УДК 621.039.51:006.91

Моделирование экспериментов по определению эффективности органов регулирования на критическом стенде с быстрым спектром нейтронов

В.Г. Артемов, Л.М. Артемова, Р.Э. Зинатуллин, А.С. Карпов, Н.С. Нерсесян

ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

Аннотация

Приведены результаты моделирования экспериментов по определению эффективности органов регулирования, осуществленных методами «сброса» и «разгона», с использованием нейтронно-физической модели комплекса программ САПФИР_РФ&RC. Эксперименты проведены в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» на критическом стенде с активной зоной быстрого газоохлаждаемого реактора. Моделирование экспериментов проведено с целью верификации расчётной модели и исследования влияния методических особенностей измерения реактивности методом обращенного решения уравнения кинетики на результаты оценки эффективности органов регулирования.

Ключевые слова: реактор с быстрым спектром нейтронов, критический стенд, измерение реактивности, параметры запаздывающих нейтронов, пространственные эффекты, источник нейтронов, моделирование экспериментов, комплекс программ САПФИР РФ&RC.

UDC 621.039.51:006.91

Simulation of control rod worth experiments on a fast critical assembly facility

V.G. Artemov, L.M. Artemova, R.E. Zinatullin, A.S. Karpov, N.S. Nersesian

FSUE "Alexandrov NITI", Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

Abstract

The paper presents results of simulation of control rod worth experiments performed with the "insertion" and "divergence" methods. A neutron model implemented in the SAPFIR_RF&RC program package was used in the simulation. The experiments were carried out on the critical assembly facility with a fast gas-cooled reactor core at FSUE "Alexandrov NITI". The purposes of the simulation were to verify the simulation model and assess the sensitivity of the simulation results to the inverse kinetics approach used for the measurement of reactivity.

Key words: fast neutron spectrum reactor, critical assembly facility, measurement of reactivity, delayed neutron parameters, spatial effects, neutron source, simulation of experiments, SAPFIR_RF&RC program package.

Введение

Данная статья является второй частью работы по обоснованию применения комплекса программ (КП) САПФИР_РФ&RС для разработки и верификации расчётных моделей активных зон реакторов с быстрым спектром нейтронов и газовым теплоносителем. В первой части [1] приведено описание особенностей подготовки расчётной модели по двухэтапной схеме с

использованием КП САПФИР_РФ&RC и результаты моделирования тестовых задач, имитирующих активную зону (а.з.) критического стенда (КС), в сравнении с результатами реперных расчётов методом Монте-Карло, полученных по программе МСU-FR [2].

В настоящей работе приведены результаты моделирования экспериментов, проведенных в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» (далее НИТИ) по определению эффективности стержней рабочих органов (РО) системы управления и защиты (СУЗ), осуществленных методами «сброса» и «разгона». Измерение реактивности проводилось методом обращенного решения уравнения кинетики (ОРУК). Известно, что при использовании этого метода на результаты измерений и их интерпретацию влияет ряд факторов, связанных с приближением точечной кинетики, на котором основан этот метод [3].

Для того, чтобы оценить влияние этого приближения на результаты измерений реактивности, подготовлена нестационарная трёхмерная расчётная модель а.з. Расчётное моделирование измерений дало возможность непосредственно сравнить экспериментальные и расчётные результаты при верификации расчётной модели и сделать обоснованное заключение о результатах определения эффективности РО СУЗ, полученных на основе обработки результатов экспериментов.

Особенности проведения экспериментов и интерпретации результатов измерений

На КС НИТИ измерение эффективности РО СУЗ осуществлялось двумя способами: методом «разгона», когда извлечение стержня приводит к экспоненциальному росту мощности с определенным установившимся периодом, который и характеризует величину введенной реактивности, и методом «сброса» стержня, приводящего к затуханию плотности потока нейтронов (ППН) со скоростью, зависящей от величины введенной отрицательной реактивности. Измерение реактивности осуществлялось с помощью реактиметров, подключенных к трем ионизационным камерам (ИК), регистрирующим изменение ППН. По скорости изменения ППН реактиметр вычисляет реактивность, используя ОРУК.

Оценка внесенного возмущения в единицах ρ/β определялась, как разность между показаниями реактиметра в начальном и конечном (установившемся) состояниях:

$$\Delta \rho_{peakm}^{skcn} = \Delta \rho_{vcm} = \rho_{vcm} - \rho_0 \tag{1}$$

Внесение возмущений в а.з. приводит к перераспределению поля нейтронов в а.з., что проявляется в показаниях реактиметров. Если за время измерения асимптотическое распределение предшественников запаздывающих нейтронов не успевает установиться, то показания реактиметров ρ_{ycm} , в общем случае, зависят от места расположения детекторов и возмущающего воздействия на размножающие свойства а.з. Эта зависимость в литературе идентифицируется как проявление пространственных эффектов при измерении реактивности методом ОРУК [4, 5].

