

Известия НАН Армении, Физика, т.58, №3, с.283–292 (2023)

УДК 621.039.51

DOI:10.54503/0002-3035-2023-58.3-283

## ВАЛИДАЦИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ВЫГОРАНИЯ ПРОГРАММЫ PARCS-PATHS ДЛЯ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР-440

А.Г. УГУДЖЯН

Научно-технический центр ядерной и радиационной безопасности, Ереван, Армения

e-mail: aniugujyan@gmail.com

(Поступила в редакцию 16 мая 2023 г.)

В рамках трехмерной модели исследован процесс выгорания активной зоны реактора ВВЭР-440 с использованием измерений эксплуатационных циклов Армянской АЭС (ААЭС). Результаты моделирования показали, что исследование модели, в которой учитывается только зависимость от температуры теплопроводности топлива PATHS (PARCS Advanced Thermal Hydraulic Solver) приводит к расхождениям с измеренными значениями концентрации бора по мере увеличения времени цикла. Однако, учет зависимости теплопроводности от выгорания значительно улучшил соответствие результатов моделирования PARCS-PATHS (Purdue Advanced Reactor Core Simulator) и измерений. Учет теплоотдачи зазора тепловыделяющего элемента дополнительно улучшил соответствие результатов моделирования и измерений. Для непериферийных топливных кассет относительная разница между предсказанными PARCS-PATHS и измеренными термопарами результатами соответствуют критерию приемлемости ( $\leq 10\%$ ). Для периферийных сборок, которые соприкасаются тремя гранями с отражателем, относительная ошибка превышает критерий приемлемости (15%) на 1–2%.

### 1. Введение

Программа PARCS-PATHS [1] – одно из современных средств моделирования Комиссии по регулированию ядерной безопасности (NRC) США в области физики ядерных реакторов, предназначенных для анализа стационарного топливного цикла с использованием трехмерной макромодели выгорания. Первоначально программа PARCS была разработана для моделирования нейтронно-физических процессов активных зон западных реакторов, имеющих квадратичную симметрию расположения тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), в отличие от российских реакторов с гексагональной симметрией расположения ТВЭЛ-ов. Для моделирования реакторов типа ВВЭР, PARCS традиционно сочетается с теплогидравлическими кодами одномерной системы, такими как TRACE [2], для учета сильной нейтронно-физической/теплогидравлической обратной связи. Однако для наиболее точных расчетов каждый из 499 параллельных каналов должны моделироваться отдельно, что требует значительных вычислительных затрат. Это особенно связано с тем, что такие коды обычно выполняют нулевой переходный расчет, который неэффективен для установившейся сходимости. С другой стороны, PATHS разработан исключительно для стационарных вычислений и использует несколько упрощений и методов решения для ускорения сходимости при сохранении достаточной точности.

Целью данной работы является валидация программы PARCS-PATHS для анализа топливных циклов Армянской АЭС. В новой версии PATHS [3] были добавлены новые функции, позволяющие учитывать зависящую от выгорания теплопроводность топлива и теплопроводность зазора топлива, а также теплопроводность оболочки топлива для других ТВЭЛ-ов, в частности для топлива ВВЭР.

Для валидации PARCS-PATHS были использованы результаты эксплуатационных измерений 29-го и 30-го топливных циклов ААЭС. Предсказания PARCS-PATHS для критической концентрации борной кислоты в замедлителе и распределения мощности в кассетах были проанализированы в сравнении с результатами измерений ААЭС. При моделировании использовались версии PARCS 3.3.6 [1] и PATHS 1.07 [2]. Сечения нейтрон-ядерных взаимодействий как для топливных и регулирующих кассет, так и для отражателя были рассчитаны с помощью кода HELIOS-2 [4].

## 2. Описание моделей

В модели PARCS использован метод нодального расширения TPEN [1], поскольку он лучше всего подходит для моделирования гексагональной геометрии активной зоны ВВЭР-440. Границные нулевые условия потока применены на границах отражателя как по оси, так и по радиусу. Этот вариант использован, поскольку в модели отражатель моделировался явным образом. Тепло-гидравлическая обратная связь была рассчитана программой PATHS. Далее в модели использовалась опция расчета квазивесной концентрации ксенона и самария.

