УДК 621.039.51

Расчётное моделирование измерений дифференциальной эффективности компенсирующих групп

В.Г. Артемов, Д.Ю. Бессонов, Д.Н. Жуковский

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

Аннотация

Представлены результаты анализа применения методики измерения дифференциальной эффективности органов регулирования для активной зоны стенда транспортной ЯЭУ, обладающей существенной азимутальной неоднородностью. В результате проведённого расчётно-экспериментального исследования показано, что выявленный на опыте эффект зависимости результатов измерений реактивности от места расположения внезонных детекторов нейтронов связан с особенностями методики измерений и компоновки данной активной зоны. Представлены результаты экспериментов, которые были проведены для подтверждения выводов, сделанных на основе расчётного моделирования.

Ключевые слова: нейтронно-физический расчёт, транспортная ЯЭУ, эксперимент, дифференциальная эффективность, реактивность.

UDC 621.039.51

Numerical simulation of differential control rod worth measurements

V.G. Artemov, D.Yu. Bessonov, D.N. Zhukovsky

FSUE “Alexandrov NITI”, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

Abstract

The paper presents a numerical simulation of measurements of differential control rod worths in the core of a naval nuclear reactor plant prototype where a significantly non-uniform azimuthal power distribution exists. The simulation has shown that experimentally observed dependence of reactivity measurement results on the location of ex-core neutron detectors is due to the measuring procedure and core geometry. Results of real experiments performed in support of the simulation results are presented.

Key words: neutronic calculation, naval nuclear reactor plant, experiment, differential worth, reactivity.

Введение

В ходе стендовых испытаний реакторной установки транспортного назначения, проведённых в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» [1], при измерении дифференциальной эффективности некоторых функциональных групп компенсирующих решёток было зафиксировано существенное несовпадение показаний реактиметров, подключённых к детекторам нейтронов, расположенным с разных сторон активной зоны. Расхождение показаний реактиметров при внесении возмущения путём движения органов регулирования можно проинтерпретировать как проявление пространственного эффекта.

Под пространственным эффектом подразумевается зависимость показаний реактиметра от расположения локального детектора нейтронов, к которому он подключён, относительно источника возмущения поля нейтронов [2].

Пространственный эффект в показаниях реактиметров проявляется вследствие того, что вычисление реактивности в реактиметре основано на приближении точечной нейтронной кинетики реактора, которое предполагает установление асимптотического распределения нейтронов во всём объёме реактора. Чем больше исходное возмущение реактивности, тем больше необходимо времени на завершение процесса установления асимптотического распределения нейтронов.

Типичной ситуацией, в которой проявляется пространственный эффект, является измерение весов стержней аварийной защиты методом сброса, т.е. при быстром введении большой реактивности и переводе реактора в глубокое подкритическое состояние [3]. При измерении дифференциальной эффективности органов регулирования возмущение поля нейтронов существенно меньше, а состояние реактора близко к критическому, поэтому, как правило, пространственный эффект в этом случае пренебрежимо мал. Таким образом, проявление пространственного эффекта, зафиксированное при измерении дифференциальной эффективности некоторых функциональных групп компенсирующих решёток – результат неожиданный, который потребовал своего подробного исследования.

Расчётное исследование было проведено с использованием аттестованного в Ростехнадзоре комплекса программ (КП) САПФИР_ВВР95-RC [4]. Расчёты проведены на основе полномасштабной трёхмерной модели активной зоны с отражателями. При постановке численного эксперимента подробно воспроизводились условия измерений. В процессе расчёта вычислялись показания детекторов нейтронов, использованных в реальном эксперименте, с учётом их реального расположения и физических принципов работы.

Особенности проведения измерений на стенде-прототипе транспортной ЯЭУ

Главной особенностью исследуемой активной зоны является уникальное для транспортных активных зон расположение тепловыделяющих сборок с различными размножающими свойствами, которое можно в некотором приближении назвать секторным [1]. Схематично картограмма активной зоны и относительное расположение детекторов (Д1, Д2 и Д3) представлены на рис. 1. Пунктирной линией обозначена граница разбиения органов регулирования на функциональные компенсирующие группы (КГ).