Выход в критическое состояние и эксперименты по измерению реактивности на КС проводились при наличии постоянного внешнего источника нейтронов. Это обстоятельство явилось еще одним фактором, вносящим неопределенность в оценку реактивности с использованием соотношения (1). При небольших уровнях мощности внешний источник нейтронов влияет на скорость ее изменения и, соответственно, на оценку реактивности ρ_{ycm} .

Кроме этого, вычисление реактивности методом ОРУК зависит от того, какой набор параметров запаздывающих нейтронов использовался в реактиметре при решении обращенного уравнения кинетики. Неопределенность оценки относительных долей выходов запаздываю-

щих нейтронов в различных библиотеках ядерных данных достаточно высока, и она может заметно влиять на показания реактиметра [6, 7]. Неопределенность в оценке абсолютной доли запаздывающих нейтронов по различным оценкам составляет 5–7 % [7, 8]. Эта неопределен-

ность проявляется, когда измеренную реактивность, пересчитанную в единицы $1/k_{_{3}\phi\phi}$, сопоставляют с результатами расчётов реактивности по стационарным программам.

Влияние перечисленных выше факторов: неопределенности параметров запаздывающих нейтронов, пространственных эффектов, источника нейтронов, может приводить к тому, что оценка эффективности РО СУЗ методом ОРУК с использованием соотношения (1) может значимо отличаться от результата вычисления изменения реактивности через разность значений коэффициента размножения в конечном и исходном состояниях:

$$\Delta \rho_{pacu}^{cmau} = \frac{1}{k_{3dab}^2} - \frac{1}{k_{3dab}^1} \tag{2}$$

На основе только экспериментальных данных выделить каждую из составляющих методической погрешности измерений реактивности достаточно сложно. Чтобы при сопоставлении расчётных и экспериментальных данных избежать методической несогласованности определений (1) и (2), в КП САПФИР_РФ&RС реализована возможность моделирования экспериментов на основе решения нестационарного уравнения диффузии. Кроме того, КП САПФИР_РФ&RС дополнен блоком, имитирующим вычисление реактивности методом ОРУК, так же, как это делается на опыте с использованием штатного реактиметра.

Моделирование изменения реактивности в экспериментах со сбросом и извлечением РО СУЗ

Модель расчёта нейтронно-физических характеристик а.з. малогабаритного реактора с быстрым спектром нейтронов и газовым теплоносителем подготовлена по двухэтапной схеме с использованием КП САПФИР_РФ&RC [1]. Эта же схема использовалась при моделировании экспериментов на КС. На первом этапе проводился расчёт спектра нейтронов в отдельных ячейках (фрагментах) а.з. и отражателя (программа САПФИР_РФ), а на втором этапе рассчитывалось изменение распределения ППН в реакторе в двухгрупповом диффузионном приближении (программа RC).

Для расчёта изменения ППН в программе RC решается нестационарное уравнение диффузии нейтронов:

$$\frac{1}{\mathbf{v}^{g}} \frac{\partial}{\partial t} \Phi^{g}(\mathbf{r}, t) = \nabla D^{g} \nabla \Phi^{g}(\mathbf{r}, t) - \Sigma_{t}^{g} \Phi^{g}(\mathbf{r}, t) + \sum_{g' < g} \sum_{s}^{g' \to g} \Phi^{g'}(\mathbf{r}, t) + \\
+ \left(1 - \beta\right) \chi_{p}^{g} \sum_{g'} v^{g'} \Sigma_{f}^{g'} \Phi^{g'}(\mathbf{r}, t) + \sum_{m=1}^{M} \lambda_{m} \chi_{d, m}^{g} C_{m}(\mathbf{r}, t) + Q(\mathbf{r}), \qquad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} C_{m}(\mathbf{r}, t) = \beta_{m} \sum_{g} v^{g} \Sigma_{f}^{g} \Phi^{g}(\mathbf{r}, t) - \lambda_{m} C_{m}(\mathbf{r}, t) \quad (m = 1, ..., M),$$

где

 Φ^{g} – плотность потока нейтронов в g-й энергетической группе;

 $Q(\mathbf{r})$ – функция, имитирующая влияние внешнего источника нейтронов;

 v^g – скорость нейтронов в g-й группе; D^g – коэффициент диффузии в g-й группе;

 Σ_t^g — полное сечение увода нейтронов из g-й группы;

 $\Sigma_s^{g' o g} -$ сечение перевода нейтронов из группы g' в группу g;

 v^{g} – среднее число нейтронов, возникающее в одном акте деления;

 Σ_f^g — сечение деления в g-й группе;

 χ_p^g — доля мгновенных нейтронов деления, непосредственно попадающих в g-ю группу;

 $\chi_{d,m}^g$ — доля запаздывающих нейтронов от ядер-предшественников m-й группы, попадающих в g-ю энергетическую группу;

 β — доля запаздывающих нейтронов *m*-й группы нейтронов;

 $\beta = \sum_{m=1}^{M} \beta_{m}$ — полная доля запаздывающих нейтронов;

 $\lambda_{_{m}}^{}$ — постоянная распада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов m-й группы;

 $C_{_{m}}$ – концентрация ядер-предшественников запаздывающих нейтронов m-й группы;

M – число групп запаздывающих нейтронов.