### 2.1. Активная зона реактора

#### 2.1.1. Модель PARCS

Для 29-го и 30-го топливных циклов ААЭС было использовано топливо с исходным обогащением U-235 3.82% и 1.6% [5, 6]. В загрузке активной зоны содержатся 349 кассет. 37 из них – регулирующие сборки с тепловыделяющими сборками. Только 7 из 37 регулирующих кассет частично находятся в погруженном положении и движутся во время топливных циклов. Подвижные кассеты управления расположены в позициях 1 и 7 (см. рис.1, позиции выделены треугольниками). Остальные кассеты управления полностью выведены из активной зоны – позиции 4, 10, 30, 33 и 50 (см. рис.1, позиции выделены кругами). Загрузка активной зоны для смоделированных топливных циклов моделировалась на основе отчетов [5, 6]. Загрузки активной зоны были переведены в модель радиальной конфигурации для PARCS (см. рис.1).

Активная зона реактора имеет 60-градусную вращательную симметрию. Каждая симметричная часть активной зоны содержит 59 радиальных расчетных нодов.

Общая высота активной зоны реактора составляет 244 см. Активная зона представлена 41-им осевым нодом в активной части топливной кассеты. По одному ноду моделировались нижний и верхний отражатель активной зоны. Основной нодальной единицей в радиальном направлении является шаг топливной сборки. Для моделирования всех 349 топливных и регулирующих сборок, а также внешнего радиального отражателя использовались 27 радиальных шестигранных

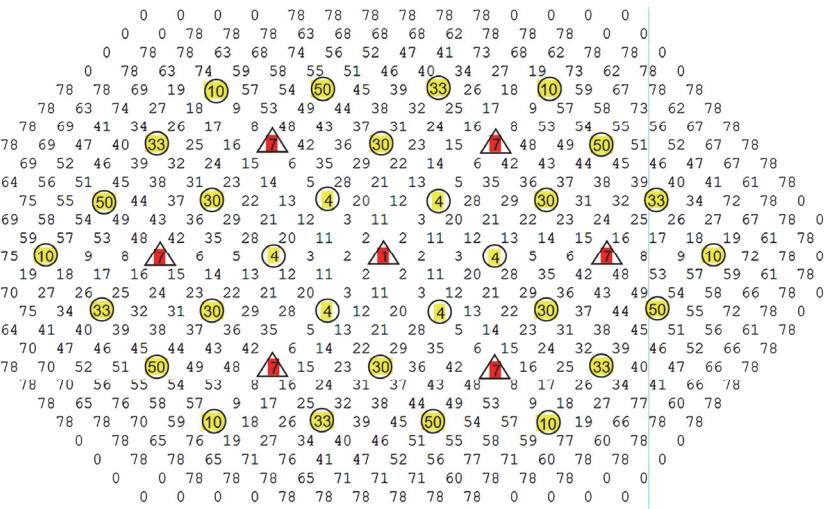


Рис.1. Радиальная конфигурация активной зоны: триугольники – подвижные кассеты управления, окружности – основные кассеты управления.

колец.

Радиальная конфигурация кассет управления для обоих топливных циклов показана на рис.2. В модели использовались две группы управления.

Группа 1 находится в частично загруженном положении на начало цикла как для 29-го, так и для 30-го топливных циклов и загружается/извлекается по мере продвижения топливного цикла. Группа 2 находится в полностью извлеченном положении, что означает, что поглощающая часть находится вне активной зоны, в то время как тепловыделяющая сборка кассеты управления находится в активной зоне.

Библиотека сечений, используемая в PARCS, была разработана с помощью

Рис.2. Группы управления активной зоной.

программы HELIOS-2. Для преобразования результатов расчетов HELIOS в формат библиотеки PMAXS [7], совместимый с PARCS, использовалась программа GenPMAXS5 [7].

### 2.1.2. Модель PATHS

В программе PATHS использовались вычисления энергии активной зоны реактора от PARCS. Общая скорость потока для всех каналов, входная энталпия активной зоны и давление выхода активной зоны были взяты из [4, 6] и представлены в табл.1.

