

## Порівняльний аналіз нейтронно-фізичних характеристик кампанії реактора з використанням різних наборів бібліотек ядерних даних для програмного продукту WIMSD5B

*Точність та якість результатів розрахунків як стаціонарних, так і перехідних процесів активної зони реактора, значною мірою залежать від процесу підготовки нейтронно-фізичних констант, який можна зробити коректнішим, оновивши бібліотеку ядерних даних програмного продукту.*

*У статті наведено порівняльний аналіз розрахунків активної зони ВВЕР-1000 за допомогою коду DYN3D із застосування константного забезпечення, підготованого кодом WIMSD5B за різними бібліотеками ядерних даних. Розглянуто можливість використання деяких бібліотек, випущених у рамках проекту модернізації бібліотек WIMSD5B, та проведено порівняння отриманих результатів.*

*Ключові слова:* ВВЕР, DYN3D, WIMSD5B, бібліотека ядерних даних, розрахункова схема.

**В. В. Гальченко, А. А. Мишин**

### Сравнительный анализ нейтронно-физических характеристик кампании реактора с использованием различных наборов библиотек ядерных данных для программного продукта WIMSD5B

*Точность и качество результатов расчетов как стационарных, так и переходных процессов в активной зоне реактора, в значительной степени зависят от процесса подготовки нейтронно-физических констант, который можно улучшить, обновив библиотеку ядерных данных программного продукта.*

*В статье представлен сравнительный анализ расчетов активной зоны реактора ВВЭР-1000 при помощи компьютерного кода DYN3D с константным обеспечением, подготовленным с применением программного продукта WIMSD5B и разных библиотек ядерных данных. Рассмотрена возможность использования некоторых библиотек, разработанных в рамках проекта модернизации библиотек WIMSD5B, и приведен сравнительный анализ полученных результатов.*

*Ключевые слова:* ВВЭР, DYN3D, WIMSD5B, библиотека ядерных данных, расчетная схема.

© В. В. Гальченко, А. А. Мішин, 2015

Програмний продукт WIMS (Winfrith Improved Multigroup Scheme) [1] — сімейство програмних кодів розрахунку чарунки реактора, яке дає змогу, ґрунтуючись на теорії перенесення нейтронів, розрахувати потік нейтронів залежно від енергії та положення в чарунці. Транспортний код WIMSD5B є одним з небагатьох доступних на некомерційній основі програмних продуктів даної категорії. WIMSD5B використовує метод імовірностей перших зіткнень у розв'язанні дискретних по енергії та простору рівнянь перенесення нейтронів, а також метод дискретних ординат —  $S_N$ -метод.

Програмний продукт WIMSD5B застосовується у підготовці малогрупових макроскопічних нейтронно-фізичних характеристик взаємодії для подальших розрахунків за допомогою кодів тривимірної кінетики активної зони — як для палива PWR, BWR, так і для палива ВВЕР [2, 3, 4]. WIMSD5B має власну 69-групову бібліотеку нейтронно-фізичних констант, яка містить 14 «швидких», 13 резонансних і 42 «теплові» групи. Бібліотека WL86 версії 1986 року [5] є модернізацією версії 1981 року, створеної на основі файлів оцінених ядерних даних (ФОЯД) JEF-1 та відкоригованої за емпіричними даними з метою досягнення узгодження між розрахованими та вимірними параметрами.

На початку 1990-х років під егідою МАГАТЕ стартував проект з модернізації бібліотек коду WIMSD5B. У результаті створено серію різних бібліотек на основі різних версій ФОЯД та у двох структурах: 69-групову і 172-групову [6]. Дані, оновлені в бібліотеках WIMSD5B, стосувалися спектра поділу, величин перерізів взаємодії, ланцюжків ядерних реакцій.

**Постановка мети дослідження.** Мета дослідження полягає в перевірці оновлених бібліотек і обґрунтуванні подальшого вибору бібліотеки для розрахунків характеристик палива ВВЕР.

Для досліджень обрано бібліотеки WIMSD5B, створені на базі ФОЯД ENDF/B, JEF, JEFF і JENDL у 69-груповому енергетичному наближенні. Бібліотеки відповідно називаються ENDFB6, ENDFB7, IAEA, JEF22, JEFF31, JENDL3.