При этом используется та же библиотека двухгрупповых констант (коэффициентов уравнения), что и для стационарного расчёта [1], дополненная параметрами нейтронной кинетики, подготовленными по программе САПФИР_РФ на основе файлов оцененных ядерных данных.

Изменение реактивности при моделировании эксперимента определялось путем численного решения обращенного уравнение кинетики [5]:

$$\frac{\rho(t)}{\beta_{\vartheta\phi\phi}} = 1 + \frac{\Lambda}{\beta_{\vartheta\phi\phi}} \frac{dI(t)}{dt} - \frac{1}{\beta_{\vartheta\phi\phi}} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m \beta_m \int_0^t I(t') \exp\left[-\lambda_m (t - t')\right] dt' - \frac{\Lambda}{\beta_{\vartheta\phi\phi}} \sum_{m=1}^{M} \lambda_m C_m(0) \exp(-\lambda_m t) + Q/\beta_{\vartheta\phi\phi}.$$
(4)

В формуле (4) использованы обозначения:

 $\rho(t)$ – реактивность;

 Λ – время генерации мгновенных нейтронов;

Q – внешний источник нейтронов;

I(t) – результат моделирования изменения ППН в ИК.

В комплексе САПФИР_РФ&RС имеется блок, осуществляющий вычисление реактивности методом ОРУК (4). Он использовался в качестве реактиметра и при обработке зарегистрированных в экспериментах скоростей счёта ИК, и при моделировании измерений с использованием КП САПФИР РФ&RC.

При проведении расчётного моделирования измерений предполагалось, что основной вклад в показания ИК, расположенных за пределами а.з., вносят нейтроны деления от периферийных топливных стержней, расположенных на наименьшем расстоянии от ИК.

На рис. 1 приведена схема относительного расположения РО СУЗ и ИК вокруг а.з. и номера топливных стержней, в которых рассчитывалось изменение ППН при имитации показаний ИК.

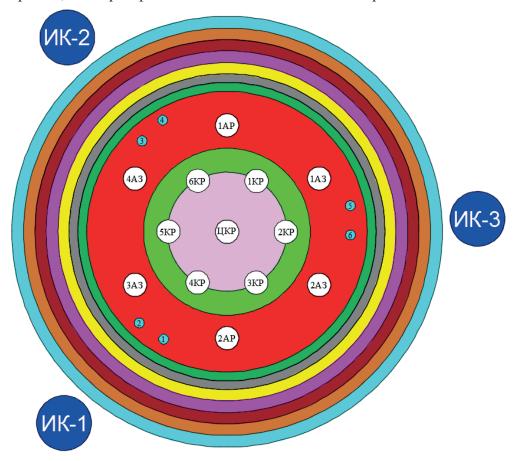


Рис. 1. Схема расположения стержней РО СУЗ (аварийной защиты -1 АЗ ...4 АЗ; автоматических регуляторов - АР, компенсации реактивности - ЦКР, 1КР...6КР); ионизационных камер (ИК-1, ИК-2, ИК-3) и шести топливных стержней (1...6), в которых расчитывалось изменение ППН

Из приведенной схемы видно, что ИК-1 соответствуют 1 и 2 топливные стержни, ИК-2 - 3 и 4 топливные стержни, ИК-3 - 5 и 6 топливные стержни. Помимо этого, схема даёт наглядную информацию о расположении стержней РО СУЗ относительно ИК и относительно друг друга в а.з.

Оценка влияния неопределённости параметров запаздывающих нейтронов на результаты измерений реактивности

Используемые в уравнениях кинетики параметры запаздывающих нейтронов являются эффективными характеристиками изотопного состава топлива и должны вычисляться на основе детальных спектральных расчётов. При этом остается неопределенность, связанная с различием оценок ядерных данных. Расчётные исследования показывают [7], что для ВВЭР достаточно хорошие результаты получаются с параметрами, основанными на оценках Дж. Р. Кипина [9] (БНАБ-78 [10]).

Чтобы выявить чувствительность результатов измерений реактивности к параметрам запаздывающих нейтронов и определить наиболее подходящий набор для исследуемой быстрой критической сборки, использованы экспериментальные скорости счёта (усредненные значения по показаниям трёх ИК), зарегистрированные после сброса РО ЦКР в сочетании с разными моделями реактиметров, отличающимися параметрами запаздывающих нейтронов. На рис. 2 приведены результаты изменения реактивности после сброса РО ЦКР для начального интервала времени, когда влияние источника нейтронов в этом эксперименте было незначительным. В уравнениях реактиметра использованы пять наборов параметров запаздывающих нейтронов, рассчитанных программой САПФИР_РФ.

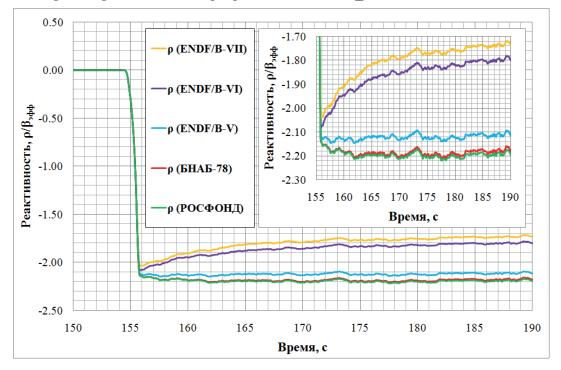


Рис. 2. Эксперимент. Изменение реактивности в эксперименте со сбросом РО ЦКР. Оценка влияния параметров запаздывающих нейтронов, используемых в реактиметре

Из рис. 2 следует, что из-за различия оценок ядерных данных диапазон неопределенности результатов вычисления реактивности может достигать ~20 %: 1.74 $\beta_{s\phi\phi}$ (ENDF/BVII) и 2.19 $\beta_{s\phi\phi}$ (БНАБ78).

Для правильной оценки реактивности параметры запаздывающих нейтронов, используемые в реактиметре, должны отражать реальные свойства а.з. При этом, если влияние пространственных эффектов и внешнего источника нейтронов незначительно, то после погружения стержней измеренная реактивность должна быть постоянной.

Этому условию удовлетворяют результаты, полученные при использовании в реактиметре параметров запаздывающих нейтронов из файлов ENDF/BV, БНАБ-78 и Российских файлов оцененных нейтронных данных (РОСФОНД). В первых двух случаях данные получены на основе оценок Дж. Р. Кипина [9], соответственно, для реакторов с быстрым (ENDF/BV) и тепловым (БНАБ-78) спектром нейтронов. При использовании в реактиметре восьмигрупповых параметров запаздывающих нейтронов, полученных на основе баз данных РОСФОНД, результаты вычисления реактивности практически совпали с данными, полученными с шестигрупповыми параметрами из БНАБ-78 [10].

Из приведенных на рис. 2 данных можно сделать заключение, что критерию постоянства реактивности после сброса РО ЦКР не удовлетворяют зависимости, полученные при использовании параметров запаздывающих нейтронов из библиотек ядерных данных ENDF/BVI и ENDF/BVII.

Неудовлетворительность параметров запаздывающих нейтронов из ENDF/BVI и ENDF/BVII становится очевидной при рассмотрении результатов моделирования экспериментов с

использованием этих параметров в уравнениях нейтронной кинетики (3).

В качестве примера, на рис. 3 приведены результаты расчётного моделирования эксперимента со сбросом РО ЦКР при использовании в расчётной модели нейтронной кинетики параметров запаздывающих нейтронов из ENDF/BVII и вычислении изменения реактивности методом ОРУК с использованием в уравнении реактиметра (4) различных наборов параметров запаздывающих нейтронов, как и при обработке экспериментальных данных, приведенных на рис. 2.

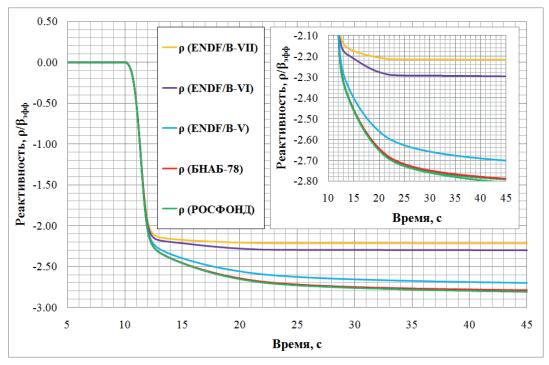


Рис. 3. Расчёт. Модель с параметрами кинетики ENDF/BVII. Изменение реактивности в эксперименте со сбросом РО ЦКР при использовании параметров запаздывающих нейтронов модели реактиметра из разных библиотек ядерных данных

Для окончательного выбора наиболее подходящего набора параметров запаздывающих нейтронов проведено моделирование эксперимента с использованием в а.з. библиотек с параметрами кинетики, полученными на основе файлов БНАБ-78, ENDF/BV и РОСФОНД. Для всех трёх моделей получены достаточно близкие результаты моделирования эксперимента. Наилучшее согласие с результатами измерений получено при использовании параметров запаздывающих нейтронов из библиотек БНАБ-78 и РОСФОНД. Однако, в связи с тем, что не получено явного выигрыша при обработке результатов измерений с использованием восьмигрупповых параметров запаздывающих нейтронов, в качестве базовой модели принято традиционное (шестигрупповое) представление для параметров запаздывающих нейтронов из библиотеки БНАБ-78.

