

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВКАХ

*В.В. Ганн, А.М. Абдуллаев, А.И. Жуков, С.В. Марехин, С.А. Солдатов*  
 Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”,  
 Харьков, Украина

Описан опыт применения комплексов программ ALPHA-N/RHOENIX-N/ANC-N (APA) и MCNP для расчета нейтронно-физических характеристик топливных сборок и моделирования активных зон реакторов типа ВВЭР-1000. Методом Монте-Карло с использованием программы MCNP проведены расчеты распределения нейтронных полей и потвзльного распределения энерговыделения для различных типов ТВС активной зоны. Разработана MCNP-модель активной зоны блока №3 Запорожской АЭС. Рассчитаны программным комплексом APA и кодом MCNP потвзльные энерговыделения в активной зоне. Сравнение показывает высокую точность расчетов APA значений энерговыделения твэлов в ТВС активной зоны.

## 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ ALPHA-N/RHOENIX-N/ANC-N

Система ALPHA-N/RHOENIX-N/ANC-N применяется в настоящее время для проектирования активной зоны энергоблока №3 Южноукраинской АЭС (ЮУАС), в котором используется альтернативное топливо. С использованием этой системы была также промоделирована история выгорания активной зоны энергоблока №3 Запорожской АЭС (ЗАЭС) на протяжении 1...16 топливных кампаний и выполнен расчет 17-19-й топливных загрузок, со-

держающих новые кассеты ТВСА. Программа трехмерного моделирования активной зоны ANC-N применялась для расчетов критической концентрации бора, глубины выгорания топлива, распределения энерговыделения и коэффициентов неравномерности выделяемой мощности, коэффициентов реактивности и эффективности органов регулирования СУЗ с учетом выгорания поглотителей и накопления изотопов Хе и Sm. Расчётные значения сравнивались с эксплуатационными данными. Поля энерговыделения, рассчитанные для различных моментов кампании, сравнивались со значениями, восстановленными по измеренным токам ДПЗ кодом BEACON системы мониторинга активной зоны.

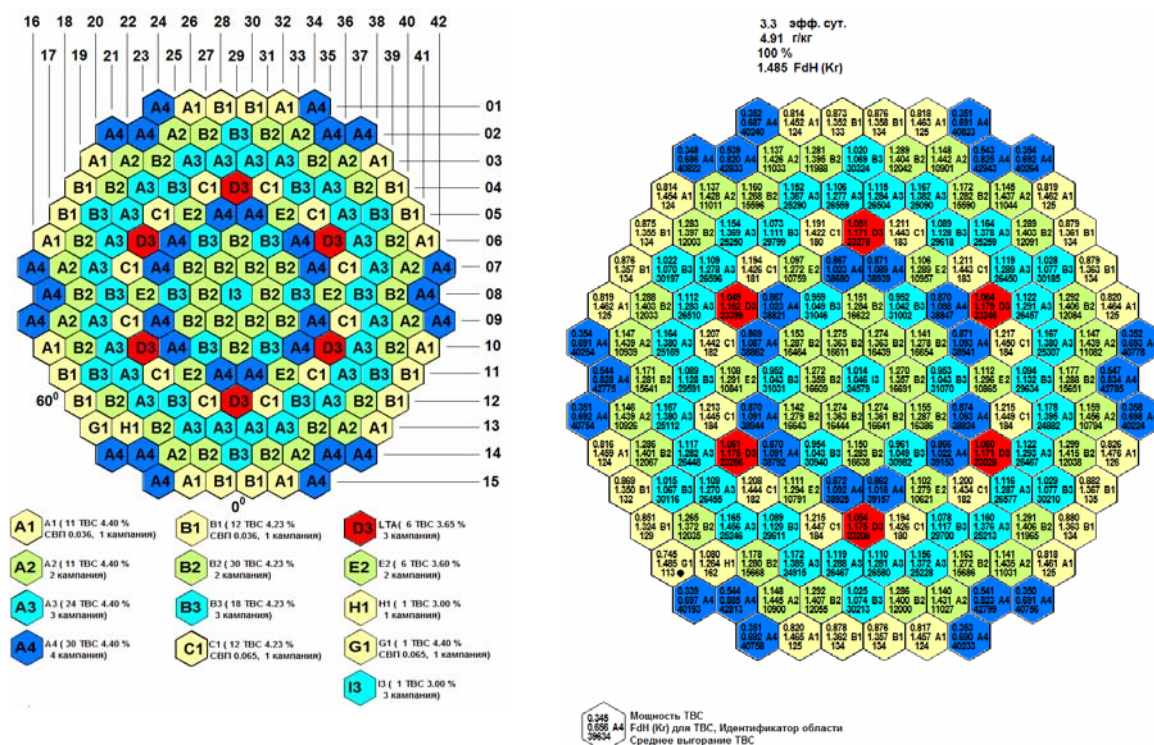


Рис.1. Картограмма загрузки для 19-й топливной кампании блока №3 ЮУЭС и распределение энерговыделения и выгорания ТВС на 3.3 эф. сут

