

в реакторных условиях, но и для проведения специальных физических и технологических экспериментов. Затраты на переход от БР-2 к БР-5 составили примерно 10—15% того объема, который был бы необходим для сооружения БР-5 вновь. Весь цикл по разработке проекта модернизации, разработке и изготовлению оборудования, отладке систем и пуску БР-5 в здании БР-2 занял около 2 лет. Таким образом, само существование БР-2 позволило ускорить освоение натриевого теплоносителя и развитие быстрых реакторов, по крайней мере, на 5 лет, что чрезвычайно важно на начальных этапах разработки нового направления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лейпунский А.И., Грабин В.Г., Аристархов Н.Н. и др. Экспериментальные быстрые реакторы в СССР. — В кн.: Труды II Женевск. конф. Докл. сов. ученых. М.: Атомиздат, т. 2, 1959, с. 215—231.
2. Лейпунский А.И., Абрамов А.И., Андреев А.И. и др. Исследования по физике реакторов на быстрых нейтронах. — Там же, с. 377—397.
3. Поплавский В.М., Лейпунский А.И. — научный руководитель и организатор разработок и внедрения реакторов на быстрых нейтронах в ядерную энергетику. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2003, № 4, с. 4—12.
4. Поплавский В.М. Быстрые реакторы. Состояние и перспективы. — Атомная энергия, 2004, т. 96, вып. 5, с. 327—335.
5. Ошканов Н.Н., Баканов М.В., Потапов О.А. Опыт эксплуатации энергоблока БН-600 Белоярской АЭС. — Там же, с. 342—346.
6. Сараев О.М., Ошканов Н.Н., Выломов В.В. и др. Опыт эксплуатации энергоблока с БН-600. — Там же, 1996, т. 80, вып. 5, с. 330—337.
7. Поплавский В.М., Цибуля А.М., Камаев А.А. и др. Перспективный натриевый быстрый реактор БН-1800, удовлетворяющий требованиям ядерной энергетики XXI века. — Там же, 2004, т. 96, вып. 5, с. 335—342.

Поступила в Редакцию 12.01.06

УДК 621.039.548

НОВЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МИНИМАЛЬНО ДОСТАТОЧНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ ВВЭР

Пономаренко Г.Л., Рыжов С.Б., Быков М.А., Ермаков Д.Н. (ОКБ «Гидропресс»)

Для обоснования безопасности в детерминистическом приближении в качестве одного из ключевых используется количественный принцип, в соответствии с которым действие аварийной защиты моделируется без учета одного органа регулирования с максимальной эффективностью, зависшего в крайнем верхнем положении.

Аварийная защита реактора совместно с внутренне присущими свойствами активной зоны (коэффициентами реактивности) по существу предназначена для приведения реактора в безопасное состояние. Безопасное состояние характеризуется контролем реактивности, т.е. предотвращением неконтролируемого роста реактивности и ограничением мощности таким образом, чтобы обеспечить сохранность физических барьеров безопасности (топлива, оболочки твэла, границ контуров давления теплоносителя, защитной оболочки) на уровнях, установленных для нормальной эксплуатации и ее нарушений. В соответствии с нормами [1] требуется обеспечить и поддерживать (возможно совместно с подключением дополнительной системы) подкритическое состояние реактора. Для сравнения укажем, что современная зарубежная идеология безопасности, в частности, Требования европейских

эксплуатирующих организаций (European Utility Requirements Rev. С 2002 г.) требует от аварийной защиты компенсации мощностного эффекта реактивности и обеспечения подкритичности в горячем состоянии на нулевой мощности и вблизи него, допуская кратковременное и ограниченное повышение мощности при значительном снижении температуры теплоносителя, например, в аварии с разрывом паропровода. При этом не должны нарушаться проектные пределы по топливу.

Как показал анализ, наибольшая востребованность аварийной защиты из всех проектных относится именно к аварии с разрывом паропровода. Поэтому в настоящей статье достаточность аварийной защиты анализируется на примере этой аварии. Ставится вопрос о минимальном числе органов регулирования СУЗ, достаточном для обеспечения безопасности. Для его решения предлагается вероятностный подход. Конкретное решение приведено для ВВЭР-1000 с 49 органами регулирования СУЗ.

В действующих ВВЭР-1000 для останова используется различное число органов регулирования СУЗ в виде кластеров из различного числа стержней — 109 органов регулирования по 12 стержней (5-й блок Нововоронежской АЭС), 49 органов регулирования по 18 стержней (1-й блок Южно-Украинской АЭС), 61 орган регулирования по 18 стержней (серийные реакторы). Во вновь проектируемых ВВЭР-1000 используется до 121 органа регулирования (или 103 органа регулирования) по 18 стержней, в ВВЭР-1500 — 118 органов регулирования по 24 стержня. Для сравнения укажем, что в наиболее современных зарубежных PWR заметно меньшее число приводов, например, 53 органа регулирования (часть из них с уменьшенным содержанием поглотителя) по 24 стержня (AP-1000) и 89 органов регулирования (52 из них предназначены только для останова реактора, еще 37 и для останова реактора, и для регулирования температуры и аксиального офсета) по 24 стержня (EPR-1600).

Отказ аварийной защиты реактора возможен вследствие неисправности электрической или механической части. В первом случае не происходит обесточивания приводов и введения органов регулирования в активную зону. Вероятность такого события оценивается в проекте не выше $1 \cdot 10^{-6}$ на требование. Во втором случае возможно заклинивание различного числа органов регулирования СУЗ в различных ячейках активной зоны и на разной высоте.

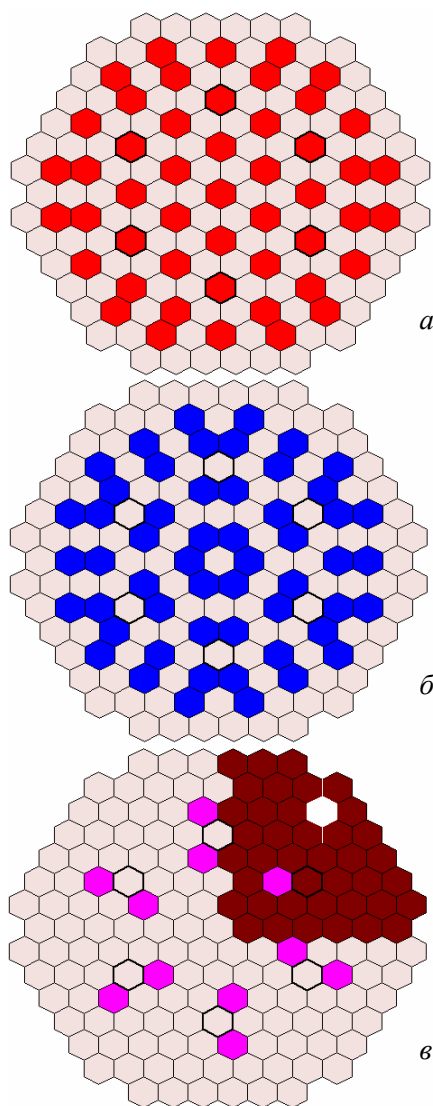
В первой части настоящей статьи для стационарного состояния постулируется отказ различного числа органов регулирования СУЗ — от нуля до их полного числа с заклиниванием на разной высоте и вычисляется вероятность введения оставшихся органов регулирования СУЗ. Во второй проводится теплогидравлический анализ для проверки достаточности эффективности аварийной защиты (с отказами разного числа органов регулирования СУЗ) для приведения реактора в безопасное состояние в аварии с разрывом паропровода. В авариях с захолаживанием двояка роль отрицательных обратных связей по температуре топлива и теплоносителя. В начальный период аварии снижение температуры воды и топлива приводит к росту мощности в холодном секторе активной зоны, причем холодная вода оказывает благоприятное воздействие на запас до кризиса, затем по мере роста температуры — к ее ограничению. Именно поэтому такие аварии корректно анализировать только с помощью сопряженных кодов. Использование таких кодов позволяет снизить избыточный консерватизм анализа даже для консервативного набора исходных данных.