На рис. 4 приведены результаты расчётного моделирования эксперимента со сбросом РО ЦКР при использовании в а.з. параметров запаздывающих нейтронов из библиотеки ядерных данных БНАБ-78 и вычисления изменения реактивности методом ОРУК с использованием в уравнении реактиметра (4) различных наборов параметров запаздывающих нейтронов.

Из рис. 4 видно, что в этом случае результаты расчётного моделирования и качественно, и количественно воспроизводят экспериментальные зависимости, приведенные на рис. 2.

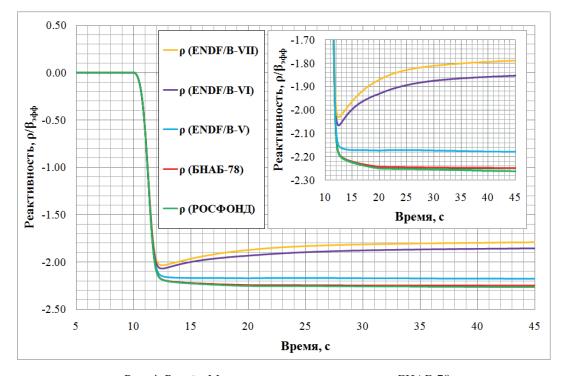


Рис. 4. Расчёт. Модель с параметрами кинетики БНАБ-78. Изменение реактивности в эксперименте со сбросом РО ЦКР при использовании параметров запаздывающих нейтронов модели реактиметра из разных библиотек ядерных данных

На основе анализа результатов эксперимента и расчётного моделирования в качестве базовой принята модель с параметрами запаздывающих нейтронов, подготовленная на основе файлов библиотеки БНАБ-78 по методике, описанной в работе [11]. Эти параметры использовались при моделировании измерений и при обработке результатов экспериментов.

Оценка влияния пространственных эффектов на результаты измерений реактивности

Для оценки влияния пространственных эффектов в качестве входного сигнала в блок реактиметра подавался сигнал, пропорциональный ППН в топливных стержнях, расположенных на периферии а.з. на границе с отражателем.

Наиболее наглядно влияние пространственных эффектов видно при сопоставлении результатов измерений реактивности по показаниям скоростей счёта трёх ИК при сбросах стержней РО 1AP и 2AP (см. рис. 5).

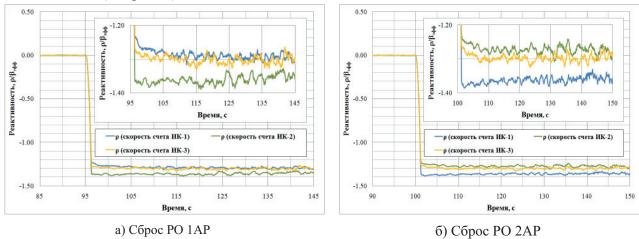


Рис. 5. Эксперимент. Реактивность, вычисленная по показаниям трёх ИК (ИК-1, ИК-2 и ИК-3)

В обоих экспериментах просматривается общая тенденция — максимальное изменение реактивности зарегистрировано ИК, наиболее близко расположенной к месту внесения возмущения (ИК-2 для РО 1АР и ИК-1 для РО 2АР).

Выявленные корреляции воспроизводятся и при расчётном моделировании. На рис. 6 приведены результаты моделирования экспериментов со сбросом РО 1AP и 2AP при имитации показаний трёх ИК. Реактивность вычислялась по изменению ППН в периферийных топливных стержнях а.з., расположенных напротив соответствующих ИК.

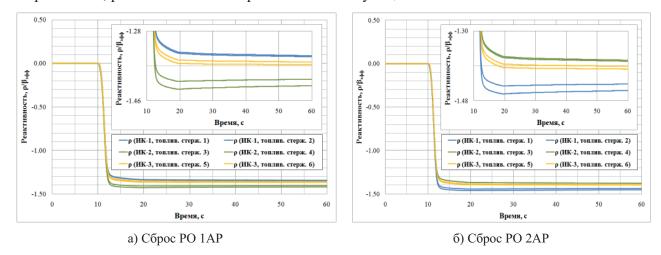


Рис. 6. Расчёт. Реактивность, вычисленная по изменению ППН в периферийных топливных стержнях активной зоны, расположенных напротив ИК-1, ИК-2 и ИК-3

При сбросе РО ЦКР симметрия а.з. не нарушается и на основе только экспериментальных данных (по показаниям трёх ИК) оценить влияние пространственных эффектов на результат измерения реактивности не представляется возможным (см. результаты измерений, приведенные на рис. 7 а). Для оценки пространственных эффектов выполнено расчётное моделирование этого эксперимента.

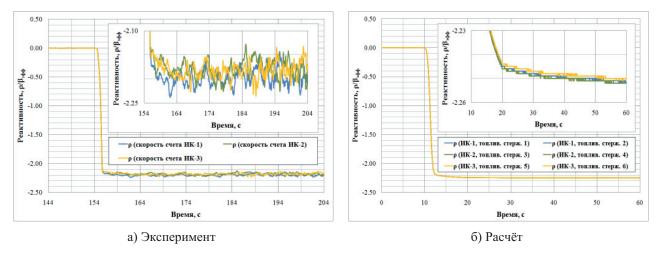


Рис. 7. Изменение реактивности в эксперименте со сбросом РО ЦКР

Результат моделирования показаний реактиметра (1) на основе решения прямого и обращенного уравнений кинетики (3), (4) при сопоставлении с «истинной» реактивностью, вычисленной по разности значений коэффициентов размножения (стационарная модель (2)), позволяет расчётным путем оценить диапазон влияния пространственных эффектов на оценку эффективности РО.

В табл. 1 приведены результаты моделирования показания реактиметра (1) для экспериментов со сбросом РО ЦКР, 1АР и 2АР и результаты расчётов реактивности по разности значений коэффициента размножения (2). Результаты моделирования измерений получены путём вычисления реактивности по среднему значению ППН в шести топливных стержнях, имитирующих показания трёх ИК вокруг а.з.

Tаблица 1 Сопоставление результатов расчёта реактивности по разности значений коэффициента размножения (2) и моделирования измерений (1) при сбросах РО СУЗ

Сброс РО СУЗ	ρ	Отклонение, %	
	Стационарная модель (2)	Моделирование измерений (1)	÷ 1.0.101.101.111.5, 7 0
ЦКР	-2.32	-2.25	-3.11
1AP	-1.42	-1.37	-3.65
2AP	-1.45	-1.41	-2.84

В расчётной модели КП САПФИР_РФ&RС использовались параметры запаздывающих нейтронов, подготовленные на основе библиотеки ядерных данных БНАБ-78. Полученная при этом оценка $\beta_{_{9\phi\phi}}$ использовалась при пересчёте результатов стационарной модели (2).

Результаты моделирования показаний реактиметра (1) примерно на 3–4 % систематически занижают оценку реактивности в сравнении с прямым расчётом. Это отличие даёт количественную оценку влияния пространственных эффектов при измерении реактивности реактиметрами, подключенными к трём ИК, и её следует учитывать наряду с азимутальной неравномерностью результатов измерений (см. рис. 5).

Оценка влияния источника нейтронов на результаты измерений реактивности

В настоящем разделе рассмотрено влияние источника нейтронов на результаты измерений реактивности в экспериментах со сбросом и извлечением РО ЦКР.

Для компенсации влияния источника на результат измерения реактивности при решении уравнений в реактиметре предусмотрена возможность введения источника (см. уравнение (3)). Источник в уравнении реактиметра подбирается так, чтобы после внесения возмущения по-казания реактиметра образовали «полочку». Однако, данный способ корректировки предполагает отсутствие иных факторов, влияющих на показания реактиметра. Чтобы обосновать введение источника в реактиметр при обработке результатов измерений, использовано расчётное моделирование эксперимента. При моделировании экспериментов внешний источник нейтронов (см. уравнение (3)) задавался постоянным по времени и одинаковым во всех топливных стержнях а.з.

Наиболее наглядно влияние источника проявилось в эксперименте с извлечением РО ЦКР. На рис. 8 приведены результаты измерений реактивности и моделирования эксперимента, когда РО ЦКР поднимают вверх приблизительно на 30 мм. И в расчёте, и в эксперименте результаты представлены для двух случаев. Зелёным цветом выделены результаты с введением в уравнение реактиметра (4) компенсирующего источника нейтронов (КИН), а красным — без источника. Кроме этого, расчётное моделирование выполнено также для модели, в которой отсутствовал источник нейтронов, и при обработке результатов расчётов в модели реактиметра КИН не задавался. На рис. 8 б эта зависимость показана черным цветом.

После достижения РО ЦКР максимального положения реактивность не меняется во времени. Выполнение этого критерия было условием при подборе КИН в реактиметре для обработки результатов расчётного моделирования эксперимента при наличии внешнего источника. Совпадение обоих результатов расчёта явилось подтверждением корректности подбора величины КИН при расчётном моделировании эксперимента (см. рис. 8 б). Требование постоянства реактивности после внесения возмущения было критерием подбора КИН и при обработке результатов измерений (см. рис. 8 а).

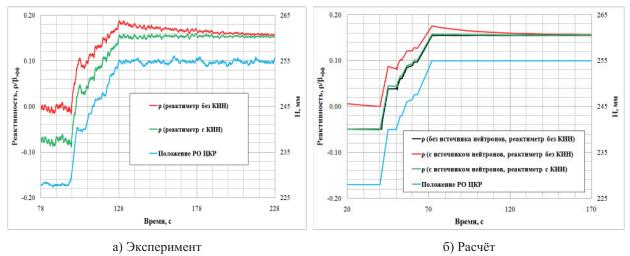


Рис. 8. Извлечение РО ЦКР с 228 до 255 мм. Влияние компенсирующего источника нейтронов в реактиметре на результаты вычисления реактивности

Результаты расчётных исследований показали, что оценка изменения реактивности (1), вычисленная методом ОРУК с КИН на основе результатов моделирования измерения и эксперимента по извлечению РО ЦКР, достаточно хорошо согласуется с оценкой реактивности, полученной по разности значений коэффициента размножения (2), что явилось обоснованием использования метода ОРУК для оценки дифференциальной эффективности РО СУЗ в дополнении к методу асимптотического периода [3], который в программе испытаний на КС был основным.

На рис. 9 представлено сопоставление результатов моделирования измерения и эксперимента при сбросе РО ЦКР также для двух случаев: с КИН и без КИН. Величина КИН при моделировании этого эксперимента была принята той же, что и в эксперименте с извлечением РО ЦКР.

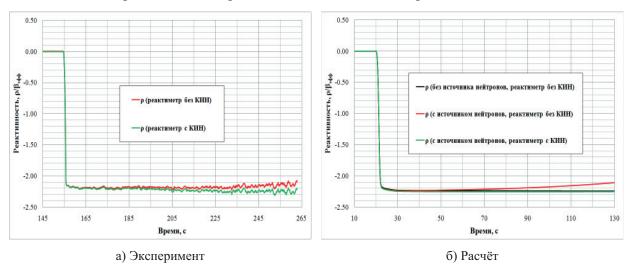


Рис. 9. Сброс РО ЦКР. Влияние компенсирующего источника нейтронов в реактиметре на результаты вычисления реактивности

Из рис. 9 следует, что при отсутствии КИН в реактиметре вычисленные значения реактивности, полученные при обработке результатов измерений и результатов расчётного моделирования, приблизительно через 50 с после сброса РО ЦКР демонстрируют тенденцию к повышению. Однако, с введением в реактиметр КИН вычисленная реактивность сохраняется постоянной, образуя характерную «полочку», которая наблюдается в эксперименте и в расчёте.

Приведённые результаты показывают, что введение в реактиметр КИН в обоих экспериментах позволяет надёжно определить изменение реактивности с использованием соотношения (1) по разности показаний реактиметра до и после внесения возмущения.

Сопоставление результатов эксперимента и моделирования измерений

Для количественной оценки погрешности расчёта результаты моделирования измерений сопоставлены с результатами экспериментов по сбросам РО ЦКР, 1АР и 2АР, а также с результатом эксперимента по извлечению РО ЦКР. И в расчёте, и в эксперименте изменение реактивности определялось в соответствии с соотношением (1) для установившегося значения реактивности, вычисленного с использованием КИН в реактиметре. При этом вычисление реактивности осуществлялось по средней скорости счёта трёх ИК при обработке экспериментальных данных и по средним значениям ППН в шести топливных стержнях, имитирующим показания трёх ИК, при обработке результатов расчётного моделирования экспериментов.

В табл. 2 представлено сравнение результатов измеренных и расчётных значений изменения реактивности при сбросах и извлечении РО СУЗ.

 Таблица 2

 Результаты изменения реактивности при сбросах и извлечении РО СУЗ

РО СУЗ	$ ho/eta_{_{artheta}\phi}$		Отклонение, %
	Эксперимент	Моделирование измерений (1)	
ЦКР (сброс)	-2.19	-2.25	2.74
1АР (сброс)	-1.32	-1.37	3.79
2АР (сброс)	-1.31	-1.41	7.63
ЦКР (извлечение 228–255 мм)	0.227	0.205	-9.69

Из приведенных в табл. 2 результатов следует, что между моделированием измерения и экспериментом наблюдается удовлетворительное согласие. Отличие результатов моделирования измерений и экспериментальных данных не превосходит погрешности расчёта дифференциальной эффективности РО СУЗ по КП САПФИР_ВВР95-RC для реакторов с тепловым спектром нейтронов 10 % [12]. Различие может быть связано как с погрешностью расчётной модели, так и с точностью подбора КИН в реактиметре при обработке результатов измерений в натурном эксперименте и при расчётном моделировании измерений, поскольку к точности подбора КИН результаты моделирования и результаты измерений в экспериментах с извлечением РО СУЗ чувствительны.

