

СТАТЬИ

УДК 621.039.548

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ВВЭР ДЛЯ АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ

Пономаренко Г.Л., Быков М.А., Подшибякин А.К. (ФГУП ОКБ «Гидропресс»)

Детерминистический и вероятностный подходы. Современное обоснование безопасности базируется на двух подходах — детерминистическом и вероятностном. Оба подхода, внешне независимые, имеют внутреннее гармоничное единство, взаимно дополняющее один другой. Детерминистический подход ограничивают следующие условные категории [1]:

перечень исходных событий, приводящих к проектным авариям;

принцип независимого единичного отказа систем безопасности;

консервативный подход, заключающийся в моделировании наиболее неблагоприятных начальных и граничных условий. Это относится к начальным теплогидравлическим и нейтронным параметрам, стохастически реализующимся в некотором диапазоне, таким, как локальное и интегральное энерговыделение, температура, расход теплоносителя, проводимость газового зазора в твэле, уровень остаточного тепловыделения, эффекты и коэффициенты реактивности и др. Это относится и к таким граничным условиям, как зависимые отказы систем, задержки по времени и др.;

перечень критериев, удовлетворение которых есть условие успешного обоснования безопасности. При этом важный критерий — отсутствие кризиса теплообмена должен быть удовлетворен с высокой вероятностью — не менее 95%.

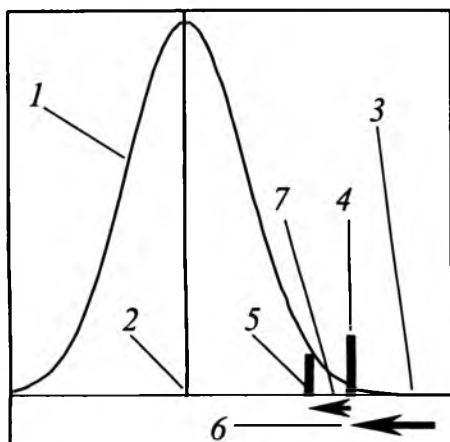
Как видно, перечисленные категории имеют вероятностную подоплеку. По сути, это дает основания полагать, что все, что выходит за ограничения детерминистического подхода, т.е. за проектные аварии, в которых возможны более тяжелые последствия, должны иметь низкую приемлемую для общества вероятность риска. Уверенность в этом, выраженную количественными значениями вероятности, призван обеспечить вероятностный анализ безопасности, являющийся эффективным средством для принятия решений по внедрению возможных усовершенствований. Вообще говоря, он должен помочь добиться оптимального компромисса между безопасностью и эффективностью.

Вероятностный анализ рассматривает все возможные реализации и оперирует своими категориями, в частности:

вероятность исходных событий, дерево событий, вероятность отказов;

критерии успеха для функций безопасности;

анализ неопределенности входных данных, в котором необходимо знание вероятностных функций распределения;



Р и с. 1. Принципиальная схема вероятностного распределения параметров, определяющих безопасность: 1 — реалистическое представление вероятности; 2 — наилучшее приближение (50%); 3 — сверхконсервативная область (более 99,9%); 4 — консерватизм детерминистического подхода (99,7—99,9%); 5 — оптимизация консерватизма с помощью вероятностного подхода (95%); 6 — оптимизация консерватизма с помощью программы MEX (энергораспределение); 7 — суммарный эффект — ежегодная экономия, равная стоимости 1—2 ТВС на каждом энергоблоке

низкая оцененная вероятность тяжелого повреждения активной зоны (не более 10^{-5} реактор/год) и предельного аварийного выброса (не более 10^{-7} реактор/год), установленная действующими в ядерной энергетике нормативно-техническими документами [1].