Вероятностное моделирование эффективности аварийной защиты при множественных отказах органов регулирования. Вероятностное моделирование эффективности аварийной защиты при множественных отказах органов регулирования осуществлялось с использованием расчетов по программе БИПР-7А [2]. В эту программу был встроен генератор случайных чисел для моделирования номеров ячеек с отказавшими органами регулирования и высоты их зависания. В качестве программы, моделирующей активную зону, может быть принята и другая программа — аналог БИПР-7А, например, САПФИР_95&RC_ВВЭР [3, 4]. Для каждого полученного состояния с конкретной конфигурацией органов регулирования СУЗ в активной зоне рассчитывается введенная отрицательная реактивность, т.е. эффективность аварийной защиты.

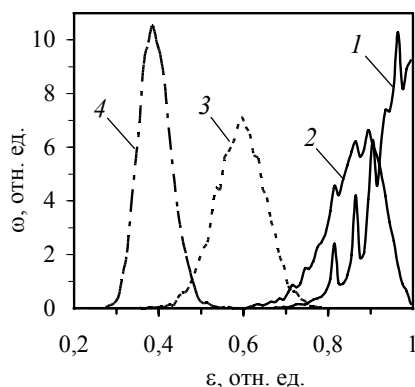
На рис. 1 представлена картограмма размещения 103 органов регулирования СУЗ в активной зоне ВВЭР-1000. Из 103 выделена независимая подсистема из 49 органов регулирования (см. рис. 1, а), для которой проводится анализ достаточности. Остальные 54 органа регулирования (см. рис. 1, б) могут образовать вторую независимую подсистему, эффективность которой здесь не анализируется, но ожидается не ниже первой.

На рис. 2, 3 приведено вероятностное распределение эффективности аварийной защиты при несрабатывании различного числа органов регулирования СУЗ. Под несрабатыванием или отказом здесь понимается заклинивание органа регулирования СУЗ в промежуточном положении по высоте активной зоны, выбираемом как случайная величина, которая равномерно распределена в диапазоне от минимального значения ($H_{\min} = 0$ высоты от низа активной зоны) до максимального ($H_{\max} = 100\%$ высоты от низа активной зоны на рис. 2, 4 и 30% на рис. 3, 5). Равновероятное зависание по всей высоте активной зоны ($H_{\max} = 100\%$) является консервативным предположением, в нижней трети активной зоны ($H_{\max} = 30\%$) — более реалистичным с учетом данных о фактах зависания органов регулирования СУЗ, имевших место в 1990-х годах на отечественных и зарубежных реакторах.

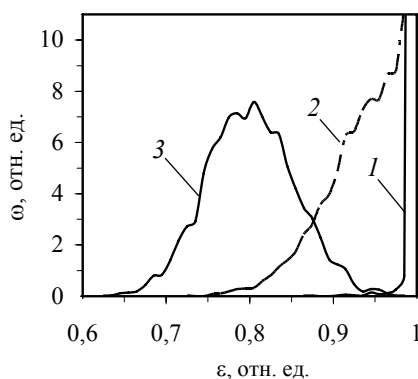
Моделировали различное число несрабатывавших органов регулирования СУЗ — от нуля до полного числа 49. Номер ячейки с отказавшим органом регулирования СУЗ моделируется



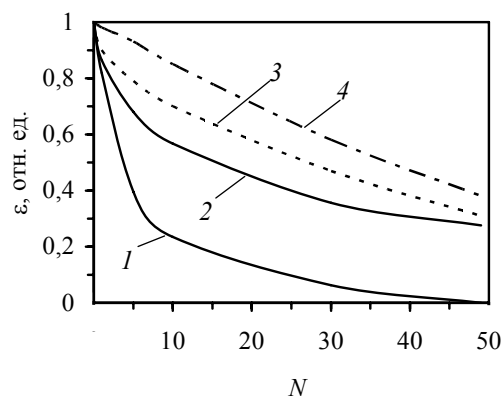
Р и с. 1. Картограмма размещения 103 ОР СУЗ в активной зоне ВВЭР-1000 с выделением подсистемы из 49 органов регулирования СУЗ и холодного сектора: а — подсистема из 49 органов регулирования; б — подсистема из остальных 54 органов регулирования; в — ячейки прилегающего к аварийной петле холодного сектора активной зоны (■) и ячейки (●), для которых в вариантах с консервативным подходом по нейтронно-физическим характеристикам задавалось погружение органов регулирования СУЗ для возмущения поля энерговыделения и смещения горячего канала в ядро (ячейку) холодного сектора (○)