Табл.1. Параметры активной зоны

| Параметр                  | Значение |
|---------------------------|----------|
| Скорость потока, кг/с     | 8734     |
| Энталпия на входе, кДж/кг | 1168.42  |
| Выходное давление, Па     | 2260000  |

В PATHS была выбрана шестиугольная геометрия активной зоны. В ней использовалась полная модель активной зоны. Те же радиальные и осевые нодализации использовались в PATHS и PARCS.

В модель PATHS были включены зависящие от температуры и выгорания теплопроводности топлива из [8, 9] работ. Значения теплоотдачи газового зазора, зависящие от выгорания и линейной скорости тепловыделения из [10] также были включены в модель PATHS. В модели использовалась температурно-зависимая теплопроводность для необлученной оболочки ВВЭР из работы [9]. Параметры ТВЭЛ, использованные в модели, представлены в табл.2 [10].

Табл.2. Параметры твэлов ВВЭР-440

| Параметр                     | Значение  |
|------------------------------|-----------|
| Шероховатость стены, м       | 0.0000018 |
| Шаг ТВЭЛ-а, м                | 0.0122    |
| Количество ТВЭЛ-ов в ТВС     | 126       |
| Внешний радиус ТВЭЛ-а, м     | 0.00455   |
| Радиус топливной таблетки, м | 0.0037775 |
| Толщина оболочки, м          | 0.00063   |

## 3. Результаты анализа

Оценка PARCS 3.3.6 проводилась путем постепенного увеличения термомеханической сложности модели PATHS для определения термомеханических параметров, наиболее влияющих на точный анализ топливного цикла. Матрица оценки показана в табл.3.

Как видно из рис.3 (29-ый топливный цикл), учет зависимости теплопроводности топлива от выгорания (ORNL/TM-2000/351 [8] и NUREG/IA-0156 [9])

Табл.3. Параметры твэлов ВВЭР-440

| Параметр                  | Исходная модель  | Вариант 1                                    | Вариант 2  | Вариант 3  |
|---------------------------|--|--|--|--|
| Теплопроводность топлива  | по умолчанию зависящая только от температуры               | зависящая от температуры и выгорания топлива | зависящая от температуры и выгорания топлива               | зависящая от температуры и выгорания топлива               |
| Теплоотдача зазора        | усредненное значение выгорания и линейного энерговыделения | то же, что в исходной модели                 | зависящая от выгорания топлива и линейного энерговыделения | зависящая от выгорания топлива и линейного энерговыделения |
| Теплопроводность оболочки | по умолчанию зависящая от температуры                      | то же, что в исходной модели                 | то же, что в исходной модели                               | необлученной оболочки ВВЭР, зависящая от температуры       |

позволяет не только существенно улучшить соответствие между результатами, предсказанными PARCS-PATHS, и результатами измерений ААЭС, но также существенно улучшает физическое поведение результатов моделирования PARCS-PATHS. В частности, в исходном решении по мере увеличения времени топливного цикла предсказанные и измеренные критические концентрации бора начинают расходиться, поскольку исходная модель не учитывает тот факт, что из-за увеличения выгорания топлива снижается теплопроводность топлива, что приводит к росту температуры топлива. Рост температуры, в свою очередь, приводит к увеличению поглощения нейтронов в топливе из-за Доплер-эффекта, что приводит к более низким значениям количества борной кислоты, необходимой для поддержания реактора в критическом состоянии.

Кроме того, на рис.3 показано, что прогнозы PARCS-PATHS с использованием данных о теплопроводности топлива из ORNL/TM-2000/351 и NUREG/IA-0156 практически идентичны. В целом, для той же температуры и величины выгорания теплопроводность топлива в NUREG/IA-0156 немного выше, чем

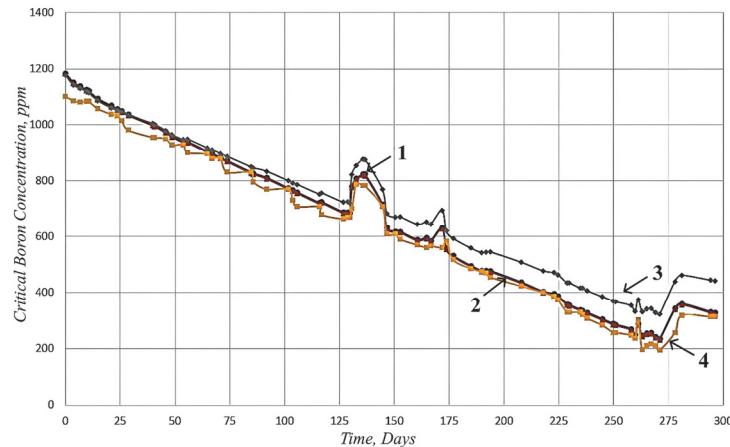


Рис.3. Предсказанная и измеренная критическая концентрация бора для 29-го топливного цикла (учитывая зависимость теплопроводности топлива от выгорания): 1 – NUREG, 2 – ORNL, 3 – Rrf, 4 – Измерение.