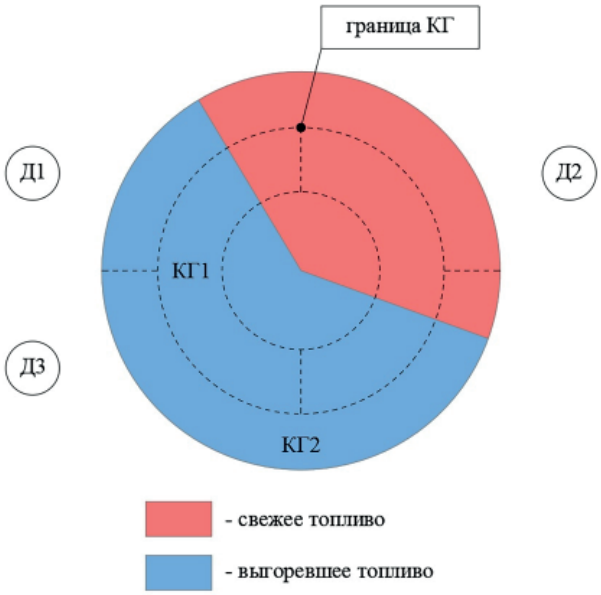

Рис. 1. Компоновка активной зоны

Измерения дифференциальной эффективности предусмотрены программой испытаний и проводятся в соответствии с утверждённой методикой, основанной на многолетнем опыте исследования нейтронно-физических свойств других активных зон. Производятся «пилообразные» перемещения КГ около исходного критического положения с безопасной амплитудой изменения реактивности. Перемещение вниз выполняется непрерывно с постоянной скоростью, перемещение вверх выполняется шагами, поскольку в соответствии с правилами ядерной безопасности непрерывный ввод положительной реактивности запрещён. В процессе измерений должно быть выполнено не менее 5 повторений для уменьшения влияния случайных флуктуаций сигнала. Дифференциальная эффективность КГ определяется как отношение скорости изменения реактивности к скорости движения КГ. Методика основана на предположении, что в отсутствие пространственного эффекта показания реактиметров линейно зависят от положения органов регулирования. Поэтому при условии равномерного движения КГ показания реактиметров можно аппроксимировать прямой линией, по углу наклона которой можно вычислить скорость ввода реактивности.

На рис. 2 представлен типичный график «пилообразного» перемещения КГ и соответствующие показания реактиметров, подключённых к детекторам Д1, Д2 и Д3, зарегистрированные в одном из проведённых экспериментов.