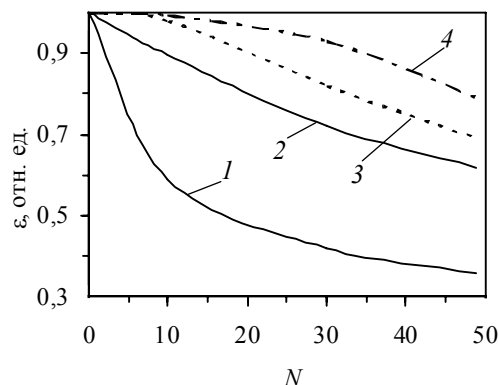
Р и с. 2. Вероятностное распределение (частота) ω эффективности аварийной защиты ε при несрабатывании 5 (1), 10 (2), 30 (3), 49 органов регулирования (4) при консервативном предположении, что органы регулирования заклинивают равномерно по высоте активной зоны ($H_{\text{макс}} = 100\%$, $H_{\text{мин}} = 0$)



Р и с. 3. Вероятностное распределение (частота) ω эффективности аварийной защиты ε при несрабатывании 10 (1), 30 (2), 49 органов регулирования (3) при реалистичном предположении, что органы регулирования заклинивают в нижней трети активной зоны равномерно ($H_{\text{макс}} = 30\%$, $H_{\text{мин}} = 0$)



Р и с. 4. Зависимость эффективности аварийной защиты ε от числа заклинивших органов регулирования N для вероятности 100 (1), 99 (2), 95 (3), 50% (4) при консервативном предположении, что органы регулирования заклинивают равномерно по высоте активной зоны ($H_{\text{макс}} = 100\%$, $H_{\text{мин}} = 0$)



Р и с. 5. Зависимость эффективности аварийной защиты ε от числа заклинивших органов регулирования N для вероятности 100 (1), 99 (2), 95 (3), 50% (4) при реалистичном предположении, что органы регулирования заклинивают в нижней трети активной зоны равномерно ($H_{\text{макс}} = 30\%$, $H_{\text{мин}} = 0$)

характер, не зависящий от момента кампании и конкретной загрузки. Эффективность аварийной защиты и вероятность на рис. 2—5 следует понимать как «не менее» указанного значения. На основе базовых распределений (см. рис. 2, 3) рассчитана вероятность реализации (50, 95, 99 и 100%) эффективности аварийной защиты. Условному значению 50% (медиане) примерно соответствует наиболее вероятная эффективность аварийной защиты, т.е. реализуемая с максимальной частотой в статистических испытаниях. Значения 95, 99 и 100% указывают на минимальную вероятность реализации, находящуюся в диапазонах (95%, 99%], (99%, 99,99%], (99,99%, 100%] соответственно. Физический смысл вероятности 100% соответствует абсолютной минимальной эффективности аварийной защиты, т.е. детерминистическому моделированию наиболее эффективной компактной конфигурации из определенного числа органов регулирования СУЗ, оставшихся в верхнем положении, на высоте $H_{\text{макс}}=100\%$. Такая эффективность была бы получена как предельная точка левой стороны распределений на рис. 2, 3 при неограниченном числе статистических испытаний. Соответственно предельная точка с правой стороны распределений на рис. 2, 3 при неограниченном числе статистических испытаний соответствует состоянию с введением органов регулирования в нижнее положение до высоты $H_{\text{мин}}$.