соответствующие значения в отчете ORNL. Вот почему по данным NUREG/IA-0156 температура топлива несколько ниже, а критическая концентрация бора несколько выше (около 4 ppm). Отчет ORNL [8] содержит данные о проводимости топлива для большего количества точек выгорания и температуры, чем NUREG [9], поэтому он был использован при дальнейшем анализе топливных циклов.

На рис.4 и рис.5 показаны спрогнозированные и измеренные кривые снижения концентрации борной кислоты для 29-го и 30-го топливных циклов с учетом зависимости теплоотдачи газового зазора ТВЭЛ-а от выгорания топлива и линейного энерговыделения (LHGR).

В модели из ООБ ААЭС [10] использовались два разных набора данных о теплоотдаче газового зазора ТВЭЛ, что привело к максимальной и минимальной величине теплоотдачи зазора. В ООБ ААЭС теплоотдача зазора была рассчитана

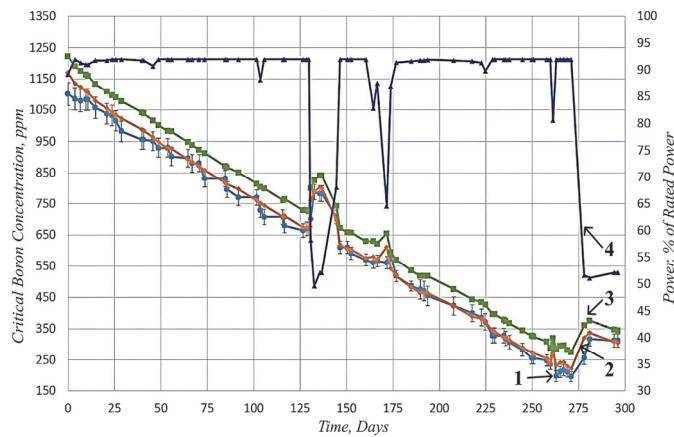


Рис.4. Предсказанные и измеренные значения критической концентрации бора для 29-го топливного цикла (учтена зависимость теплопроводности топлива и теплоотдачи зазора от выгорания), 1 – Мощность, 2 – Макс, 3 – Мин, 4 – Измерение.

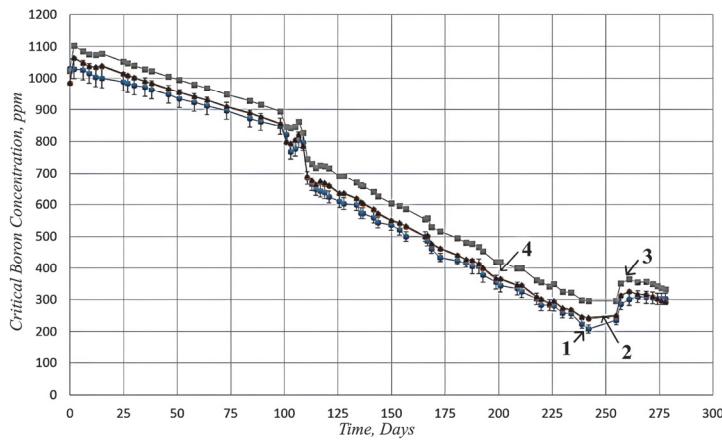


Рис.5. Предсказанная и измеренная критическая концентрация бора для 30-го топливного цикла (учитывается зависимость теплоотдачи зазора и проводимости топлива от выгорания): 1 – Измерение, 2 – Мин, 3 – Макс, 4 – Мин-ВВЭР-Оболочка.

для двух противоположных случаев, чтобы проверить различные критерии безопасности, когда необходимо максимально передавать энергию наружу из топлива или удерживать ее внутри.

Таким образом, два случая включают ТВЭЛы с минимальной и максимальной шириной зазора. В случае минимальной ширины зазора (максимальной теплоотдачи зазора) зазор начинает закрываться при относительно небольших выгораниях (около 20 МВт сутки/кгУ), поэтому возникает скачок проводимости зазора, а затем дальнейшее снижение его теплоотдачи. В случае максимальной ширины зазора (минимальной проводимости зазора) зазор закрывается при более высоких выгораниях (около 40 МВт сутки/кгУ). Таким образом, это приводит не только к существенным количественным (в некоторых случаях даже по порядку величины), но и к качественным различиям (см. рис. 6 для некоторых значений линейного энерговыделения).

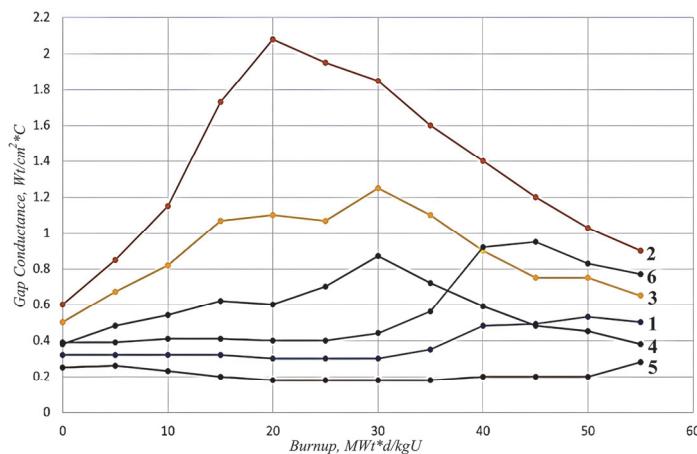


Рис.6. Зависимость минимальной и максимальной проводимости зазора от выгорания топлива и среднего линейного тепловыделения. 1 – 20 кВт/м-Мин, 2 – 30 кВт/м, 3 – 20 кВт/м, 4 – 5 кВт/м, 5 – 5 кВт/м-Мин, 6 – 30 кВт/м-Мин.

Рис.4 и 5 показывают, что в большинстве временных интервалов предсказанные данные с минимальной теплоотдачей зазора находятся в пределах погрешности измерения концентрации борной кислоты. Кроме того, рис.5 показывает, что использование специфической для топлива ВВЭР проводимости необлученной оболочки ТВЭЛ оказывает влияние на критическую концентрацию бора в незначительной степени.

Как видно из рис.7 и 8, для всего 30-го цикла и большинства временных интервалов 29-го цикла разница между предсказанными и измеренными концентрациями бора находится в пределах допустимых критериев  $\pm 50$  ppm [11].

Только для 4-х временных точек 29-го топливного цикла различия незначительно превышают лимит на 14 ppm. В 3-х из 4-х временных точек происходят значительные изменения мощности реактора (снижение мощности с 92% до 50–60%) и, следовательно, требуются существенные перемещения управляющих кассет. В рассматриваемом варианте PARCS-PATHS моделирование движения топливных нодов не совсем корректно, так что это наиболее вероятная причина наблюдаемых различий. В PARCS-е в настоящее время невозможно заменить

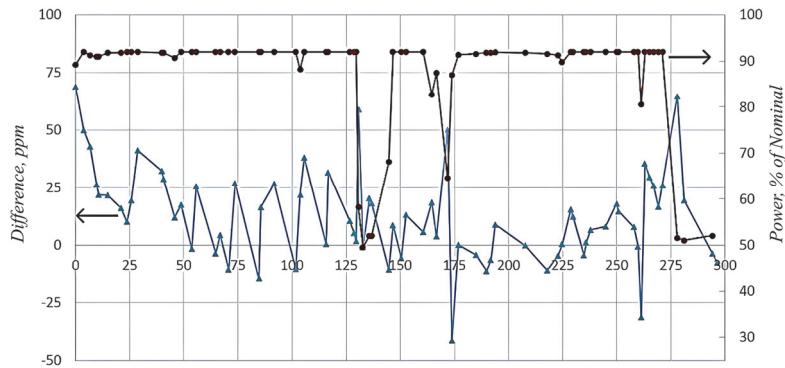


Рис.7. Разница между измеренной и прогнозируемой концентрацией бора для 29-го топливного цикла.