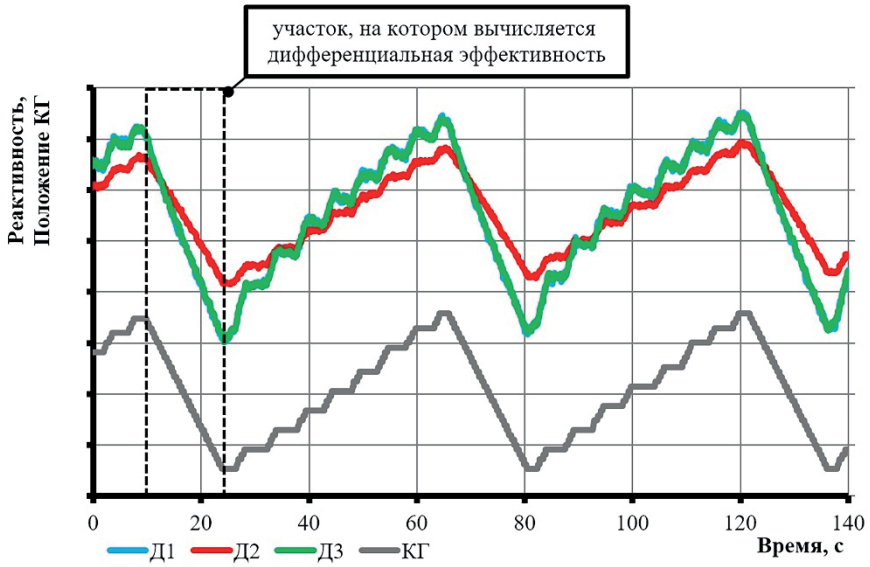

Рис. 2. «Пилообразное» перемещение КГ и соответствующие показания реактиметров

Следует отметить, что показания Д1 и Д3, представленные на рис. 2, совпадают между собой и отличаются от Д2. Очевидно, что скорость изменения реактивности, вычисленная по показаниям Д2, будет меньше, чем вычисленная по показаниям Д1 и Д3. Это расхождение и было проинтерпретировано как проявление пространственного эффекта. Наиболее заметно этот эффект проявился при измерении дифференциальной эффективности КГ1 и КГ2 (см. рис.1), расположенных в секторе с более выгоревшим топливом. Анализ причин наблюдаемого расхождения был проведён с использованием расчётного моделирования, подробное описание которого представлено ниже.

Расчётный анализ экспериментов по измерению дифференциальной эффективности КГ

При постановке численного эксперимента использовалась трёхмерная модель активной зоны с отражателем, подготовленная с использованием КП САПФИР_ВВР95-RC. В ходе чис-

ленного моделирования решалось нестационарное двухгрупповое уравнение диффузии с 6-ю группами ядер предшественников запаздывающих нейтронов. В результате расчёта определялось пространственное распределение плотности потока нейтронов на каждом временном шаге. Плотность потока нейтронов в точке размещения детектора вычислялась путём суммирования вкладов каждого топливного канала с учётом ослабления, обусловленного расстоянием до детектора и нейтронно-физическими характеристиками среды. Для вычисления реактивности использовалась модель реактиметра, имитирующего реактиметр, используемый при обработке результатов натурных экспериментов.

Для оценки интервала времени, на котором проявляется пространственный эффект при измерении дифференциальной эффективности КГ, при моделировании воспроизводился тот участок реального эксперимента, на котором КГ перемещалась вниз. Далее, в отличие от реальных экспериментов, в которых КГ непрерывно совершала «пилообразное» перемещение, при моделировании КГ фиксировалась в нижнем положении и расчёт продолжался до момента установления конечного асимптотического распределения нейтронов, что проиллюстрировано на рис. 3.

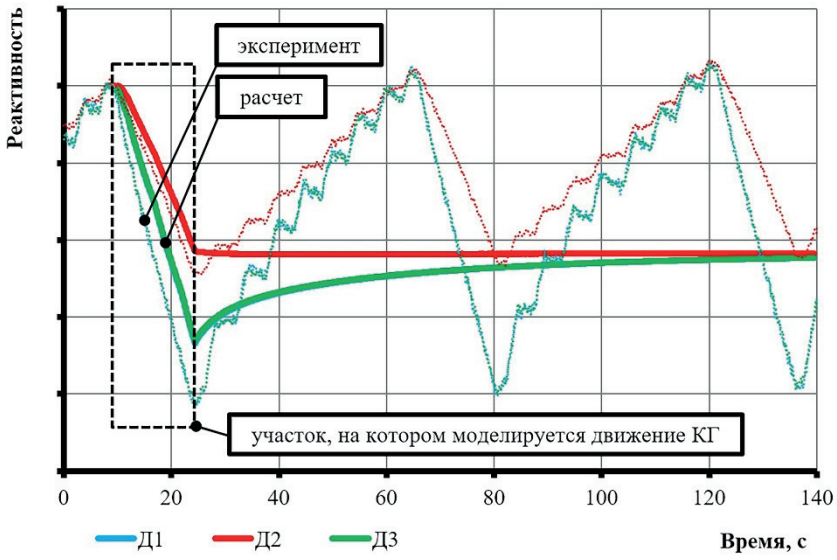

Рис. 3. Иллюстрация подхода к расчётному исследованию особенностей проявления пространственного эффекта при измерении дифференциальной эффективности КГ

По итогам сопоставления результатов моделирования показаний реактиметров на первой фазе эксперимента с зарегистрированными в натурном эксперименте сделан вывод о том, что расчётная модель правильно воспроизводит проявление пространственного эффекта в показаниях реактиметров, подключенных к внезонным детекторам. И в эксперименте, и в расчёте реактивность, вычисленная по показаниям детекторов Д1 и Д3, расположенных напротив выгоревшего сектора, больше (по абсолютной величине) реактивности, вычисленной по показаниям детектора Д2.