Заключение

Результаты, представленные в настоящей статье, на основе моделирования натурных экспериментов, выполненных на критическом стенде в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», подтвердили возможность разработки нестационарных расчётных моделей активных зон малогабаритных реакторов с быстрым спектром нейтронов на основе оригинальных алгоритмов комплекса программ САПФИР РФ&RC [1].

С использованием расчётной модели комплекса программ САПФИР_РФ&RC, имитирующей особенности экспериментов, проанализировано влияние трёх источников методической погрешности (неопределенности параметров запаздывающих нейтронов, пространственных эффектов и источника нейтронов), влияющих на результаты измерений реактивности методом обращенного решения уравнения кинетики. Результаты выполненных расчётных исследований позволили правильно интерпретировать экспериментальные данные и использовать их для верификации расчётной модели.

Результаты расчётного моделирования изменения реактивности в экспериментах со сбросом и извлечением рабочих органов системы управления и защиты, продемонстрировавшие удовлетворительное согласие с результатами измерений, вместе с результатами работы [1] являются первым этапом верификации и валидации расчётных моделей комплекса программ САПФИР_РФ&RC применительно к расчёту нейтронно-физических характеристик малогабаритных реакторов с быстрым спектром нейтронов.

Литература

- 1. Подготовка и верификация модели для расчёта нейтронно-физических характеристик активных зон реакторов с быстрым спектром нейтронов и газовым теплоносителем / В.Г. Артемов, А.С. Иванов, П.А. Михеев, Н.С. Нерсесян // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. 2020. Вып. №1 (19). С. 29–39.
- 2. МСU-FR: свидетельство о регистрации ПС N 2016618242 / Н.И. Алексеев [и др.]; Φ ГУП «НИТИ им. А.П. Александрова». 2016.
- 3. *Казанский Ю.А.* Экспериментальные методы физики реакторов: учеб. пособие для вузов / Ю.А. Казанский, Е.С. Матусевич. М.: Энергоатомиздат, 1984. 272 с.
- 4. К учету пространственных эффектов при измерении реактивности методом обращенного решения уравнения кинетики / Ю.А. Казанский, И.П. Матвеенко, П.Л. Тютюнников, А.Г. Шокодько // Атомная энергия. 1981. Т. 51, вып. 6. С. 387—389.
- 5. *Цыганов С.В.* Измерения эффективности органов регулирования ВВЭР / С.В. Цыганов, Л.К. Шишков // Атомная энергия. -2004. T. 96, вып. 3.
- 6. *Пинегин А.А.* Экспериментальные погрешности и возможность их компенсации при определении эффективности аварийной защиты и дифференциальной эффективности группы ОР СУЗ в реакторе ВВЭР-1000 / А.А. Пинегин, Б.Е. Шумский // ВАНТ, серия: Физика ядерных реакторов. 2007. Вып. 1. С. 76–89.
- 7. Исследование влияния точности расчёта параметров запаздывающих нейтронов на результаты моделирования экспериментов по определению эффективности аварийной защиты ВВЭР / В.Г. Артемов, В.И. Гусев, Р.Э. Зинатуллин, А.С. Карпов, К.Ю. Куракин, А.А. Соловьев, А.Ю. Беляков // Обеспечение безопасности ВВЭР: материалы 5-ой международной научно-технической конференции, (29 мая 1 июня). Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2007. URL: http://www.gru/files/proceedings/mntk2007/disc/documents/f76.pdf.
- 8. *Гагаринский А.Ю.* О влиянии неопределенности ядерных данных на результаты обработки кинетических измерений в реакторах с 235U на тепловых нейтронах / А.Ю. Гагаринский, Л.С. Цыганков // ВАНТ, серия: Физика и техника ядерных реакторов. 1984. Вып. 9 (46). С. 65–69.

- 9. *Кипин Дж. Р.* Физические основы кинетики ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1967.
- 10. Групповые константы для расчёта реакторов и защиты: справочник / Л. П. Абагян, Н. О. Базазянц, М. Н. Николаев, А. М. Цибуля; под ред. М. Н. Николаева. М.: Энергоиздат, 1981.-232 с.
- 11. Подготовка и обоснование параметров запаздывающих нейтронов в комплексе программ САПФИР/КОРСАР / В.Г. Артемов, Р.Э. Зинатуллин, А.С. Карпов, А.В. Пискарев, Ю.П. Шемаев // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. 2016. № 1 (3). С. 38—54.
- 12. Комплекс программ САПФИР_ВВР95-RC: аттестационный паспорт ПС № 261 от 23.09.2009.