У тестових розрахунках за програмою MCU було показано, що бібліотека WL86 має певну перевагу над попередньою версією WL81, а тому апріорно вважалося, що отримані з застосуванням бібліотеки WL86 результати є представницькими [7].

Порівняння даних розрахунку елементарної паливної чарунки ВВЕР-1000 за допомогою кодів SCALE-5 та WIMSD5B із застосуванням різних бібліотек наведено в [8]. Отримані результати засвідчують відмінності в розмножувальних характеристиках чарунки, ізотопному складі палива в процесі вигорання та коефіцієнтах реактивності. Відхилення в концентрації ізотопів урану та трансуранових елементів мають тенденцію до зростання зі збільшенням глибини вигорання палива, що пов'язується з різною структурою ланцюжків ядерних реакцій. Рівень відхилень між бібліотеками WIMSD5B за концентрацією ізотопів та коефіцієнтами реактивності — до 5 %.

Щоб провести подальші дослідження можливості застосування бібліотек WIMS для підготовки малогрупових макроскопічних характеристик, було підготовлено набір даних для ТВЗА ВВЕР-1000. З використанням константного забезпечення розраховано першу — сьому паливну кампанії енергоблока № 2 Хмельницької АЕС і, таким чином, отримано окремий розподіл глибин вигорання на початок восьмої паливної кампанії для кожної бібліотеки з урахуванням перевантажень.

**Розрахункова схема ТВЗ ВВЕР для WIMSD5B.** Основна особливість розрахункової схеми ТВЗ ВВЕР-1000 для WIMSD5B пов'язана з тим, що касета реактора ВВЕР має шестигранну геометрію (детальний опис розрахункової схеми ТВЗ ВВЕР-1000 та її особливостей наведено в [9]). Оскільки використано версію програмного продукту розроблено для моделювання ТВЗ реакторів типу PWR, BWR, унеможливлено створення розрахункової схеми ТВЗ у гексагональній геометрії. Тому на початковому етапі треба замінити гексагональну касету на еквівалентну їй за площею круглу, зберігши при цьому уран-водне співвідношення. Виконання цієї умови дає можливість говорити, що кількість і тип взаємодій нейтронів з матеріалами в гексагональній касеті та в еквівалентній їй круглій залишаються незмінними.

Зазначимо, що вказаний підхід вносить певну похибку в процес підготовки макроскопічних малогрупових характеристик, яка дорівнює приблизно 5 % на кінець вигорання [9] і перевищує значення, встановлене чинними нормативними документами для розрахунку кампанії реактора. Але, наприклад, в аналізі проектних аварій такий підхід можливий, оскільки протікання перехідного процесу прогнозуватиметься однаково коректно за рівних інших умов, а покращення бібліотеки мікроскопічних характеристик дасть змогу більш коректно відслідковувати ефекти реактивності при розрахунках.

**Розрахункова схема для коду DYN3D.** Програмний продукт DYN3D [10] призначено для розрахунку стаціонарних та аварійних режимів реакторів у тривимірній гексагональній геометрії. Структурно DYN3D містить блок нейтронної кінетики та блок теплогідравліки, причому останній розраховує теплогідравлічні параметри лише в межах активної зони реактора.

Розрахункова схема активної зони ВВЕР-1000 для програмного продукту DYN3D (рис. 1) в плані складається з гексагональних призм, що відповідають ТВЗ. Призми за висотою розбито на 20 рівних шарів. Для кожної призми в кожному шарі задається набір нейтронно-фізичних

констант, що відповідає типу ТВЗ та наявності (або відсутності) органів регулювання.

Перерізи готувалися за певним заданим базовим (референсним) станом, для якого проводився розрахунок по вигоранню. Параметри референсного стану для розрахунків ТВЗА ВВЕР-1000 такі:

Температура теплоносія ..... 578,0 К  
 Температура палива ..... 578,0 К  
 Густина теплоносія ..... 0,71614 г/см<sup>3</sup>  
 Концентрація рідкого поглиначя (H<sub>2</sub>BO<sub>3</sub>) ..... 6,0 г/кг

У кожній точці по вигоранню визначалася частинна похідна з окремою зміною параметра:

Температура теплоносія ... 350, 450, 650 К  
 Температура палива ..... 800, 1500, 2000 К  
 Густина теплоносія ..... 0,35, 0,55, 0,95 г/см<sup>3</sup>  
 Концентрація рідкого поглиначя (H<sub>2</sub>BO<sub>3</sub>) ..... 0,0, 2,0, 4,0, 8,0, 10,0, 12,0, 14,0, 16,0 г/кг

Розрахунок проводився окремо як для випадку без органів регулювання, так і з ними.