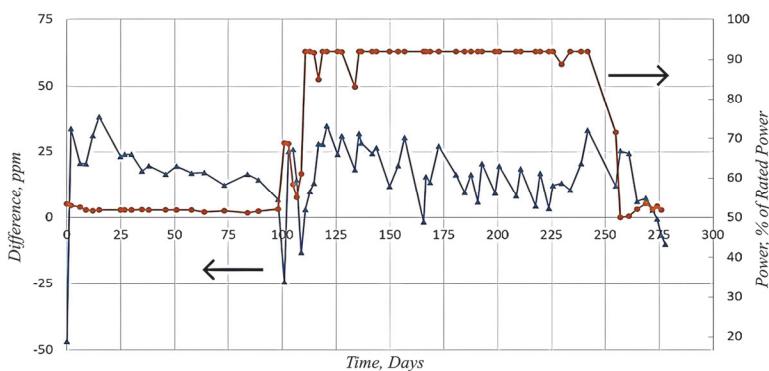


Рис.8. Разница между измеренной и прогнозируемой концентрацией бора для 30-го топливного цикла.

топливный нод другим топливным нодом – только нод поглотителя с топливным нодом и наоборот. Следовательно, невозможно смоделировать движение вверх/вниз нодов тепловыделяющей сборки при извлечении/ввода кассеты управления в активную зону. Наиболее важным случаем является невозможность моделирования по высоте активной зоны движения хвостовой части нодов тепловыделяющей сборки, которые в основном находятся вне активной зоны и имеют значительно меньшие глубины выгорания по сравнению с расположенным в активной зоне реактора. Чтобы обойти этот недостаток моделирования, хвостовая часть топливных нодов моделируется в верхней части активной зоны, «заполненной» управляющими нодами. В случае извлечения управляющей кассеты, контролируемые ноды меняются на ноды хвостовой части. Этот подход имеет два недостатка: 1) топливные ноды хвостовой части тепловыделяющей сборки вместо того, чтобы вставляться в нижнюю часть активной зоны реактора, вставляются в осевом положении нода управления; 2) перемещение нодов топлива, которые находились в активной зоне, игнорируется. В настоящее время, с Мичиганским университетом продолжается работа по созданию правильной модели движения топливных нодов тепловыделяющей сборки.

У PARCS-PATHS есть также проблема с начальной концентрацией бора. Причина может заключаться в том, что в модели при  $t = 0$  задается равновесная концентрация Xe, Sm, в то время как в реальности для достижения равновесных

концентраций требуется некоторое время. Кроме того, Sm из предыдущего цикла игнорируется при выборе равновесного варианта. В ожидаемой версии PARCS предполагается возможность моделирования для получения равновесных концентраций Xe, Sm в качестве переходного процесса с возможностью учета концентраций Sm из предыдущего цикла.

Для оценки локальных параметров активной зоны анализируется по кассетное распределение мощности в несколько моментов времени 29-го и 30-го топливных циклов по результатам измерений термопарами активной зоны реактора ААЭС. Термопары на выходе из активной зоны расположены непосредственно над отдельными топливными кассетами. По результатам измерения температуры на входе и выходе рассчитывается мощность по сборке. Погрешность измерения температуры охлаждающей жидкости термопарами составляет  $2.5^{\circ}\text{C}$ , что приводит к погрешности 1% для интересующего нас температурного диапазона.

Результаты сравнительного анализа показывают хорошее соответствие между измеренным и прогнозируемым распределением мощности кассет. В частности, для не периферийных топливных кассет относительная погрешность в большинстве случаев составляет 5% и для всех сборок удовлетворяет критерию приемлемости 10% [11].

