В.* Исследование влияния приближенной расчетной модели на изменение температурного коэффициента реактивности в ячейке, топливной сборке реактора типа LWR в процессе выгорания топлива // Матер. 7-й Междунар. науч.-техн. конф. "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 17-20 мая 2011 г., Подольск (РФ). – 208 с.
6. *Широков С.В.* Ядерні енергетичні реактори: Навч. посібник. – К.: НТУУ "КПІ", 1997. – 280 с.
7. *Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В. и др.* Solidworks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
8. *Дементьев Б.А.* Ядерні енергетичні реактори. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
9. *Askew J.R., Halsall M.J., Taubman C.J.* A General Description of the Lattice Code WIMS // J. of the British Nuclear Energy Society. – 5(1). – 1966. – P. 564–584.

Рекомендована Радою  
теплоенергетичного факультету  
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції  
12 березня 2012 року