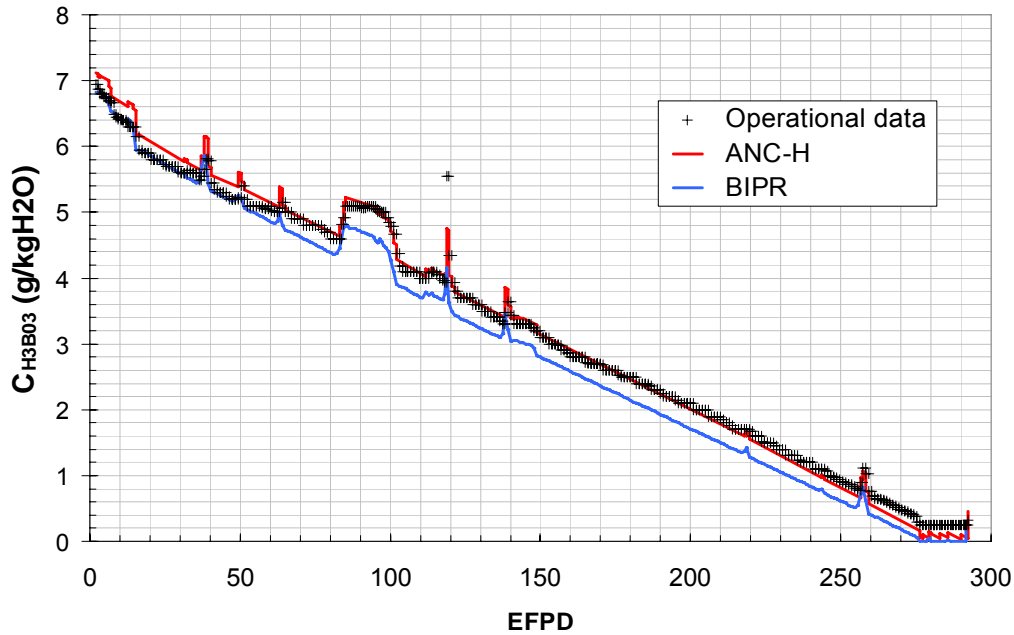


Рис. 2. Эксплуатационные данные 19-й топливной кампании блока №3 ЗАЭС и расчётные зависимости критической концентрации борной кислоты

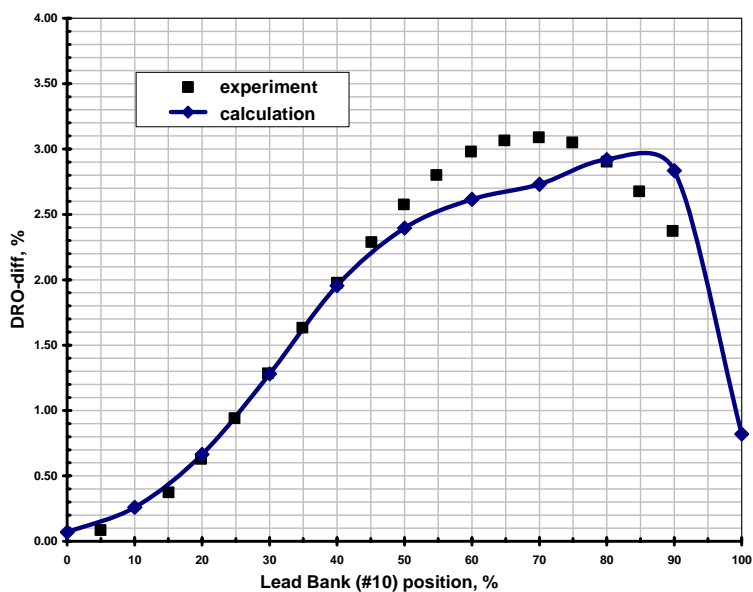


Рис. 3. Дифференциальная эффективность 10-й группы управляющих стержней блока №3 ЗАЭС, 19-й топливный цикл: точки – эксперимент, кривая – расчет по ALPHA-PHOENIX-H

На рис.1 показана картограмма загрузки ТВС в зону для 19-й топливной кампании блока №3 ЮУЭС (слева) и значения мощностей, коэффициентов неравномерности выделяемой мощности и выгораний ТВС на 3.3 эффективных суток работы блока (справа). Красным цветом показаны ТВС альтернативного топлива (D3).

На рис. 2 представлено сравнение расчётной зависимости критической концентрации борной ки-

слоты от времени работы реактора для 19-й топливной кампании блока №3 ЗАЭС с соответствующими эксплуатационными данными и с расчётами по программе БИПР.

На рис. 3 приведены результаты расчета по программе ALPHA-PHOENIX-H дифференциальной эффективности 10-й группы управляющих стержней блока №3 ЗАЭС в сравнении с эксплуатационными данными.

## 2. РАСЧЕТ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНЫХ ЗОН РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК И ПОДКРИТИЧЕСКИХ СБОРОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ SCALE/MCNPX

Комплекс программ SCALE/MCNPX используется для проектирования, моделирования радиационных процессов и расчета нейтронно-физических характеристик отдельных ТВС, активной зоны реактора ВВЭР-1000, бассейна выдержки и временных хранилищ отработанного ядерного топлива, а также подкритических сборок, управляемых линейными ускорителями электронов. Структура комплекса программ SCALE/MCNPX показана на рис. 4.

Система MCNPX является программой широкого спектра применения, которая методом Монте-Карло моделирует движение электронов, фотонов, нейтронов

и других элементарных частиц в системе со сложной геометрией, содержащей делящиеся материалы. Программа использует библиотеки сечений и различные ядерные модели для расчета взаимодействия частиц с ядрами при высоких энергиях. Программа MCNPX использовалась для анализа критичности реакторных систем, а также для расчета распределения нейтронных полей и потвального распределения энерговыделения в топливных сборках с учетом выгорания топлива и накопления продуктов деления. Для этих целей были рассчитаны библиотеки нейтронных сечений, зависящих от температуры.

Программа SCALE имеет удобный интерфейс, который позволяет эффективно использовать эту программу для расчета большого количества вариантов загрузки делящегося материала и подробного анализа различных сценариев развития проектных аварий.

