

СТАТЬИ

УДК 621.039.51

СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ КАНАЛА В РБМК

Краюшкин А.В., Захарова Л.Н. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

В связи с повышением мощности реакторов на 5—10% возрастает интерес к точности определения мощности каналов в системе контроля распределения энерговыделения и в особенности каналов с близкой к максимальной мощностью, которая и лимитирует увеличение мощности реактора. Мощность каналов определяется по показаниям системы контроля энерговыделения. В РБМК такая система основана на показаниях внутризонных датчиков и физическом расчете [1]. Датчики измеряют плотность потока нейтронов в отдельных каналах (примерно в 100—200). С помощью физического расчета данные измерений интерполируются на 1661 канал по специальной программе ПРИЗМА. Функционирование системы контроля иллюстрирует рис. 1. Физический расчет выполняется с учетом фактического состояния активной зоны на рассматриваемый момент времени по специальной программе (в настоящее время программе SADCO) с двухгрупповым диффузионным приближением.

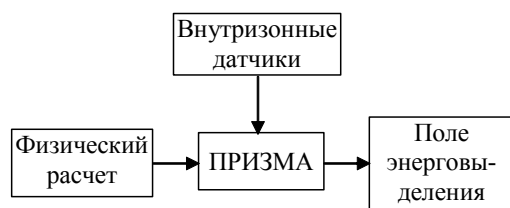
Показания датчиков включают в себя некоторую погрешность, возникающую из-за неизбежных отклонений их параметров при изготовлении и по другим причинам. Поэтому они отображают поле нейтронов в реакторе лишь приближенно. Физический расчет также вносит некоторую погрешность в результат — поле энерговыделения, регистрируемое системой контроля. Погрешность обусловлена как методическими причинами, так и неточным описанием свойств активной зоны. Неточное опи-

сание возникает из-за неопределенностей некоторых параметров, а иногда вследствие чрезвычайной сложности их точного учета, хотя теоретически параметры известны.

В последнее время сформулировано нетривиальное утверждение о том, что система контроля энерговыделения РБМК систематически превышает максимальную мощность канала на 5% [2]. Это утверждение относится не только к действующей, но и к любой другой подобной системе контроля. Завышение объясняется в основном наличием погрешности показаний датчиков. При увеличении мощности реактора завышение можно учесть, откорректировав соответствующим образом программу ПРИЗМА. Благодаря такой коррекции мощность реактора может быть повышена без увеличения максимальной мощности канала.

В настоящей статье это утверждение анализируется с помощью математического моделирования, включающего стохастический разброс отдельных параметров, который отражает погрешности внутризонных датчиков и неточное знание свойств активной зоны при физическом расчете. Моделирование выполняется с помощью программы STEPAN, включающей в себя блок восстановления поля энерговыделения по показаниям внутризонных датчиков. При таком подходе блок восстановления программы STEPAN выполняет функции программы ПРИЗМА. В остальном задача восстановления поля энерговыделения решается подобно тому, как это делается в штатной системе контроля энерговыделения.

Блок восстановления поля энерговыделения программы STEPAN представляет собой итерационный алгоритм, на каждом шаге которого решается задача на $K_{эф}$ (т.е. выполняется физический расчет). Его результаты сравниваются с показаниями внутризонных датчиков, и по итогам сравнения в каждой точке активной зоны



Р и с. 1. Иллюстрация работы системы контроля (восстановления) поля энерговыделения в РБМК

корректируется сечение генерации нейтронов в тепловой группе. Корректировка проводится в заданных пределах, обычно не более $\pm 3\%$. Итерационная задача считается решенной, когда отклонение расчетных и фактических показаний датчиков становится менее заданного значения (обычно $\sim 1\%$).

Для анализа рассматривалась задача, заключающаяся в последовательности расчетов (рис. 2). Она состояла из двух частей. В первой части (шаги 1—3 на рис. 2) подготавливалось «истинное» поле энерговыделения, во второй части (шаги 4, 5) моделировалась процедура восстановления поля энерговыделения по известным показаниям внутризонных датчиков. Опишем подробнее отдельные шаги:

1 — выполняется физический расчет выбранного состояния, т.е. решается задача на $K_{эф}$;