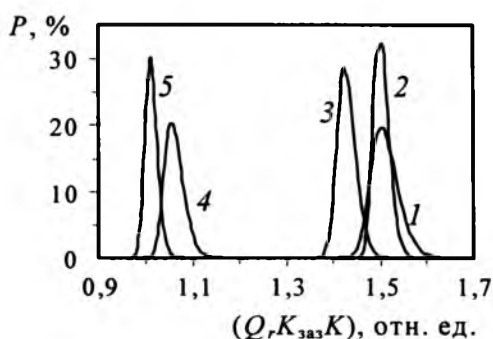
Моделирование вероятностного распределения требуется для всех параметров, имеющих неопределенности. Схема рис. 1 имеет качественно общий характер для многих параметров, не только таких, как максимальное локальное энерговыделение, интегральная мощность, но и таких, как время сброса поглощающих стержней системы аварийной защиты, теплотехнические параметры и др. Настоящая работа ограничена моделированием возмущенного потвзельного интегрального по высоте энерговыделения, однако этот подход может быть распространен и на другие ключевые функционалы энерговыделения, в частности, линейное энерговыделение и его аксиальный профиль.

Энергораспределение по твзлам и твзлов по мощности. Для проектных нарушений и аварий обычно проводится детерминистический анализ, для которого моделируется возмущенное предельно реализующееся энергораспределение [2], смоделированное с учетом всевозможных влияющих на него неопределенностей. Количественно их воздействие выражается коэффициентами запаса (K , $K_{\text{зас}}$). К таким неопределенностям относятся технологические неопределенности при изготовлении топлива (плотность, обогащение, геометрия), эксплуатационные (в частности, возмущения зазоров между ТВС за счет изгиба ТВС и твзлов, неопределенность знания и поддержания мощности реактора) и расчетные (погрешности расчетов и измерений энерговыделения). При выборе предельных отклонений начальных условий требуется применение статистических методов. В некоторых случаях (вероятностный анализ безопасности, запроектные аварии, АТWS — нарушения с отказом срабатывания аварийной защиты) руководства МАГАТЭ допускают проведение реалистического анализа с консерватизмом наилучшей (т.е. наиболее вероятной или медианной) оценки начального энергораспределения. В международной практике пока не разработаны общепринятые критерии для этого, и уровень консерватизма есть предмет специфических национальных подходов, к данной области относятся и результаты настоящей работы. Особое место занимают параметры активной зоны с большими неопределенностями, к которым относятся максимальная линейная и интегральная мощность твзла. Иногда применяется упрощенный подход с использованием их распределений (Q_i) без учета неопреде-

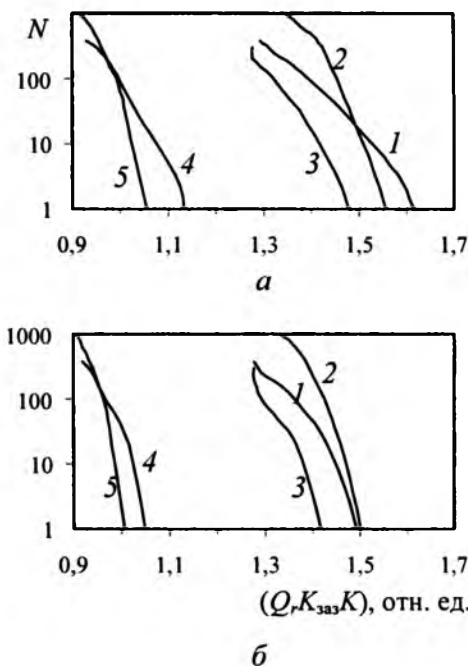
ленностей (K и $K_{\text{ззз}}$), иначе говоря, идеализированное распределение принимается в качестве наилучшей оценки, что представляется неверным решением.