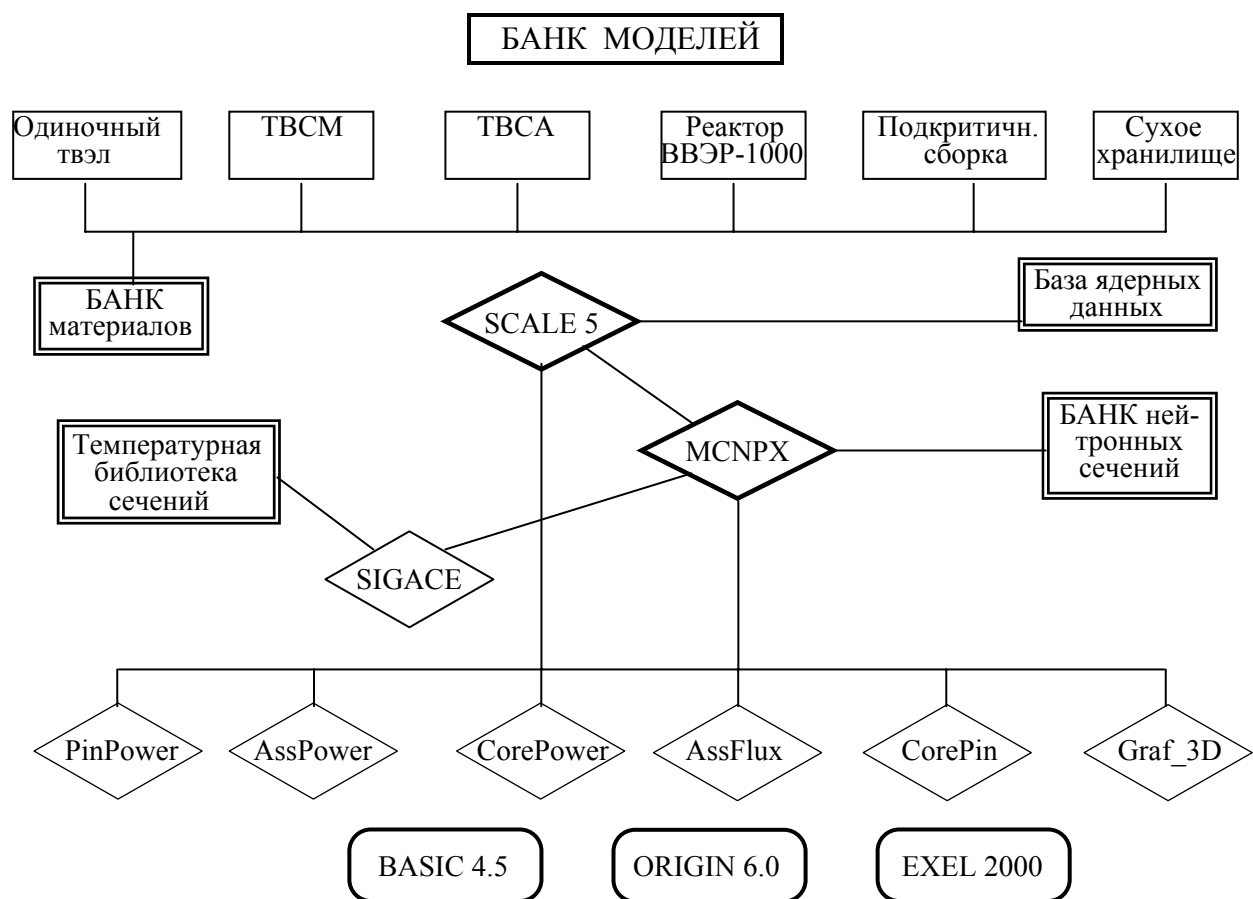


Рис. 4. Структура комплекса программ SCALE/MCNPX

## 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ТОПЛИВНЫХ СБОРКАХ ТВСМ И ТВСА

С использованием комплекса программ SCALE/MCNPX были рассчитаны нейтронно-физические характеристики топливных сборок типа

ТВСМ (рис. 5) и ТВСА (рис. 8). На рис.6 и 7 показано распределение энерговыделения по рядам ТВСМ 4,4 %, рассчитанное по программе MCNPX в сопоставлении с результатами программы ALPHA-PHOENIX-H, а на рис. 9 – то же для ТВСА.

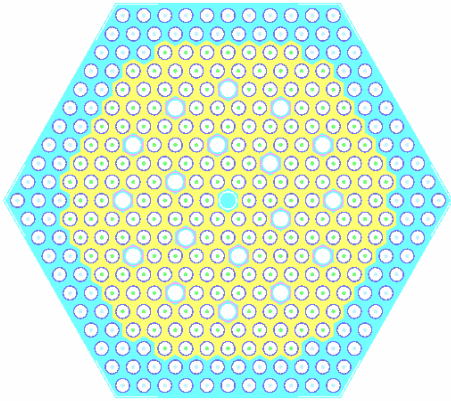


Рис.5. Поперечное сечение TBCM

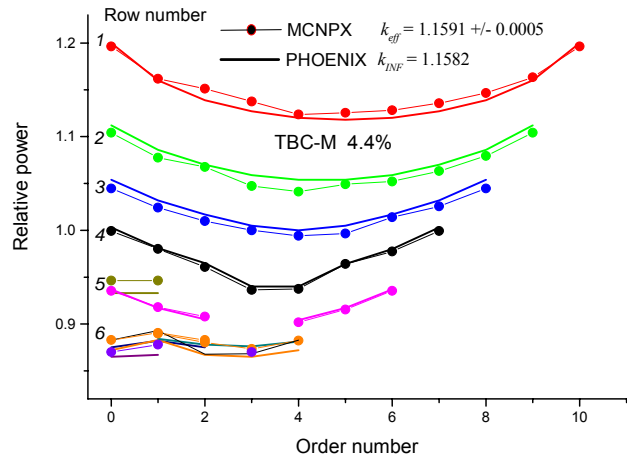


Рис.6. Распределение энерговыделения по рядам TBCM 4,4 %: жирные линии – расчет по ALPHA-PHOENIX-H; точки – расчет по MCNPX