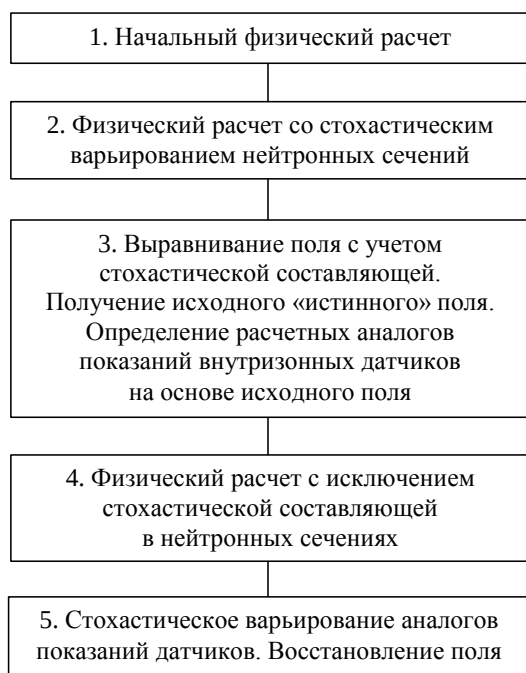
2 — некоторые параметры состояния стохастически варьируются, что приводит к изменению нейтронных сечений ячеек. Варьирование призвано отобразить обычно не учитываемые (или даже неизвестные) индивидуальные характеристики ячеек с ТВС и стержнями СУЗ. Варьирование выполнялось в предположении, что некоторые параметры ячеек распределены по нормальному закону с характеристиками, указанными в табл. 1. Эти характеристики для топлива получены на основе данных о технологическом разбросе, приводимом в технических

условиях на ТВС, для графита и стержней СУЗ — на основе изучения фактических данных. Кроме перечисленных в табл. 1, стохастический разброс имеют некоторые теплогидравлические параметры, участвующие в физическом расчете через обратную связь.

Особо важным параметром является содержание в топливе ^{236}U , так как оно для РБМК изготавливается из регенерированного отработавшего топлива и количество ^{236}U может варьировать от 0 до 10 кг/т. Учет этого оказывает существенное влияние на результаты физического расчета. Однако для целей настоящей работы достаточно рассмотреть параметры, перечисленные в табл. 1;

3 — полученное после варьирования поле энерговыделения выравнивается до отношения максимальной мощности канала к средней $K_r \approx 1,5$, характерного для реального распределения на мощности. Выравнивание выполняется с помощью блока восстановления программы корректировкой сечения генерации нейтронов. Оно с учетом влияния стохастической составляющей на шаге 2 принимается за исходное «истинное» поле;

4 — на четвертом шаге выполняется физический расчет с удалением ранее введенной стохастической составляющей в нейтронных сечениях (шаг 2), т.е. моделируется ситуация подготовки физического расчета для программы ПРИЗМА, в котором индивидуальные характеристики, моделируемые стохастической составляющей, не учитываются. Условно такой расчет можно назвать гладким;



Р и с. 2. Схема расчетов, моделирующих восстановление поля энерговыделения

Т а б л и ц а 1. Среднеквадратичное отклонение параметров

Параметр	Среднеквадратичное отклонение, %
Обогащение топлива	0,7
Загрузка урана в ТВС	0,5
Содержание эрбия в топливе	2
Глубина погружения стержня СУЗ	10 см
Плотность графита (локальная)	3

5 — определенные на шаге 3 расчетные аналоги показаний внутризонных датчиков стохастически варьируются в целях отразить наличие погрешности показаний датчиков. На основе гладкого физического расчета и «неточных» показаний датчиков восстанавливается поле и сравнивается с истинным (табл. 2).

Отношение максимальной мощности канала к средней на начальном физическом расчете для этого состояния составляло $K_r = 1,735$. Далее стохастически варьировали следующие параметры: обогащение топлива, содержание урана в ТВС, содержание эрбия в ТВС, плотность графита по блокам, глубина погружения стержней СУЗ. При этом отношение максимальной мощности к средней в трех случайных реализациях изменяется от 1,689 до 1,818, получаемые значения для истинного поля изменяются от 1,456 до 1,512. Для восстановленного поля $K_r = 1,450$ —1,462 в случае, когда погрешность датчиков принимается равной нулю (т.е. восстановление с точными значениями показаний датчиков приводит не к большим, а к меньшим значениям по отношению к истинным). При учете погрешности датчиков отношение максимальной мощности к средней увеличивается до 1,506—1,511. Для учета погрешности показания датчиков изменяли случайным образом в предположении их распределения по нормальному закону со среднеквадратичным отклонением 4% [2].

В табл. 2 приведены среднеквадратичные отклонения восстановленного поля от истинного. Отклонения в распределении мощности каналов и линейной мощности твэлов находятся

на уровне 1% для случая нулевой погрешности датчиков. При погрешности датчиков, характеризующейся среднеквадратичным отклонением 4%, отклонения мощности каналов и линейной мощности твэлов возрастают до 3 и 5% соответственно.