В работах [3—5] представлена усовершенствованная методика и программа МЕХ, в которой действия неопределенностей складываются статистически $\{Q, K_{\text{ззз}}, K\}$, с помощью метода Монте-Карло, что усложнило моделирование в сравнении с обобщенной методикой [6], но обеспечило более высокие показатели по адекватности, чувствительности и детализации моделирования. Важно отметить,

что новый подход более корректно учитывает влияние зазоров между ТВС на энергораспределение не только при искривлении ТВС, но и для активной зоны с прямыми неискривленными ТВС как частный случай. В настоящей работе получены качественно новые результаты, что подтверждает его перспективность. На рис. 2 представлена типичная рассчитанная по программе МЕХ вероятность P появления в активной зоне (максимальный зазор принят равным 8,2 мм) твэлов с максимальной мощностью $\{Q, K_{\text{ззз}}, K\}$ для различных групп твэлов, дифференцированных по годам работы и размещению в ТВС. Здесь вероятность приведена для твэлов ряда 1 (периферийных), ряда 3 и внутренних твэлов в ТВС, т.е. далее ряда 4 в ТВС. На рис. 3 приведено соответствующее распределение $N(M)$ твэлов по мощности, характерное для максимально консервативного детерминистического анализа (доверительная вероятность $M = 99,9\%$), а также реалистического анализа с консерватизмом наилучшей оценки, т.е. наиболее вероятной реализации с $M = 50\%$. Рис. 3 интерпретируется следующим образом: менее 100 твэлов ряда 1 в ТВС первого года работы могут иметь мощность выше 1,4 отн. ед. с вероятностью не менее 99,9% или мощность выше 1,37 отн. ед. с вероятностью не менее 50%, а также менее одного твэла внутри ТВС четвертого года работы может иметь мощность выше 1,06 отн. ед. с вероятностью не менее 99,9% или мощность выше 1,01 отн. ед. с вероятностью не менее 50% и т.д.



Р и с. 2. Вероятность появления в активной зоне твэла максимальной мощности: 1 — ряд 1 в ТВС первого года; 2 — твэлы внутри ТВС первого года; 3 — ряд 3 в ТВС первого года; 4 — ряд 1 в ТВС четвертого года; 5 — твэлы внутри ТВС четвертого года



Р и с. 3. Распределение твэлов в активной зоне по мощности для доверительной вероятности 99,9% (а) и 50% (б) (обозначения кривых см. на рис. 2)

Распределение твэлов по мощности, подобное представленному на рис. 3, в настоящее время становится актуальным в международной практике и необходимо при оценке числа поврежденных как для эксплуатационных переходных режимов (0,1% твэлов), так и для различных классов постулируемых аварий (1 и 10% твэлов). Данный подход делает более четкими и ясными проектные основы и проектные критерии при обосновании безопасности ядерного топлива, он введен в действующую нормативно-техническую документацию за рубежом, в частности, в Финляндии. Представляется целесообразным аналогично усовершенствовать и соответствующие отечественные критерии [7, 8], в которых в настоящее время отсутствуют требования на число поврежденных твэлов в проектных авариях разных классов.

В таблице представлена информация, из которой, в частности, следует, что применение подхода с использованием энергораспределения Q_r без учета неопределенностей не может быть приемлемым для случая $M = 50\%$. Из таблицы, как и из рис. 2, видна причина этого — значительное смещение вправо наиболее вероятного возмущенного значения по отношению к невозмущенному ($1,51 > 1,42$ и $1,06 > 1,01$), что является следствием большого числа энергонапряженных твэлов в активной зоне и смещения распределений по $K_{зав}$ [3]. Напротив, предположение о необходимости их совпадения ошибочно и может представляться естественным только на первый взгляд, откуда, по-видимому, и возникло первоначальное представление о допустимости использования идеализированного распределения. Из таблицы видна низкая близкая к нулю вероятность того, что максимальная мощность реализуется в пределах идеализированного распределения. Отметим, что для других параметров безопасности предположение несмещенности может быть верным, например, для интегральной мощности активной зоны наиболее вероятное значение можно принять равным номинальному без учета погрешностей определения и поддержания.