Из представленной на рис. 2—5 информации можно сделать следующие выводы относительно эффективности аварийной защиты, реализуемой при несрабатывании различного числа органов регулирования:

большая дисперсия распределения кривых на рис. 2, 3 свидетельствует о перспективности предложенного вероятностного подхода к обоснованию критериев успеха аварийной защиты;

минимальная эффективность аварийной защиты с отказом до четырех органов регулирования, реализуемая с вероятностью не менее 95% ($P \geq 95\%$), оказывается не ниже эффективности аварийной защиты без учета одного органа регулирования с максимальной эффективностью (см. рис. 4 — эффективность аварийной защиты $\sim 0,82$ отн. ед. для $P = 100\%$). В настоящее время оцененная в проекте вероятность отказа четырех органов регулирования СУЗ не превышает $1 \cdot 10^{-8}$ на требование. Однако оставшейся эффективности аварийной защиты достаточно для останова реактора с вероятностью не менее 95%. Согласно дополнительным аналогичным расчетным оценкам для ВВЭР-1500 с числом органов регулирования 118 выводы слабо меняются в сторону увеличения числа отказавших органов регулирования, т.е. минимальная эффективность аварийной защиты с отказом до пяти—семи органов регулирования ($P \geq 95\%$) не ниже эффективности аварийной защиты без учета одного органа регулирования с максимальной эффективностью. Таким образом, предла-

гаемый вероятностный подход позволяет прояснить глубокий смысл и вероятностную основу постулирования простого количественного принципа аварийной защиты без учета одного органа регулирования с максимальной эффективностью ($P = 100\%$) в качестве одного из ключевых принципов для обоснования безопасности в детерминистическом приближении;

при заклинивании всех 49 органов регулирования эффективность аварийной защиты ($P \geq 95\%$) будет не ниже эффективности аварийной защиты при зависании до шести—семи органов регулирования в верхнем положении на высоте $H_{\text{макс}}$ (см. рис. 4, 5, $P = 100\%$). Этот вывод важен и непосредственно используется при моделировании аварийного режима во второй части статьи;

эффективность аварийной защиты ($P \geq 95\%$) при заклинивании до 30 органов регулирования в нижней трети активной зоны будет не ниже эффективности аварийной защиты без учета одного органа регулирования с максимальной эффективностью $\sim 0,82$ отн. ед. (см. рис. 5, $P = 100\%$). Этот вывод свидетельствует о незначительной потере эффективности как при недостаточно полном перекрытии активной части топлива поглотителем после полного введения органов регулирования СУЗ в активную зону, так и при реальном заклинивании, имевшем место ранее на отдельных PWR и ВВЭР-1000.

Теплогидравлический анализ аварии с разрывом паропровода. Разрыв паропровода с отказом различного числа органов регулирования СУЗ рассчитывали с помощью нового комплекса сопряженных кодов ТРАП-КС. Он включает в себя программные модули КАРТА для расчета пространственных эффектов переноса нейтронов в активной зоне, КАМЕРА для моделирования эффектов перемешивания в нижней и верхней камерах смешения, ДИНАМИКА-97 [5]. Два последних модуля разработаны ОКБ «Гидропресс», первый — НИТИ им. А.П. Александрова.

Комплекс ТРАП-КС находится в стадии опытной эксплуатации, разработан верификационный отчет, аттестация планируется в 2006 г. В нем обеспечена передача данных из кода КАРТА (средняя мощность реактора, теплогидравлические параметры на входе и выходе из активной зоны) и обратно из кода ДИНАМИКА-97 в КАРТА (перепад давления на активной зоне, теплогидравлические характеристики на входе в реактор).

Нейтронные константы рассчитаны с помощью кода САПФИР_95.1 [3], выгорание и неравномерность энерговыделения (K_k) внутри ТВС — САПФИР_95&RC_ВВЭР[4].

Реалистичность и консерватизм анализа. Исходные теплогидравлические данные были приняты традиционно консервативными, в частности, по степени истечения пара в разрыв и соответствующему охлаждению активной зоны. В выбранных ТВС, содержащих наиболее теплонапряженные твэлы, рассчитывали состояние твэлов в приближении «горячей струи». В этом случае для наиболее теплонапряженных твэлов выделяются специальные каналы и относительное энерговыделение в каждый момент времени определяется как энерговыделение в ТВС (Q), рассчитанное с помощью модуля КАРТА и умноженное на коэффициент неравномерности внутри каждой ТВС с учетом возможных неопределенностей ($K_k \cdot K_{\text{зав}} \cdot K_{\text{инж}}$). Использовали консервативное значение $K_{\text{зав}} \cdot K_{\text{инж}} = 1,2$ (далее вместо произведения используется просто $K_{\text{инж}}$) с учетом результатов работы [6]. Критери-

альные параметры для наиболее теплонапряженного твэла рассчитываются консервативно в предположении его размещения в окружении таких же горячих струй.