Після обробки отриманого масиву макроскопічних характеристик двох енергетичних груп визначались відповідні апроксимаційні коефіцієнти згідно з вимогами програмного продукту [10]. Набір апроксимаційних коефіцієнтів готувався окремо для кожної з указаних бібліотек і кожного типу ТВЗ, які використовувалися в процесі формування паливних завантажень енергоблока № 2 Хмельницької АЕС.

З метою дослідження впливу бібліотек обрано восьме паливне завантаження енергоблока № 2 Хмельницької АЕС [11], картограму якого наведено на рис. 2. Цей вибір зумовлено певною, об'єктивно спричиненою несиметричністю завантаження активної зони та вмістом досить великої кількості різних типів ТВЗ (з діаметром центрального отвору палива як 1,5 мм, так і 1,4 мм).

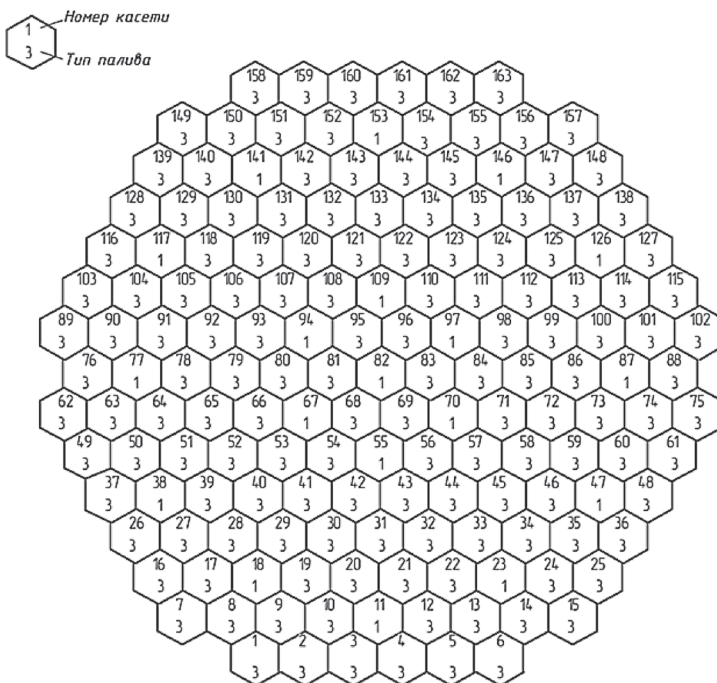


Рис. 1. Розрахункова схема активної зони ВВЕР-1000 для коду DYN3D

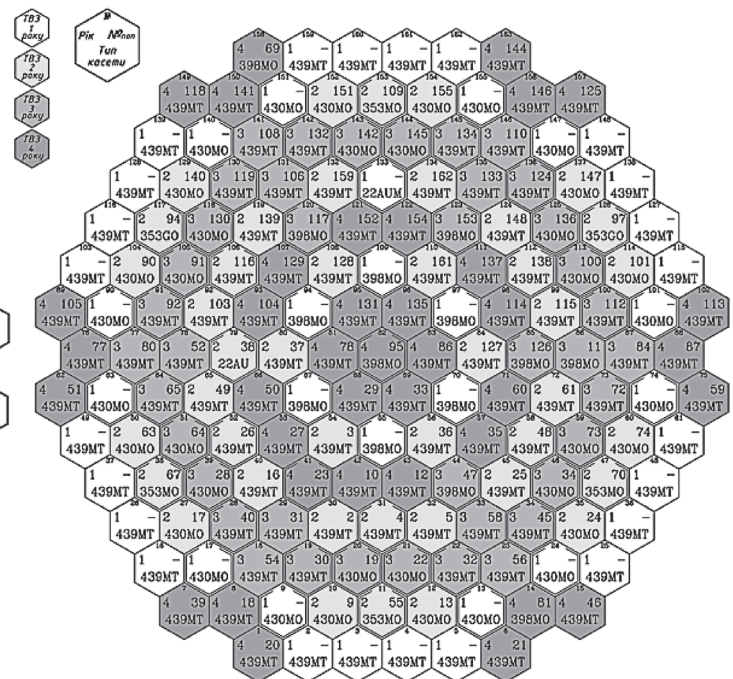


Рис. 2. Картограма восьмого паливного завантаження для енергоблока № 2 Хмельницької АЕС

**Результати аналітичних досліджень.** За допомогою константного забезпечення, отриманого на етапі підготовки даних, розраховано з першої по сьому паливні кампанії енергоблока № 2 Хмельницької АЕС і, таким чином, отримано окремий розподіл глибин вигорання на початок восьмої паливної кампанії для кожної бібліотеки з урахуванням перевантажень. Відхилення в розрахованій за різними бібліотеками глибині вигорання лежить в межах 5 %.