Предельно реализующаяся мощность твэлов без учета и с учетом неопределенностей

Q_r , отн. ед.	$\{Q_r, K_{зав}, K\}$, отн. ед.	M , %
1,42	ТВС первого года работы	
	1,63	99,9
	1,51	50
	1,41	0,1
1,01	ТВС четвертого года работы	
	1,14	99,9
	1,06	50
	1,01	0,1

На рис. 4 представлено потвэльно предельно реализующееся энергораспределение, рассчитанное с помощью комплекса БИПР-ПЕРМАК без учета неопределенностей (рис. 4, а) и с помощью программы МЕХ (рис. 4, б) на примере ТВС первого года работы. Энергораспределение нормировано так, что среднее энерговыделение твэла в ТВС равно $Q \cdot 100$, где Q — относительная мощность ТВС. Для невозмущенного распределения $Q = 1,19$, $Q_r = 1,42$, $M \approx 0,1\%$, для возмущенного —

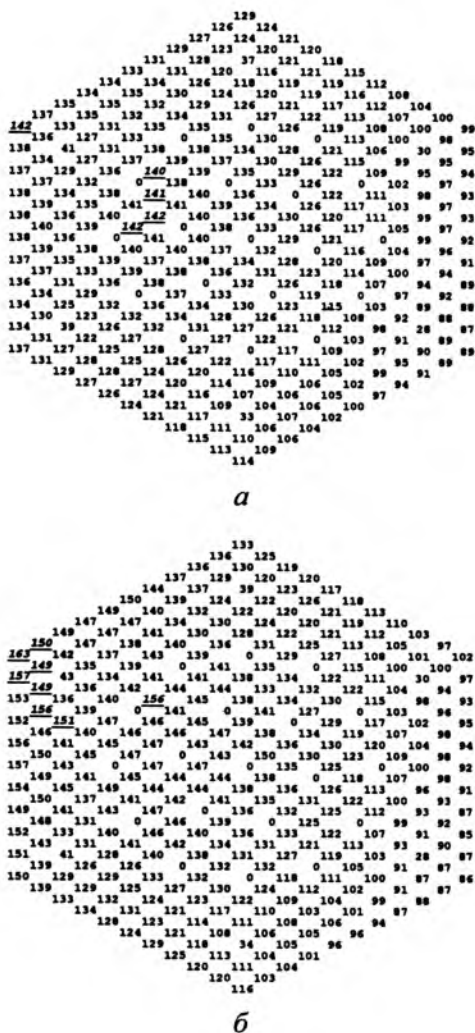
$Q = 1,24$, $(Q, K_{\text{ззз}}K) = 1,63$, $M \geq 99,9\%$. Отсюда видна также возможность прямого получения возмущения интегральной мощности ТВС $Q(1,24/1,19)$, которое, как и следовало ожидать, значительно меньше, чем для мощности твэла $Q_r(1,63/1,42)$. При этом для упрощения в одной ТВС консервативно смоделировано наличие наиболее энергонапряженных твэлов различных групп с использованием также и распределения рис. 3, т.е. рис. 4, б получен с помощью рис. 3, а. Полученные результаты позволяют сделать вывод о принципиальной возможности реализации экономически более эффективных компоновок топлива с уменьшением утечки нейтронов из активной зоны, что позволит повысить Q_r как минимум на 5%, но не превысит допустимые значения $\{Q, K_{\text{ззз}}K\}$. Из анализа информации проясняется также перспектива выбора оптимальных схем профилирования обогащения ТВС. Отметим, что потвэльная информация, моделированная с разумным и достаточным консерватизмом, делает предпочтительным экспериментально обоснованное использование ячеечной теплогидравлической модели ТВС для этих целей. Использование большего количества ТВС, моделированных по программе МЕХ, возможно, снизит консерватизм.