Для большинства периферийных топливных сборок относительная погрешность соответствует критерию приемлемости  $\leq 15\%$  [11]. В нескольких периферийных позициях активной зоны (59, 56, 41, 19) наблюдались относительные ошибки до 17%. Это топливные кассеты, которые соприкасаются с отражателем 3-мя гранями, в то время как другие кассеты имеют 1–2 грани соприкосновения. Также следует отметить, что из-за малых значений относительных мощностей в этих позициях даже очень небольшие изменения абсолютного значения могут вызвать большие относительные различия. Таким образом, модель отражателя активной зоны реактора ААЭС в этих позициях должна быть пересмотрена и уточнена.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трехмерная модель выгорания топлива PARCS–PATHS была валидирована для анализа топливных циклов реактора ВВЭР-440 на основе эксплуатационных данных двух последовательных 29-го и 30-го топливных циклов ААЭС. Прогнозы PARCS–PATHS для интегрального параметра активной зоны и критической концентрации бора находятся в пределах погрешности измерения. В большинстве случаев разница между прогнозируемыми и измеренными критическими концентрациями бора составляет 50 ppm. Использование специфической для ВВЭР теплопроводности необлученной оболочки не оказывает значительного влияния на величину критической концентрации борной кислоты.

Предсказанные локальные параметры активной зоны также хорошо согласуются с результатами измерений термопарами. Для большинства не периферийных сборок относительная ошибка между прогнозируемыми и измеренными значениями PARCS–PATHS составляет 5%, и для всех сборок соблюдается критерий приемлемости в 10%. Для периферийных топливных сборок, имеющих 3 грани соприкосновения с отражателем, наблюдается разница до 17%, что значительно выше критерия приемлемости в 15%. Для остальных периферийных топливных сборок соблюдается критерий приемлемости в 15%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **T. Downar, A. Ward V. Seker Y. Xu, N. Hudson.** PARCS 3.3.6 Release: Theory Manual, University of Michigan, 2021.
2. **F. Odar et al.,** TRACE/RELAP Advanced Computational Engine (TRACE) V5.0 User Manual, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2009.
3. **A. Wysocki, Y. Xu, B. Collins, A. Manera, T. Downar, N. Hudson.** PATHS, PARCS Advanced Thermal Hydraulic Solver 1.06, University of Michigan, 2021.
4. **T. Simeonov, C. Wemple.** HELIOS-2 Methods: Studsvik-Scandpower, Hanasaari (Espoo), Finland 2010.
5. ANPP 29th Fuel Cycle Neutronics Analysis Report, ANPP, Metsamor, 2017.
6. ANPP 30th Fuel Cycle Neutronics Analysis Report, ANPP, Metsamor, 2018.
7. **A. Ward Y. Xu T. Downar,** GenPMAXS – v6.3.1 Release: Code for Generating the PARCS Cross Section Interface File PMAXS, University of Michigan, 2021.
8. **S. Popov, J. Carabajo, V. Ivanov, G. Yoder,** Thermophysical Properties of MOX and UO<sub>2</sub> Fuels Including the Effects of Irradiation, ORNL, ORNL/TM-2000/351, 2000.
9. **L. Yegorova et al.,** Data Base on the Behavior of High Burnup Fuel Rods with Zr-1%Nb Cladding and U0 2 Fuel (VVER Type) under Reactivity Accident Conditions, NRC, NUREG/IA-0156, vol. 2, Washington, DC 20555-0001,1999.
10. ANPP Safety Analysis Report, ANPP, Metsamor, 2020.
11. Nomenclature of Operational Neutron-Physics Calculations and Experiments for VVER-440 Fuel Loads, Guidline RD EO 0500-03, 2003.

## VALIDATION OF THE 3D BURNUP MODEL OF PARCS-PATHS CODE FOR WWER-440 REACTORS

A.G. UGUJYAN

The three-dimensional burnup model of the WWER-440 reactor core was studied using operational cycle measurements from the Armenian Nuclear Power Plant (ANPP). The simulation results showed that using fuel thermal conductivity dependent solely on temperature (PATHS) led to discrepancies with the measured boron concentration values as the cycle progressed. However, incorporating the dependence of thermal conductivity on burnup significantly improved the agreement between the PARCS-PATHS simulation results and the measurements. Additionally, considering the heat transfer of the fuel assembly gap further enhanced the correspondence between the simulation results and measurements. For non-peripheral fuel assemblies, the relative difference between the predicted PARCS-PATHS results and the measured thermal parameters met the acceptability criterion ( $\leq 10\%$ ). For peripheral assemblies that have three faces in contact with the reflector, the relative error exceeded the acceptability criterion (15%) by 1–2%.