Результати розрахунків характеристик паливного циклу порівняно з даними звіту [11] щодо цього паливного завантаження.

Графік залежності тривалості восьмої паливної кампанії в обрахунках за різними бібліотеками наведено на рис. 3. Очікувана тривалість становила 305 ефективних діб, реальна — 310,12 [11].

Найбільш близьку тривалість дали розрахунки з константним забезпеченням, отриманим за допомогою JEF2.2, дещо меншу — розрахунки із застосуванням бібліотеки IAEA. Відхилення для інших бібліотек більші. При цьому WL'86 переоцінює тривалість кампанії, інші розглянуті бібліотеки — недооцінюють у межах до 25 діб. Таке відхилення (близько 8 %) у визначенні тривалості паливного завантаження за різними бібліотеками погоджується з відхиленням прогнозування концентрації паливних ізоотопів з вигоранням, як показано в [8]. Проте для остаточного коректного висновку потрібні детальніший опис самих бібліотек і подальші дослідження.

Відхилення розрахункових даних по коефіцієнтах нерівномірності енерговиділення від експериментальних (відновлених) розглянуто для чотирьох моментів кампанії,

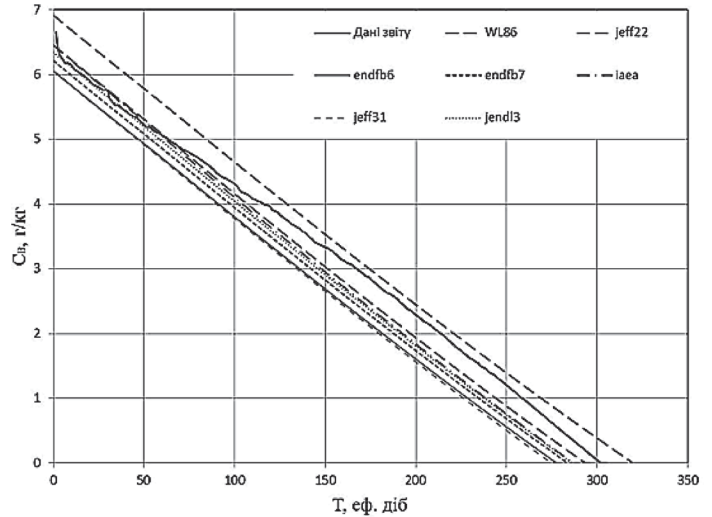


Рис. 3. Тривалість восьмої паливної кампанії по бору

що відповідають початку, середині й кінцю кампанії по бору, тобто охоплюють увесь діапазон тривалості кампанії (табл. 1).

Максимальні відхилення відносного енерговиділення із зазначенням касет, де вони спостерігалися, для чотирьох згаданих вище моментів кампанії від відновлених значень наведено в табл. 2—5. Для інших касет відхилення енерговиділення лежить у межах 3 %.

Таблиця 1. Концентрація борної кислоти в різних точках паливної кампанії

Момент кампанії, еф. діб	Концентрація борної кислоти, г/кг							
	виміряна	WL'86	ENDFB6	ENDFB7	IAEA	JEF2.2	JEFF3.1	JENDL3
24	6,0	6,4	5,5	5,7	5,9	5,9	5,5	5,8
95	4,3	4,8	3,9	4,1	4,2	4,3	3,9	4,2
154	3,0	3,4	2,6	2,7	2,9	2,9	2,6	2,8
234	1,3	1,7	0,8	1,0	1,1	1,2	0,8	1,1