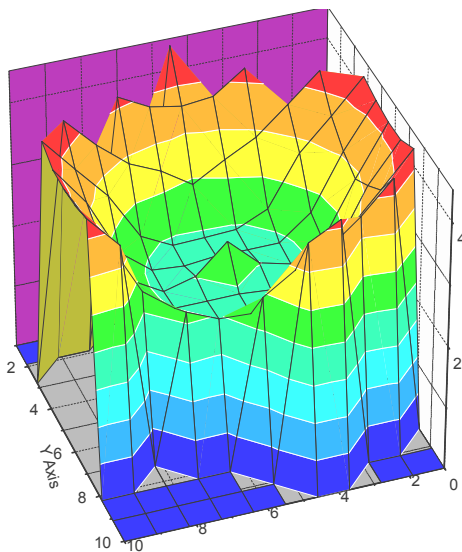


Рис.7. Распределение энерговыделения в кассете TBCM 4,4 %

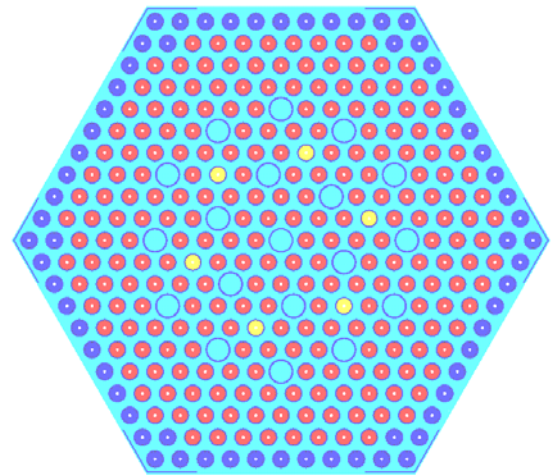


Рис.8. Поперечное сечение TBCA 390GO: синие кружки - твэлы с обогащением 3.6%, красные – 4.0%, желтые – твэлы с обогащением 3.3%

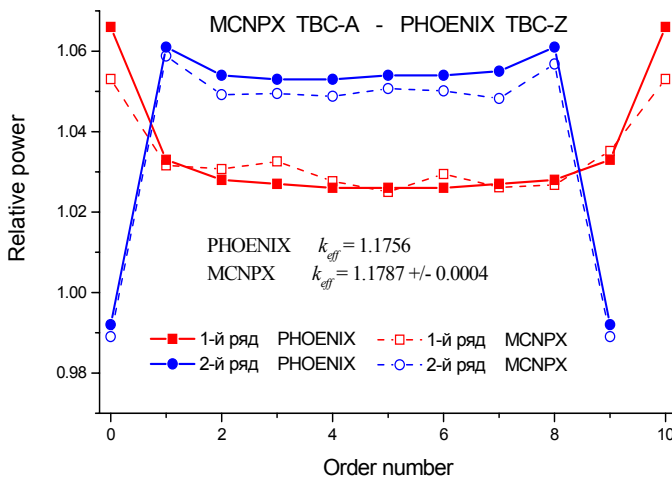


Рис.9. Энерговыделение в двух крайних рядах твэлов: жирные точки – расчет TBCZ по ALPHA-PHOENIX-H, открытые точки – расчет TBCA по MCNPX

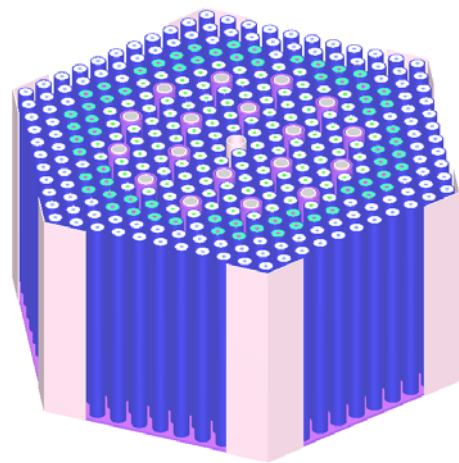


Рис.10. Графическое представление TBCA 390GO в модели MCNPX

ТВСА отличается от ТВСМ наличием уголков жесткости (рис. 10), а также тепловыделяющих элементов - твэгов, содержащих гадолиний в качестве выгорающего поглотителя. В комплексе программ ALPHA-N/PHOENIX-N/ANC-N наличие уголков

жесткости было учтено путем утолщения оболочек угловых твэлов (рис. 11, справа), эквивалентность такой замены подтверждалась сравнением с расчетами по программе MCNPX.

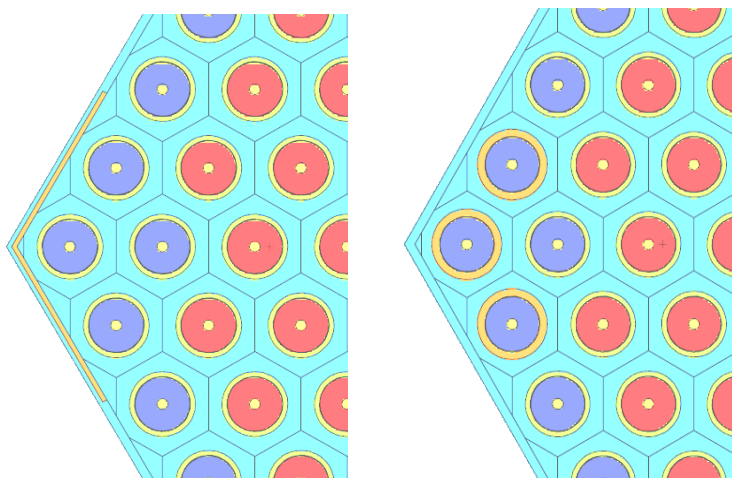


Рис.11. Поперечное сечение ТВСА – слева и ТВСЗ – справа

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ MCNPX

На рис. 12 показаны осевое и поперечное сечения активной зоны реактора ВВЭР-1000 из банка

моделей комплекса SCALE/MCNPX, а на рис. 13 – результаты расчетов энерговыделений в двух крайних рядах твэлов для центральной сборки в группе семи ТВСА.

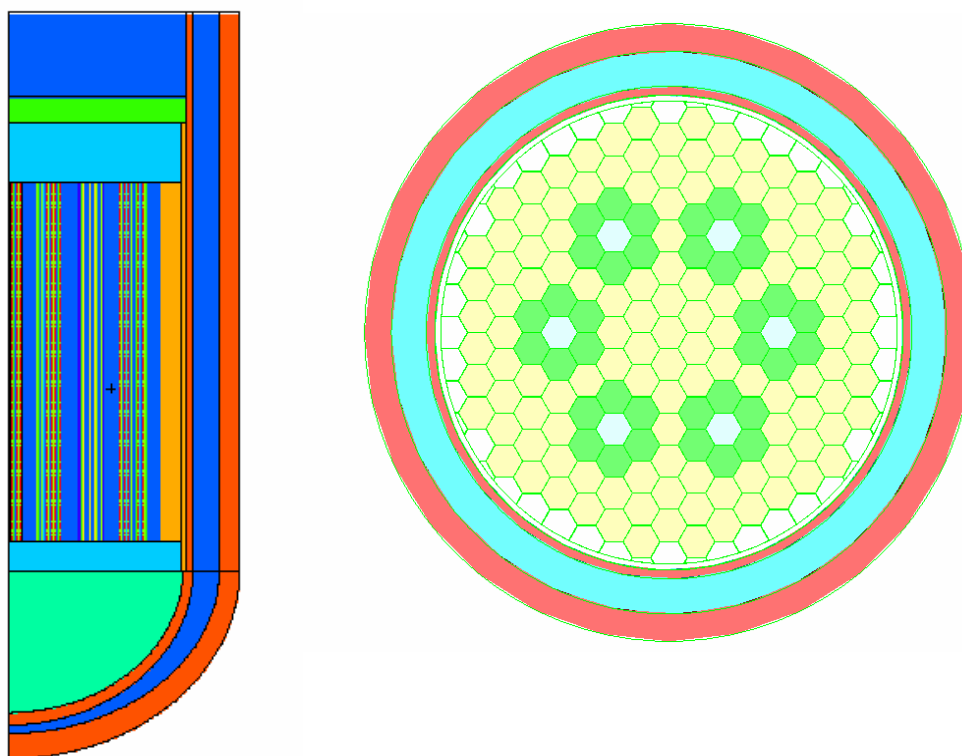


Рис.12. Модель активной зоны реактора ВВЭР-1000 в программе MCNPX: зеленые – ТВСА, желтые – ТВСА



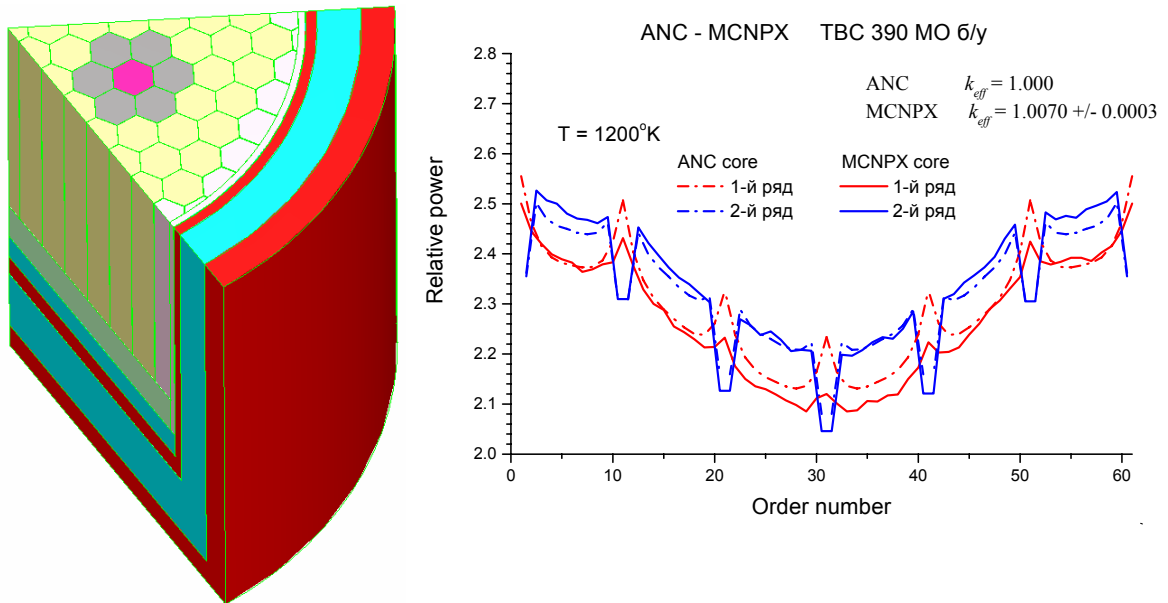


Рис.13. Сравнение расчетов потвэльных энерговывделений в ТВСА в модельной активной зоне, проведенных программами MCNPX и ANC-H

### 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННЫХ ПОЛЕЙ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ БЛОКА №3 ЗАЭС (1-й топливный цикл) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ MCNPX

С использованием комплекса программ SCALE/MCNPX были также проведены расчеты критичности активной зоны, распределения ней-

тронных полей и покассетного распределения энерговывделения для 1-й топливной загрузки блока №3 ЗАЭС. Результаты расчетов приведены на рис. 14 в сравнении с данными расчетов по программам ALPNA-H/PHOENIX-H/ANC-H. На рис. 15 изображены аксиальные распределения энерговывделений по кассетам и значения офсета зоны после выхода блока на мощность.