Расчётное моделирование эксперимента показало, что время перехода в асимптотическое состояние заметно больше интервала времени, на котором измеряется скорость изменения реактивности, что и является причиной наблюдающегося расхождения показаний реактиметров.

Полученная в результате вычислительного эксперимента оценка времени перехода в асимптотическое состояние при измерении дифференциальной эффективности КГ1 и КГ2 позволила сделать вывод о принципиальной возможности существенно снизить влияние простран-

ственного эффекта на результаты измерений. Для этого необходимо скорректировать методику измерений так, чтобы интервал измерений был сопоставим или превышал время установления асимптотического состояния после исходного возмущения (исходным возмущением считается перемещение КГ из крайней верхней точки в крайнюю нижнюю): достаточно замедлить извлечение КГ в 2 раза по сравнению с исходной методикой. Результаты численного эксперимента в таком исполнении (см. рис. 4) показали, что в конце интервала извлечения КГ проявлением пространственного эффекта можно пренебречь, и показания реактиметров следует аппроксимировать прямой линией.

Далее, полученную прямую необходимо экстраполировать в обратную сторону по оси времени до точки смены направления движения КГ, и затем соединить конец этой прямой с точкой начала движения КГ, как показано на рис. 4. Полученный график отражает изменение реактивности при перемещении КГ, свободное от влияния пространственного эффекта.

Далее, значение дифференциальной эффективности определяется так же, как в исходной методике: на участке равномерного движения КГ вниз, поскольку именно на этом участке движение КГ наиболее близко к равномерному.

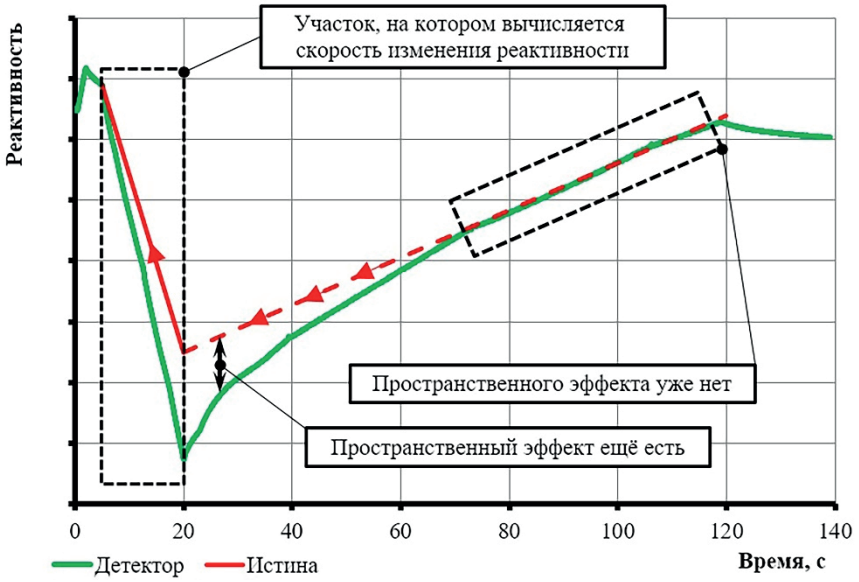

Рис. 4. Подход к уменьшению влияния пространственного эффекта на результаты измерения дифференциальной эффективности КГ

Обработка результатов численного эксперимента описанным выше способом показала, что итоговое значение введённой реактивности не зависит от расположения детекторов и в пределах погрешности близко к результатам расчёта по разности значений реактивности исходного и конечного условно-критических состояний.

Экспериментальная проверка результатов расчётного моделирования

Для проверки выводов численных экспериментов были выполнены натурные эксперименты по измерению дифференциальной эффективности КГ1 и КГ2 по откорректированной схеме измерений. На рис. 5 представлены показания реактиметра, подключенного к детектору Д3, при перемещении КГ2.

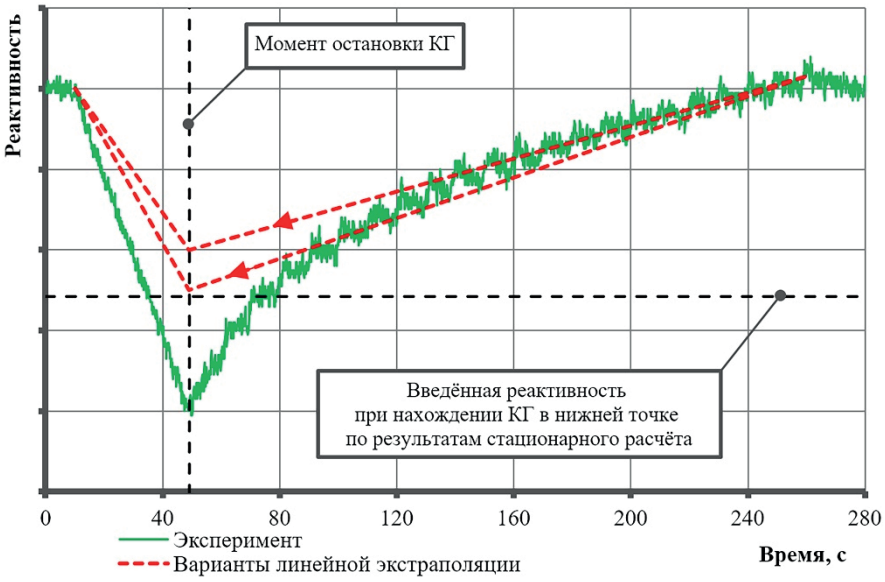

Рис. 5. Результаты эксперимента с замедленным извлечением КГ

Отметим, что показания реактиметров, регистрируемые на практике, обладают статистической погрешностью – случайными колебаниями сигнала, что является источником некоторой неопределённости результатов (параметров) полученной линейной аппроксимации. Тем не менее, можно заключить, что эксперимент, проиллюстрированный на рис. 5, качественно подтвердил результаты расчётного моделирования, представленные на рис. 4.

Обработка результатов измерений откорректированным способом позволила существенно снизить влияние пространственного эффекта на оценку реактивности. В таблице представлены результаты измерения дифференциальной эффективности КГ1 и КГ2 по стандартной методике, а также результатов экспериментов с замедленным извлечением КГ, выполненных при близких состояниях активной зоны.

Таблица

Сопоставление результатов измерения дифференциальной эффективности КГ с результатами стационарного расчёта

Номер КГ	Детектор	Дифференциальная эффективность, 10^{-5} мм$^{-1}$		
		Стандартная методика	Эксперимент	Стационарный расчёт
КГ1	Д1	0.6	0.36	0.41
	Д2	0.3	0.39	
	Д3	0.6	0.36	
КГ2	Д1	1.5	1.52	1.55
	Д2	1.5	1.55	
	Д3	1.9	1.59	

Для справки представлены результаты расчётной оценки дифференциальной эффективности КГ по разнице реактивности исходного и конечного условно-критических состояний (стационарный расчёт), по которым можно оценить степень проявления пространственного эффекта в проведённых экспериментах. Заметная корректировка результатов измерений по итогам экспериментов с замедленным извлечением КГ коснулась детекторов Д1 и Д3 при измерении дифференциальной эффективности КГ1 и детектора Д3 при измерении дифференциальной эффективности КГ2. В остальных случаях, как предсказали результаты моделирования

и подтвердили результаты экспериментов, пространственный эффект не оказывает заметного влияния на результаты измерения дифференциальной эффективности.