Таблиця 2. Максимальні відхилення  $K_q$  на 23,8 еф. діб

№ ТВЗ	Відхилення $K_q$ , %						
	WL'86	ENDFB6	ENDFB7	IAEA	JEF2.2	JEFF3.1	JENDL3
82	8,62	11,67	7,99	7,67	7,67	8,62	7,83
81	7,07	9,78	6,82	6,58	6,58	7,31	6,70
55	6,96	7,10	5,78	5,48	5,48	5,85	6,00

Таблиця 3. Максимальні відхилення  $K_q$  на 95 еф. діб

№ ТВЗ	Відхилення $K_q$ , %						
	WL'86	ENDFB6	ENDFB7	IAEA	JEF2.2	JEFF3.1	JENDL3
82	6,00	8,08	5,38	5,54	5,54	5,84	5,38
5	5,21	7,84	5,66	4,76	5,10	6,22	4,98
69	4,76	6,75	4,76	4,88	5,00	5,12	4,76



Таблиця 4. Максимальні відхилення  $K_q$  на 154 еф. діб

№ ТВЗ	Відхилення $K_q$ , %						
	WL'86	ENDFB6	ENDFB7	IAEA	JEF2.2	JEFF3.1	JENDL3
148	6,34	8,55	6,68	5,88	6,34	7,03	6,00
5	6,22	8,43	6,45	5,77	6,11	6,91	5,77
16	6,00	8,20	6,22	5,54	6,00	6,68	5,54

Таблиця 5. Максимальні відхилення  $K_q$  на 234 еф. діб

№ТВЗ	Відхилення $K_q$ , %						
	WL'86	ENDFB6	ENDFB7	IAEA	JEF2.2	JEFF3.1	JENDL3
148	7,41	9,17	7,41	7,07	7,30	7,76	6,84
160	5,97	7,74	6,18	5,77	6,08	6,49	5,67
5	6,11	7,84	6,11	5,77	6,00	6,45	5,54

Розрахункові поля енерговиділення відповідають відновленим, проте результати, отримані з використанням бібліотек WL'86, JEF2.2 та IAEA, дещо ближчі до експериментальних даних. У цілому відхилення значень  $K_q$  збільшується для касет з більшими глибинами вигорання.

#### Висновки

Наведені дані свідчать про те, що за відповідністю поля енерговиділення та тривалістю кампанії найбільш коректні результати отримано з використанням на етапі підготовки констант бібліотек JEF2.2, WL'86, IAEA. Інші бібліотеки дають відхилення у розрахунках, які роблять їх непридатними для подальшого використання. Наступним кроком буде порівняння ефектів реактивності й «ваги» СУЗ для обраних трьох бібліотек.

Проведені дослідження показують, що бібліотеку JEF2.2 можна застосовувати для заміни WL'86 під час підготовки макроскопічних характеристик палива ВВЕР з метою подальшого аналізу перехідних процесів, пов'язаних зі зміною реактивності й перерозподілом енерговиділення.

#### Список використаної літератури

1. *J. R. Askew, F. J. Fayes, P. B. Kemshell*, (1966), "A general Description of the lattice Code WIMS", Journal of British Nuclear Energy Society, 5(1), pp. 564–584.
2. Отчёт о научно-исследовательской работе: Программа WIMS-D на ЭВМ ЕС-1040 / Ин-т атомной энергии им. Курчатова. — М., 1979. — 272 с. — Инв. № 35/90479.
3. *Жердев Г. М.* Аннотация комплекса программ WIMS/ABBN / Г. М. Жердев, А. М. Цибуля // Ядерные константы. — М., 2000. — Вып. 2. — С. 107–113.
4. *Шкарупа А. М.* Анализ переходных процессов на АЭС с реакторами типа ВВЭР / А. М. Шкарупа, В. В. Гальченко // Промышленная теплоэнергетика. — К., 2002. — Т. 24, № 2–3. — С. 121–127.
5. *Halsall M. J., Taubman C. J.* (1986), The '1986' WIMS Nuclear Data Library, AEE, Dorset, p. 38.
6. Final Report of a Coordinated Research Project "WIMS-D Library update". — Vienna : IAEA, 2007. — 321 p.

7. *Неделин О. В.* Влияние температуры топлива на накопление изотопов плутония в топливе реактора типа ВВЭР / О. В. Неделин, В. В. Гальченко, О. Б. Маслов // Тр. Одесского политехнического университета. — Одесса, 2002. — Вып. 2(18). — С. 58–61.