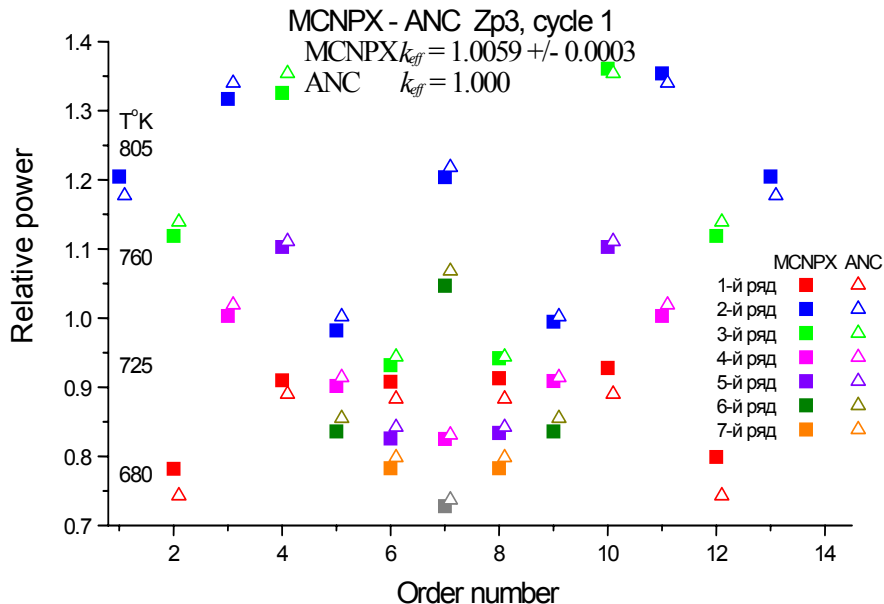


Рис.14. Распределение энерговывделения в зоне блока №3 ЗАЭС по рядам ТВС: жирные квадраты – расчет по MCNPX; треугольники – по ALPHA-PHOENIX-H

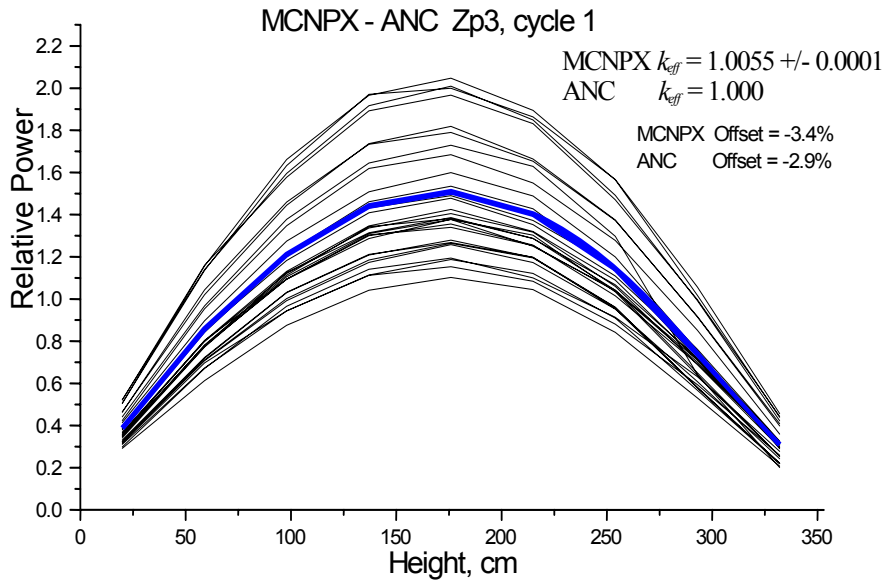


Рис.15. Аксиальные распределения энерговыделений по кассетам и значения оффсета зоны после выхода на мощность блока №3 ЗАЭС, рассчитанные по MCNPX и по ALPHA-PHOENIX-H

### 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В СБОРКЕ ТВСА 390GO

Комплексы программ ALPHA-H/PHOENIX-H/ANC-H и SCALE/MCNPX использовались для моделирования процессов накопления продуктов

деления при выгорании топливных сборок. На рис. 16 представлены зависимости, характеризующие изменение концентрации продуктов деления от глубины выгорания топлива, а на рис. 17 – изменение критичности сборки ТВСА 390GO в зависимости от глубины выгорания топлива.

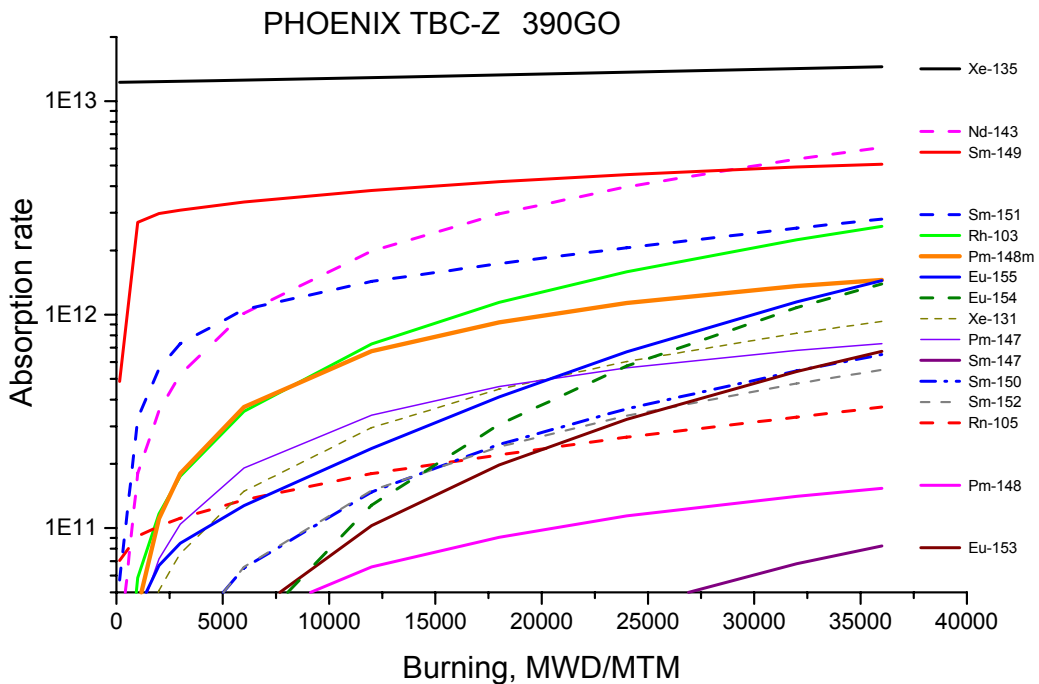


Рис.16. Зависимости от глубины выгорания топлива скоростей поглощения тепловых нейтронов продуктами деления, рассчитанные по ALPHA-PHOENIX-H

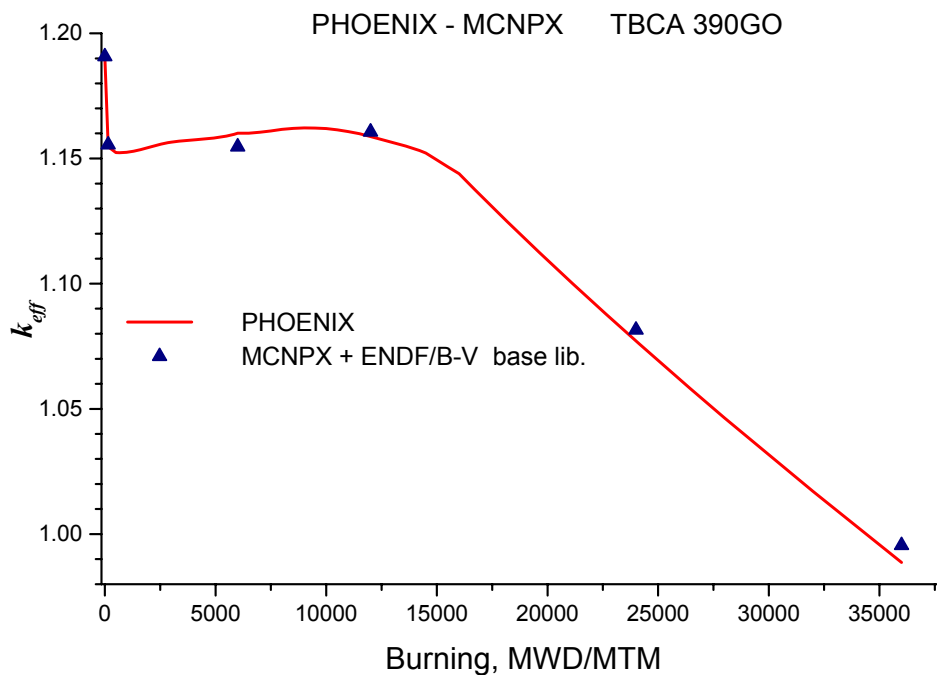


Рис.17. Зависимость эффективного коэффициента размножения нейтронов в сборке TBCA 390GO от глубины выгорания: красная линия – расчет по ALPHA-PHOENIX-H, треугольники – расчет по MCNPX

## 7. АНАЛИЗ ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ БАСЕЙНА ВЫДЕРЖКИ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ SCALE

Программа SCALE использовалась для анализа ядерной безопасности бассейна выдержки отработанного ядерного топлива на блоке №1 Ровенской АЭС. Была разработана SCALE-модель бассейна,

загруженного отработанными ТВС и заполненного борированной водой (рис. 18). Рассматривалась гипотетическая авария с вскипанием охлаждающей жидкости в бассейне и рассчитывалась зависимость эффективного коэффициента размножения нейтронов  $k_{eff}$  от плотности пароводяной смеси, образующейся при вскипании воды.

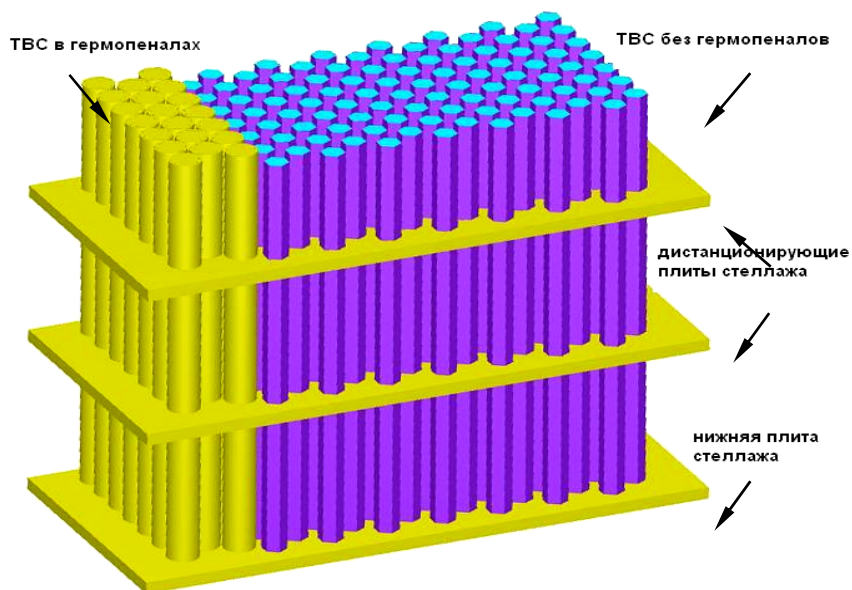


Рис.18. Модель фрагмента секции бассейна выдержки на блоке №1 РАЭС



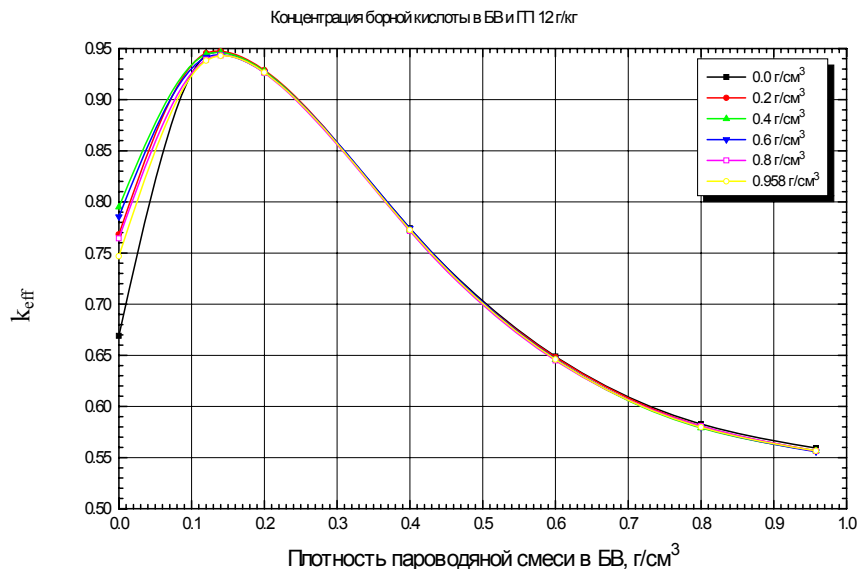


Рис.19. Зависимость  $k_{eff}$  от плотности пароводяной смеси в бассейне выдержки при различных плотностях пароводяной смеси в гермопенале

Проведенные расчеты показывают (рис. 19), что при снижении плотности пароводяной смеси  $k_{eff}$  системы может существенно возрасти, и это следует учитывать в регламенте эксплуатации бассейна выдержки, поддерживая надлежащую концентрацию борной кислоты в воде.

### ВЫВОДЫ

1. Комплексы программ ALPHA-H/PHOENIX-H/ANC-H и SCALE/MCNPX являются мощными средствами проектирования активных зон и расчета нейтронно-физических характеристик реакторных

установок, а также эффективными инструментами моделирования радиационных процессов в материалах ядерных реакторов и подкритических сборок.

2. Опыт применения программ ALPHA-H/PHOENIX-H/ANC-H и SCALE/MCNPX показывает хорошее взаимное согласие результатов расчетов по программам SCALE, MCNPX и ALPHA-H/PHOENIX-H/ANC-H, а также их соответствие экспериментальным результатам.

Статья поступила в редакцию 10.09.2008 г.

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У РЕАКТОРНИХ УСТАНОВКАХ

*В.В. Гани, А.М. Абдуллаев, О.І. Жуков, С.В. Марьохин, С.А. Солдатов*

Описано досвід вживання комплексів програм ALPHA-H/PHOENIX-H/ANC-H (APA) і MCNP для розрахунку нейтронно-фізичних характеристик паливних складок і моделювання активних зон реакторів типу ВВЕР-1000. Методом Монте-Карло з користуванням програми MCNP проведено розрахунки розподілу нейтронних полів і потвельного розподілу енерговиділення для різних типів ТВС активної зони. Розроблена MCNP-модель активної зони блоку №3 Запорізькою АЕС. Розраховано програмним комплексом APA і кодом MCNP потвельні енерговиділення в активній зоні. Порівняння показує високу точність розрахунків APA значень енерговиділення твел в ТВС активної зони.

## COMPUTER SIMULATION OF RADIATION PROCESSES IN REACTOR FACILITIES

*V.V. Gann, A.M. Abdullayev, A.I. Zhukov, C.V. Maryokhin, S.A. Soldatov*

The paper describes experience of the code system ALPHA-H/PHOENIX-H/ANC-H (APA) and the code MCNP usage for fuel assembly neutronic calculations and modeling of VVER-1000 reactor core. Using Monte Carlo code MCNP, calculations of neutron field and pin-by-pin energy deposition distributions are provided for different type of assemblies in reactor core. An MCNP model for unit №3 Zaporozhye NPP reactor core was designed. Calculations for pin-by-pin energy deposition in the reactor core were performed using the code system APA and the code MCNP. Comparison of these calculations shows rather high precision of APA calculation for energy deposition in the fuel rods and assemblies operated in the reactor core.