Следует подчеркнуть, что в настоящей статье представлено явление, зафиксированное при испытаниях активной зоны с уникальным для активных зон транспортных ЯЭУ расположением тепловыделяющих сборок с различными размножающими свойствами. Объединение тепловыделяющих сборок с более высокой размножающей способностью в компактный сектор привело к тому, что максимум энерговыделения (и плотности потока нейтронов) сместился из центра активной зоны в сторону данного сектора. Таким образом, детектор Д2 оказался расположен ближе остальных детекторов к точке, в которой достигается максимум основной собственной функции условно-критического уравнения диффузии нейтронов, и его показания испытывают меньшее влияние от остальных гармоник. На практике это выражается в том, что пространственный эффект в показаниях этого детектора проявляется существенно меньше, чем в показаниях Д1 и Д3.

Расчётный анализ показал, что, строго говоря, пространственный эффект наблюдается при измерениях дифференциальной эффективности при движении любой из КГ. При измерениях дифференциальной эффективности КГ1 и КГ2, рассмотренных в настоящей статье, пространственный эффект проявляется существенно сильнее, чем при измерении дифференциальной эффективности более «тяжелых» КГ, расположенных в области более свежего топлива. Причина заключается в том, что при перемещении более «тяжёлых» КГ возмущение вносится близко к точке, в которой достигается ярко выраженный максимум плотности потока нейтронов, который является характерным следствием секторной компоновки ТВС с различными размножающими свойствами. При этом амплитуда перемещения более «тяжёлых» КГ существенно меньше, чем амплитуда перемещения «лёгких» КГ1 и КГ2. В результате пространственное распределение источников запаздывающих нейтронов, которые определяют кинетику активной зоны реактора, в исходном и конечном состояниях отличаются незначительно, поэтому пространственный эффект пренебрежимо мал. При перемещении КГ1 и КГ2 исходное и конечное состояния различаются сильнее, соответственно сильнее и проявление пространственного эффекта.

Заключение

1. Расчётно-экспериментальное исследование пространственного эффекта, выявленного при измерении дифференциальной эффективности некоторых функциональных групп компенсирующих решёток на стенде-прототипе транспортной ЯЭУ, показало, что его проявление связано с особенностями методики измерений и компоновкой данной активной зоны.
2. Для анализа экспериментов по определению дифференциальной эффективности использована полномасштабная расчётная модель активной зоны, реализующая возможность детального моделирования экспериментов по вводу реактивности.
3. С целью уменьшения влияния пространственного эффекта по результатам расчётного моделирования предложена корректировка исходной методики измерений дифференциальной эффективности компенсирующих групп.
4. Выполненный расчётный анализ продемонстрировал эффективность имитационного моделирования при интерпретации результатов измерений.
5. Приведенные в статье данные расчётно-экспериментального исследования актуальны для правильной интерпретации результатов применения методики измерения дифференциальной эффективности органов регулирования для случая активных зон ЯЭУ, обладающих значимой азимутальной неоднородностью.

Литература

1. Концепция разработки и результаты испытаний двухступенчатой активной зоны с каналами «дожигания» / О.Б. Самойлов, В.И. Алексеев, С.А. Полянских, А.Н. Лепехин, О.А. Морозов, Г.Ш. Иксанова, П.А. Бочаров, П.Б. Матяш // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. — 2018. — № 4 (14). — С. 9—19.

2. *Казанский Ю.А.* Экспериментальные методы физики реакторов / Ю.А. Казанский, Е.С. Матусевич. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 272 с.

3. Оценка подкритичности активной зоны на основе расчётного моделирования экспериментов по определению изменения реактивности методом «сброса» стержня / В.Г. Артемов, Л.М. Артемова, Д.Ю. Бессонов, Р.Э. Зинатуллин, А.С. Иванов, А.В. Пискарев, Ю.П. Шемаев // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. — 2016. — № 1 (3). — С. 55—60.

4. Комплекс программ САПФИР_ВВР95-RC с библиотекой констант БНАБ-78/С-95: аттестационный паспорт программного средства № 261 от 23.09.2009. Ростехнадзор.