8. *Гальченко В. В.* Валідація бібліотек ядерних даних для коду WIMSD5B / В. В. Гальченко, А. А. Мішин, В. В. Муха, Н. М. Рабченко // Щорічна наук. конф. ІЯД НАНУ. — Київ, 2014. — С. 112–113.

9. *Гальченко В. В.* Сравнительный анализ подготовки данных с использованием различных компьютерных кодов. Часть 2 / В. В. Гальченко // Ядерні та радіаційні технології. — К., 2007. — Т. 7 (№ 3–4). — С. 29–42.

10. *U. Grundmann, U. Rohde, S. Mittag, S. Kliem* (2005), "DYN3D Version 3.2. Code for Calculation of Transients in Light Water Reactors (LWR) with Hexagonal or Quadratic Fuel Elements", Report FZR-434, Rossendorf, p. 144.

11. Обоснование девятой топливной загрузки энергоблока № 2 Хмельниковой АЭС. Расчетная имитация работы реактора и сопоставление расчетных и экспериментальных данных : Отчет / ОП ХАЭС. — Нетешин, 2013. — 43 с. — Инв. № 434.

#### References

1. *Askew, J.R., Fayes, F.J., Kemshell, P.B.* (1966), "A General Description of the Lattice Code WIMS", Journal of British Nuclear Energy Society, 5(1), pp. 564–584.
2. R&D Report "WIMS-D Program on EC-1040 Computer" [Отчет о научно-исследовательской работе: Программа WIMS-D на ЭВМ ЕС-1040], Moscow, Kurchatov Institute of Nuclear Energy, Inv. No. 35/90479, 1979, p. 272. (Rus)
3. *Zherdiaev, G.M., Tsybulia, A.M.* (2000), "Notes of the WIMS/ABBN code" [Annotaciya kompleksa program WIMS/ABBN], Nuclear Constants, Moscow, Issue No. 2, pp. 107–113. (Rus)
4. *Shkarupa, A.M., Galchenko, V.V.* (2002), "Transient Analysis at NPP with VVER Reactor" [Analiz perekhodnykh protsessov na AES s reaktorami tipa VVER], Industrial Heat Engineering, Vol. 24, No. 2–3, p. 121–127. (Rus)
5. *Halsall, M.J., Taubman, C.J.* (1986), The '1986' WIMS Nuclear Data Library, AEE — Dorset, 38 p.
6. WIMS-D Library Update: Final Report of a Coordinated Research Project Vienna: IAEA, 2007, p. 321. 07–00476.
7. *Nedelin, O.V., Galchenko, V.V., Maslov, O.B.*, (2002), "Impact of the Fuel Temperature on Accumulation of Plutonium Isotopes in VVER-type Reactor Fuel" [Vliianie temperatury topliva

na nakopleniie izotopov plutoniia v toplive reaktora tipa VVER], Odessa Polytechnic University, Odessa, Ed. 2(18), pp. 58-61. (Rus)

8. Galchenko, V.V., Mishyn, A.A., Mukha, V.V., Rabcheniuk, N.M. (2014), "Validation of Nuclear Data Libraries for WIMSD5B Code" [Validatsiia bibliotek yadernykh danykh dlia kodu WIMSD5B]. Proceedings of the Annual Scientific Conference, Institute of Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, p. 112-113. (Ukr)

9. Galchenko, V.V. (2007), "Comparative Analysis of Data Preparation Using Different Computer Codes. Part 2" [Srvnitelnyi analiz podgotovki danykh s ispolzovaniem razlichnykh kompiuternykh kodov. Chast' 2], Nuclear and Radiation Technologies. Vol. 7 (No. 3-4), p 29-42. (Rus)

10. Grundmann, U., Rohde, U., Mittag, S., Kliem, S. (2005), "DYN3D Version 3.2. Code for Calculation of Transients in Light Water Reactors (LWR) with Hexagonal or Quadratic Fuel Elements", Report FZR-434, Rossendorf, p. 144.

11. "The Ninth Fuel Load Substitution for KhNPP-2. Reactor Operation Computer Simulation, Experimental and Calculation Data Correlation" [Obosnovanie deviatoy toplivnoy zagruzki energobloka No. 2 Khmel'nitskoy AES. Raschetnaya imitatsiia raboty reaktora i sopostavlenie raschetnykh i eksperimentalnykh danykh]. KhNPP, Neteshin, 2013, Inv. No. 1434. (Rus)

Отримано 13.02.2015.