Из приведенных в табл. 2 данных следует, что в результате восстановления поля энерговыделения по показаниям датчиков с учетом их погрешности систематически завышается отношение максимальной мощности к средней, следовательно, и максимальной мощности канала по отношению к такому же восстановлению, но в котором погрешность датчиков считается равной нулю. Это систематическое завышение из-за погрешности датчиков составляет 3,6%, но следует из сравнения двух результатов восстановления. По нашему мнению, аналогичное сравнение выполняется, когда сопоставляется поле энерговыделения, полученное по программе ПРИЗМА и в результате сканирования поля одним датчиком. При этом оценка завышения максимальной мощности составляет 5%, что близко к полученной 3,6%. Использование одного датчика можно считать эквивалентным восстановлению поля системой датчиков с нулевой погрешностью. Если сравнить истинное отношение максимальной мощности к средней и восстановленное с учетом погрешности датчиков, то также видно завышение восстановленного поля энерговыделения, однако оно снижается до 1,9%. Причина такого снижения систематического сдвига в большую сторону заключается в том, что при получении истинного поля учитываются индивидуальные характеристики яче-

Т а б л и ц а 2. Результаты моделирования согласно схеме рис. 2

Параметр	Реализация		
	1	2	3
Начальный физический расчет (K_r)	1,735	1,735	1,735
Физический расчет со стохастическим варьированием нейтронных сечений (K_r)	1,689	1,818	1,726
Истинное поле энерговыделения (K_r)	1,512	1,473	1,456
Гладкий физический расчет (K_r)	1,484	1,514	1,534
Восстановленное поле энерговыделения без учета/с учетом погрешности датчиков	1,451/1,511	1,450/1,506	1,462/1,510
Среднеквадратичное отличие в двумерном распределении без учета/с учетом погрешностей датчиков, %	0,9/3,3	1/3,1	0,9/3,4
То же в трехмерном распределении, %	1/4,5	1,1/4,6	1/4,8

K_r — отношение максимальной мощности канала к средней.

ек, а гладкий физический расчет, лежащий в основе процедуры восстановления, их не учитывает.

Моделирование показывает, что из-за погрешности показаний датчиков отношение максимальной мощности к средней восстановленного поля энерговыделения оказывается немного выше истинного. Количественно это завышение оценивается по результатам моделирования в 2%. Однако завышение может переоцениваться почти вдвое (3,6%) вследствие того, что при восстановлении используется гладкий физический расчет, не учитывающий

индивидуальные характеристики ТВС и другие факторы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппчук Е.В., Потапенко П.Т., Постников В.В. Управление нейтронным полем ядерного реактора. М.: Энергоатомиздат, 1981.
2. Александров С.И., Зайцев М.П., Ильина Л.И. и др. Оценка погрешности контроля распределения энерговыделения на основе условной плотности распределения вероятности. — Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 5, с. 294—298.

Поступила в Редакцию 21.09.10

УДК 621.311.25.004.7

СОСТАВ И СТРУКТУРА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАТРАТ НА ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ БЛОКОВ АЭС

Былкин Б.К. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва),

Перегуда В.И., Шапошников В.А. (Ленинградская АЭС, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.),

Тихоновский В.Л. (ЗАО «Неолант», г. Москва)

Подготовка к выводу и вывод из эксплуатации энергоблока АЭС — комплексный процесс из нескольких этапов, на которых разрабатываются локальная (объектовая) концепция и программа вывода из эксплуатации, проводятся комплексное инженерное и радиационное обследование, дезактивация и демонтаж оборудования, обращение с радиоактивными отходами. На любом этапе вывода из эксплуатации принятие обоснованных решений может гарантироваться исключительно наличием и полнотой требуемой для этих целей информации.

Назначенный проектом (для отечественных блоков 30 лет) срок службы 17 блоков АЭС уже завершился или близок к окончанию, четыре блока — первые два блока Белоярской и Нововоронежской АЭС остановлены и находятся на этапе подготовки к выводу из эксплуатации. Начало массового останова блоков АЭС можно ожидать после 2016 г. До 2020 г. исчерпают продленный срок службы 3-й, 4-й блоки Нововоронежской, 1-й, 2-й блоки Кольской, первые два блока Ленинградской, три блока Билибинской АЭС.

Вывод из эксплуатации блока АЭС является масштабным организационным и техническим процессом и во многом сопоставим по объему

временных, финансовых и трудовых ресурсов с его сооружением. Основными задачами при выводе являются переработка и удаление для последующего хранения или захоронения радиоактивных отходов, которые будут образовываться при демонтаже как реактора, так и конструкций блока. Одним из наиболее опасных воздействий при демонтаже оборудования является радиационное, поскольку целенаправленно разрушаются защитные барьеры безопасности и возможен вынос за пределы блока большого количества радиоактивных веществ в твердом, жидком, газообразном состоянии и в виде аэрозолей. Обращение с радиоактивными отходами и радиационная безопасность играют наиболее значимую роль в стоимости вывода из эксплуатации.

С учетом длительности, сложности, опасности для персонала, населения и окружающей среды, значительной стоимости, а также развития современных информационных технологий, созданных с применением трехмерного моделирования, баз данных вывода из эксплуатации на некоторых АЭС необходимо и возможно предварительно моделировать процесс или его основные технологические операции на имитационных многомерных интерактивных моделях.