Таким образом, представленный подход позволяет корректно сформировать начальные условия для проведения расчетов в рамках обоих методов, что позволит уточнить запасы по безопасности и более обоснованно подходить к их выбору. С одной стороны, например, для анализа аварии с потерей теплоносителя (LOCA) это заметно снизит температуру оболочки твэла, что значимо для удовлетворения критерия по ее локальному окислению [7]. С другой, это позволит трансформировать высвободившиеся запасы в увеличение эффективности топливоиспользования путем снижения радиальной и аксиальной утечки нейтронов из активной зоны или в повышение мощности реактора.

Новые возможности методического подхода и программы МЕХ имеют следующие позитивные эффекты:

формирование возмущенного энергораспределения по твэлам, возмущенной интегральной мощности ТВС, а также распределения реальных твэлов по мощностям для анализа нарушений и аварий;

оптимальное профилирование обогащения топлива в ТВС;



Р и с. 4. Невозмущенное (а) и возмущенное потвэльное энергораспределение (б)

для детерминистического подхода — повышение невозмущенных неравномерностей энергораспределения на 5—7% за счет внедрения уменьшенной аксиальной и радиальной утечек или на столько же мощности активной зоны без ущерба для безопасности, что даст существенный экономический эффект;

для реалистического подхода — корректное моделирование энергораспределения в наилучшем приближении, ранний подход — идеализированное распределение без учета возмущений критиковался экспертами МАГАТЭ;

для вероятностного подхода — распределение максимальной локальной мощности.

Полученные результаты показывают возможности повышения обоснованности выбора начальных условий в детерминистическом и вероятностном анализах, оптимизации профилирования обогащения топлива в ТВС и в конечном счете снижения топливной составляющей стоимости атомной энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88/97). ПНАЭ Г-01-011-97. — Атомная энергия, 1997, т. 83, вып. 6, с. 469—497.
2. Шумский Б.Е., Пинегин А.А. Анализ консервативных подходов исследования аварий ВВЭР при трехмерном представлении активной зоны. — В сб.: XII семинар по проблемам физики реакторов. ВОЛГА-2002, с. 197—199.
3. Пономаренко Г.Л., Васильченко И.Н., Воронков А.В. и др. Исследование возможности повышения технико-экономических характеристик активной зоны ВВЭР-1000 с использованием вероятностного анализа возмущений зазоров. — В сб.: 2-я Всерос. конф. по безопасности АЭС с ВВЭР, Подольск, ОКБ «Гидропресс», 19—23 ноября 2001 г., с. 73.
4. Пономаренко Г.Л., Воронков А.В., Горохов А.К. Вероятностный метод оценки влияния зазоров между ТВС на энерговыделение в активной зоне ВВЭР-1000. — Атомная энергия, 2001, т. 91, вып. 1, с. 8—13.
5. Пономаренко Г.Л. Учет влияния искривления ТВС ВВЭР-1000 на мощность твэлов. — Там же, 1999, т. 87, вып. 3, с. 210—213.
6. Горохов А.К., Воронков А.В., Косоуров К.Б. и др. Учет отклонения межкассетных зазоров при обосновании безопасной эксплуатации реакторов ВВЭР-1000. — В сб.: 2-я Всерос. конф. по безопасности АЭС с ВВЭР, Подольск, ОКБ «Гидропресс», 19—23 ноября 2001 г., с. 23.
7. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций ПБЯ РУ АС-89, ПНАЭ Г-1-024-90.
8. Lunin G.L., Dragunov Yu.G., Voznesenskiy V.A. Russian advanced ВВЭР reactor designs. — Nucl. News, 2002, p. 28—36.

Поступила в Редакцию 25.12.02

УДК 621.039.553

СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК ЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ ОСТАНОВА ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Бубнова Т.А., Ионайтис Р.Р. (ФГУП НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалея)

Классификация. Жидкостные системы останова используются в ядерных энергетических установках как вторые системы, построенные на ином принципе действия, чем стержневые [1—11]. Они классифицируются по таким признакам, как: