

безопасность, при этом могут поддерживаться на необходимом уровне и даже быть улучшены, в частности, получен отрицательный паровой коэффициент реактивности. В смешанное топливо необходимо добавлять выгорающий поглотитель для снижения перегрузочного коэффициента. В качестве такого поглотителя рационально использовать соединения на основе природного эрбия или европия (например, Er_2O_3 или Eu_2O_3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балыгин А.А., Краюшкин А.В., Федосов А.М. Возможности утилизации плутония в РБМК с применением эрбия. — В сб.: Эффективность и безопасность топливных циклов ядерной энергетики на основе плутония. Материалы X Межд. семинара по проблемам физики реакторов. Москва, 2—6 сентября 1997, с. 31—34.
2. Askew J., Fayers F., Kemshell P. A general description of the lattice code WIMS. — J. British Nucl. Soc., 1966, v. 5, p. 564—585.
3. Babaytsev M.N., Krayushkin A.V., Kubarev A.V. et al. The STEPAN Code for RBMK Reactor Calculation. IAE-5660/5, 1993.
4. Шевалдин В.Н., Негривода Г.П., Воронцов Б.А. и др. Опыт использования уран-эрбиевого топлива на Игналинской АЭС. — Атомная энергия, 1998, т. 85, вып. 2, с. 91—97.

Поступила в Редакцию 11.01.99

УДК 621.039.564

УЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТЕРЖНЕЙ СУЗ РЕАКТОРОВ БИЛИБИНСКОЙ АЭС

Акимов И.С. (Билибинская АЭС)

Для измерения эффективности стержней СУЗ в реакторах ЭГП-6 Билибинской АЭС в настоящее время используется цифровой реактиметр ЦВР-9, который получает входной сигнал от нейтронного детектора (ионизационной камеры типа КНК-56), размещенного в специальном канале бака биологической защиты. Картограммы расположения стержней СУЗ и детектора нейтронов приводятся в работе [1]. Благодаря малому размеру реактора (утечка нейтронов превышает 6% в общем нейтронном балансе) и тому, что обычно измеряется эффективность небольших участков стержней СУЗ (до $0,05\beta_{эф}$), необходимость учета пространственных эффектов не возникала. Однако при измерении значительной отрицательной реактивности, например, в случае определения эффективности всех стержней аварийной защиты (вводится отрицательная реактивность $\sim 2,5\beta_{эф}$), подкритичности остановленного реактора ($12-17\beta_{эф}$) или эффективности даже отдельных стержней СУЗ, но расположенных близко к нейтронному детектору пренебрежение учетом пространственных эффектов может привести к значительной погрешности в результатах. В перечисленных случаях возможна значительная деформация формы распределения нейтронного потока, приводящая к изменению соотношения между средним нейтронным потоком в активной зоне реактора и в месте расположения детектора, что и является причиной неадекватности показаний реактиметра (реактиметр решает обращенное уравнение кинетики [2] в предположении, что поведение во времени нейтронного потока в месте установки детектора не отличается от его поведения в активной зоне реактора). Учет пространственных эффектов изучали многие [3—5]. Для ЭГП-6 исследовали возможную погрешность измерения реактивности, в том числе и вызванную пространственными эффектами. В работе [3] для уменьшения влияния пространственных эффектов предлагали подби-

рвать взаимное расположение измеряемых стержней СУЗ и нейтронных детекторов. В работе [4] предлагали, не выходя за рамки точечного приближения, усовершенствовать процесс решения обращенного уравнения кинетики, внося в него в явном виде эффективность детектора нейтронов, зависящую в общем случае как от времени, так и от взаимного расположения измеряемых стержней СУЗ и детектора нейтронов. Поправку предлагалось определять либо расчетным путем, либо не выходя за рамки эксперимента. В работе [5] для реакторов БН-600 и АМБ-200 изучен характер изменения эффективности регистрации нейтронов в процессе перемещения стержней СУЗ и предложены приближенные алгоритмы решения модифицированного уравнения кинетики в условиях влияния пространственных эффектов.

Измерения на реакторах Билибинской АЭС. Основным при выработке подхода к учету пространственных эффектов для ЭГП-6 было предположение о том, что эффективность детектора зависит только от деформации потока тепловых нейтронов (изменение спектра нейтронов не рассматривалось). Для количественного учета этой деформации введем коэффициент формы K_Φ , который характеризует относительное изменение отношения потока тепловых нейтронов в месте расположения детектора к интегральному источнику нейтронов деления в реакторе, вызванное перемещением стержней СУЗ. Из рассмотрения в точечном приближении простейшего случая ввода реактивности (по ступенчатому закону) с учетом коэффициента формы можно получить выражение для величины Δ , характеризующей отличие показаний реактиметра (ρ^*) от истинной введенной реактивности (ρ) для начального момента времени после ввода реактивности:

$$\Delta = \rho^* - \rho = (1/K_\Phi - 1)(\beta_{эф} - \rho)/\beta_{эф}. \quad (1)$$

Далее эту величину Δ будем называть невязкой. Множители в формуле (1) имеют ясный физический смысл. Так, $(1/K_\Phi - 1)$ — это относительное изменение эффективности регистрации нейтронов; $(\beta_{эф} - \rho)/\beta_{эф}$ — коэффициент относительного уменьшения нейтронного потока в результате ввода реактивности.

Невязка определяется источниками запаздывающих нейтронов, возникшими еще до ввода реактивности, и их по отношению к рассматриваемому процессу можно называть «реликтовыми». После завершения процесса ввода реактивности невязка должна постепенно уменьшаться. Пренебречь ею можно будет только тогда, когда влияние «реликтовых» запаздывающих нейтронов на решение обращенного уравнения кинетики станет малым по сравнению с нейтронами, возникающими от источников, которые появились позднее. Начальный вклад каждой группы этих нейтронов в невязку пропорционален их доле в акте деления. Но с течением времени он значительно изменяется вследствие как разной скорости распада предшественников запаздывающих нейтронов, так и изменяющейся со временем скорости спада потока нейтронов. Последняя зависит также и от введенной реактивности. Вклад в невязку тех групп запаздывающих нейтронов, чьи предшественники распадаются медленнее спада нейтронного потока, постепенно возрастает, и при вводе большой отрицательной реактивности он становится доминирующим. При этом скорость уменьшения невязки может стать малой (постоянная времени может измеряться десятками минут и даже часами). Это означает, что в таких случаях за разумное время измерений невязка значительно снизиться не может, но из-за медленного ее уменьшения создается ложное представление о полном затухании погрешности. Для двух значений введенной ступенчато отрицательной реактивности это иллюстрируется рис. 1 (различие не только в введенной реактивности, но и в коэффициенте формы). В таблице для шести групп запаздывающих нейтронов приведены обратные значения скорости распада предшественников запаздывающих нейтронов λ , корней характеристического уравнения ω , определяющих скорость спада нейтронного потока, и комплексов $(\omega + \lambda)$, описывающих асимптотическую скорость спада составляющих невязки.

Характеристики групп запаздывающих нейтронов, определяющих спад невязки

Номер группы	$\lambda^{-1}, \text{с}$	$\rho = -0,25\beta_{эф}$		$\rho = -3,7\beta_{эф}$	
		$-\omega^{-1}, \text{с}$	$(\omega + \lambda)^{-1}, \text{с}$	$-\omega^{-1}, \text{с}$	$(\omega + \lambda)^{-1}, \text{с}$
1	80,6	104,2	356,1	81,4	8631
2	32,8	57,1	77,0	34,8	576
3	9,01	12,6	31,5	9,47	184
4	3,32	4,7	11,1	3,63	39,1
5	0,88	0,96	10,5	0,90	36,6
6	0,33	0,34	10,9	0,33	38,1

Обычно эффективность отдельных стержней СУЗ на Билибинской АЭС определяется путем измерения эффективности их отдельных участков, значением, как уже отмечалось, не превышающим по модулю $0,05\beta_{эф}$. Это обеспечивает быстрый спад невязки. Медленно затухающая ее составляющая невелика. Но не для всех стержней СУЗ реакторов ЭГП-6 можно определить эффективность, измеряя эффективность их участков. Это относится к стержням аварийной защиты, которые могут быть введены в активную зону реактора только полностью. В этом случае учет пространственных эффектов необходим, особенно если определяется эффективность группы стержней аварийной защиты, как это делалось при проведении физических пусков [6]. Однако в то время такой учет не проводился, хотя поправочный множитель к показаниям реактиметра для случая ввода всех восьми стержней аварийной защиты или центральной группы из четырех стержней может достигать $\sim 1,35$ (в частности, для реактора 3-го блока, для которого наиболее подробно исследовали эффективность стержней аварийной защиты при проведении физических пусков, и при этом камеру реактиметра размещали в штанге отражателя). Совпадение расчетной эффективности групп стержней аварийной защиты с показаниями реактиметра для различных конфигураций стержней ручного регулирования [6], компенсирующих избыточную реактивность в критическом состоянии реакторов, могло означать только то, что расчет содержал значительную погрешность.

Необходим учет пространственных эффектов также и при вводе в активную зону из критического состояния всех стержней СУЗ (кроме стержней аварийной защиты) для определения подкритичности остановленного реактора. Показания реактиметра при этом оказываются по модулю заметно ниже введенной реактивности, так как при погружении в активную зону ЭГП-6 всех стержней СУЗ поток нейтронов в месте расположения детектора увеличивается в сравнении с потоком нейтронов в активной зоне. Реактиметр «интерпретирует» это как ввод отрицательной реактивности меньшей абсолютной величины. При подобных измерениях, когда относительно медленно (за ~ 110 с) вводится большая отрицательная реактивность, дожидаться значительного спада невязки невозможно не только из-за крайне малой скорости этого спада, но и потому, что нейтронный поток значительно уменьшается, и на результатах начинает сказываться нейтронный источник (либо реальный, либо фиктивный, когда составляющая вклада γ -излучения в ток камеры реактиметра становится заметной, несмотря на ее предварительную компенсацию). Измерения по этой причине обычно заканчиваются вместе с окончанием ввода стержней.

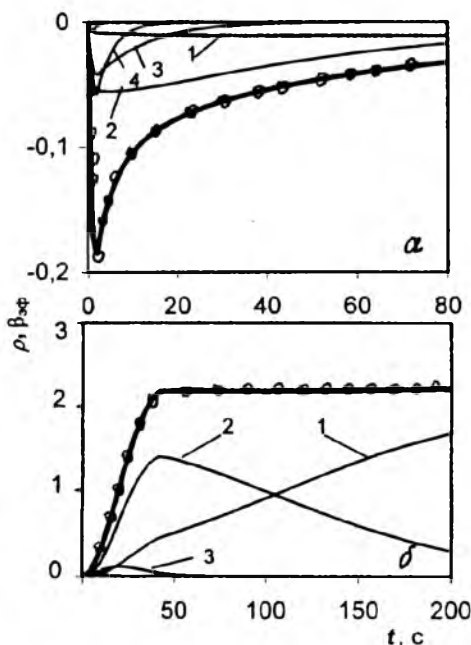
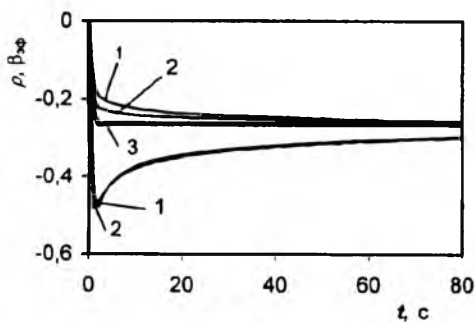


Рис. 1. Вклад в невязку (○) различных групп запаздывающих нейтронов при вводе реактивности $-0,25\beta_{эф}$ и $K_{эф} = 0,85$ (а), $-3,7\beta_{эф}$ и $K_{эф} = 1,07$ (б) (цифры у кривых обозначают номер группы)

Для определения поправочного множителя к показаниям реактиметра на Билибинской АЭС используют программный комплекс TS-2D-Ro, работа которого заключается в следующем. Последовательно проводится двумерный физический расчет реактора в исходном состоянии, затем в состоянии после ввода стержней (стержня) СУЗ вычисляется введенная отрицательная реактивность и коэффициент формы K_{ϕ} , т.е. относительное изменение нейтронного потока в месте расположения КНК-56 реактиметра. Далее решаются уравнения кинетики реактора при вводе такой реактивности по соответствующему закону (например, ввод стержней с постоянной скоростью или с ускорением) и для имитации работы реактиметра — обращенные уравнения кинетики с учетом вычисленного ранее коэффициента формы K_{ϕ} . В программе постулируется, что в процессе ввода реактивности K_{ϕ} меняется со временем пропорционально доле введенной отрицательной реактивности. Поправочный множитель к показаниям реактиметра определяется как отношение расчетной введенной реактивности к полученной из решения обращенных уравнений кинетики.

Трехмерными расчетами (программа TS-3D) подтверждено, что для холодного состояния реакторов, когда камера реактиметра размещается в нижней части канала бака биологической защиты (это соответствует уровню центра активной зоны), такой подход не вносит заметной погрешности. В этом случае возникающий в процессе ввода стержней аксиальный перекосяк в нейтронном распределении не сказывается на токе КНК-56. При измерениях на энергетическом уровне мощности камеру реактиметра помещают в крайнее верхнее положение, и она оказывается выше верхнего отражателя. Движение стержней СУЗ в этом случае приводит к более быстрому изменению коэффициента формы на начальном этапе их перемещения, что также мало сказывается на конечном результате решения обращенных уравнений кинетики. Наихудшим размещением камеры с точки зрения учета пространственных эффектов было бы ее смещение вниз до уровня нижней части активной зоны. Однако для ЭГП-6 этот вариант, как уже отмечалось, невозможен.

Рассматриваемая схема учета пространственных эффектов при измерении эффективности различных групп стержней СУЗ ЭГП-6 уже применена в работе [1]. На рис. 2 приводятся дополнительные данные, а именно показания реактиметра при измерениях на реакторе 2-го блока после сброса стержня РС-А3 04-14 (находится ближе других стержней к детектору) и симметричного ему стержня 18-08 (наиболее удаленного от детектора). Несмотря на то, что эффективность этих стержней одинаковая, наблюдается значительная разница в показаниях реактиметра (в начальный момент примерно в 2 раза). На том же рисунке приведены результаты расчетного моделирования работы реактиметра по описанной схеме. Совпадение с измерениями хорошее, различие иногда трудно определить. Это служит еще одним подтверждением действенности используемого на Билибинской АЭС подхода к учету пространственных эффектов.



Р и с. 2. Сравнение расчетной эффективности одиночных стержней РС-А3 с измерением: 1 — измерение; 2 — расчетное моделирование измерения; 3 — расчет (выше расчета располагаются данные для сброса стержня 18-08, ниже — для 04-14)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов И.С., Дементьев А.А., Куршанов А.В. и др. Физические характеристики реакторов ЭГП-6 после модернизации (холодное состояние). — Атомная энергия, 1999, т. 86, вып. 2, с. 94—99.
2. Хетрик Д. Динамика ядерных реакторов. М: Атомиздат, 1975.

3. Ефанов А.И., Лаврухин В.С. Вопросы измерения реактивности на больших реакторах. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1979, вып. 3(7), с. 17—27.
4. Казанский Ю.А., Матвеев И.П., Тютюнников П.Л., Шокотько А.Г. К учету пространственных эффектов при измерении реактивности методом обращенного решения уравнений кинетики. — Атомная энергия, 1981, т. 51, вып. 6, с. 387—389.
5. Баков А.Т., Казанский Ю.А., Кулабухов Ю.С. и др. Моделирование нестационарных нейтронных полей с целью выбора алгоритмов для цифровых реактиметров. — В сб.: Моделирование нейтронно-физических процессов в реакторах АЭС (тезисы докладов IV Всес. семинара по проблемам физики реакторов). М., ЦНИИатоминформ, 1985, с. 111—112.
6. Ваймугин А.А., Душин П.Г., Комиссаров О.В. и др. Нейтронно-физические характеристики реакторов БАТЭЦ (по результатам физических пусков четырех реакторов). — Атомная энергия, 1979, т. 46, вып. 6, с. 382—386.

Поступила в Редакцию 29.01.99

УДК 621.039

СОПОСТАВЛЕНИЕ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ СО СВИНЦОВЫМ И НАТРИЕВЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Сидоренко В.А. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

В последние годы некоторые публикации, предложения и обсуждения как внутри страны, так и на международных кворумах были посвящены пропаганде внедрения в ядерную энергетику новой реакторной технологии — быстрых реакторов, охлаждаемых жидким свинцом*. Эти действия поддерживаются активными проектно-конструкторскими проработками с соответствующими административными решениями. В качестве стратегической цели авторы предложения имеют в виду будущее широкомасштабное развитие ядерной энергетики осуществлять на реакторах такого типа, поскольку только они могут удовлетворить требования перспективной энергетики. В связи с этим возникают два круга научно-технических проблем: определение стратегии развития ядерной энергетики, место в этом развитии новых поколений быстрых реакторов и другой круг — выбор оптимальной технологии таких быстрых реакторов.

Обсуждение стратегии должно быть предметом отдельных публикаций, базирующихся на основательных исследованиях. Мне представляется важным здесь подчеркнуть центральное положение стратегии, которое уже сейчас, по моему мнению, может считаться неоспоримым: будущая ядерная энергетика не может быть однокомпонентной, базирующейся только на реакторах одного типа. Многокомпонентность ядерной энергетики является неизбежным условием ее развития, также как обязательна и важна роль в этом развитии быстрых реакторов. В этом плане базовые требования к ядерным энергетическим установкам будущего периода широкомасштабного развития ядерной энергетики — безопасность и экономичность — применимы в равной мере к системам любых типов (на тепловых и быстрых нейтронах) и любого технологического назначения и масштаба, технические решения которых будут, естественно, различными.

Причиной появления в последнее время предложений о развитии новой реакторной технологии на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем является утверждение авторов, что натриевая технология исчерпала свои возможности усовершенствования по факторам экономичности и безопасности или, более того, обладает неустранимыми недостатками, исключающими ее использование в перспективной ядерной энергетике при широком применении быстрых реакторов.

*16-й Конгресс мирового энергетического совета, Токио, 1995, доклад 2.3; Атомная энергия, 1996, т. 81, вып. 2, с. 89; Nuclear Engineering and Design, 1997, v. 173, p. 33; Генеральная конференция МАГАТЭ, 1998, «круглый» стол; доклад на бюро ОФТПЭ РАН 10.06.98; Белая книга ядерной энергетики, 1998, НИКИЭТ.