Консервативными (в пределах допуска) моделировали теплогидравлические параметры, такие, как давление, температура теплоносителя на входе, его расход, газовый зазор между таблеткой и оболочкой в твэле, площадь поверхности теплообмена под уровнем воды в парогенераторах, корреляция для коэффициента запаса до кризиса теплообмена, отказ на открытие предохранительного клапана компенсатора давления и др. Консервативно принято отсутствие турбулентного обмена массой и энергией между выбранными расчетными ячейками. В этом случае на входе в ТВС активной зоны имеет место неперемешивание потоков теплоносителя из петель, а общий коэффициент межпетлевого перемешивания в реакторе определяется только выбранной нодализацией в напорной и сборной камерах реактора и при работе четырех ГЦН консервативно оценивается равным около 8%, поскольку более реальное его значение составляет около 20%. Использование реальных характеристик перемешивания позволит снизить консерватизм, но может быть применено после комплексной верификации нейтронной, теплогидравлической и гидродинамической частей сопряженных кодов, как предлагается в работах [7, 8].

При простом расчете в модуле КАРТА для стационарного состояния перед аварией моделируются реалистические (без учета отклонений) нейтронно-физические характеристики активной зоны. В принципе такой реалистический подход и должен применяться для запроектных аварий, к которым относится рассматриваемый режим с множественными отказами органов регулирования СУЗ. Тем не менее наряду с таким реалистическим подходом был применен и консервативный подход. Следует осознавать, что понятие необходимого уровня консерватизма основано в немалой степени на качественных, а не только на количественных критериях и может реализовываться по-разному. В последнее время за рубежом все более широко применяется подход «реалистическое приближение + анализ неопределенностей», который представляется наиболее перспективным для устранения избыточного консерватизма, однако требует немалых расчетных ресурсов и затрат [9]. При таком подходе проводится серия теплогидравлических расчетов (60—100 расчетов) с вероятностным моделированием некоторых исходных параметров в их области неопределенности. Затем с приемочными критериями сравниваются варианты, в которых получена наиболее неблагоприятная реализация выходных параметров, с вероятностью не ниже 95% попадающих в интервал неопределенности с доверительной вероятностью также не ниже 95% (95%/95%). При этом возможно использование некоторого дополнительного запаса на лицензирование. В настоящей работе использовали заведомо повышенный консерватизм как альтернативу указанному подходу, что позволяет ускорить расчеты. Применение более реалистических сопряженных кодов частично устраняет избыточный консерватизм даже при использовании консервативного набора исходных данных. По экспертной авторской оценке детерминистическому консервативному варианту, моделируемому в настоящей работе, соответствует вероятностный уровень не ниже ~99%/99%.

Консервативный подход применялся к наиболее значимому для выполнения критериев параметру, обладающему к тому же наибольшей неопределенностью, — энерговыделению в ТВС следующим образом: с помощью модуля КАРТА модели-

ровали стационарное состояние перед исходным событием таким образом, чтобы искусственно повысить неравномерность энерговыделения в секторе, прилегающем к петле с аварийным парогенератором («холодный» сектор). Для этого во все секторы активной зоны, кроме холодного, погружали две группы органов регулирования СУЗ (не из числа аварийной защиты), что отмечено на рис. 1, в. Однако такого возмущения оказалось недостаточно, и для реализации параметров, равных или близких к проектным пределам, дополнительно моделировали повышенную мощность активной зоны. Такой консервативный подход позволяет с запасом учесть не только неопределенности состояний реакторной установки, погрешности расчетов и измерений, но и обнаружить достаточные запасы для существенного повышения мощности реактора, что согласуется с результатами работы [10].

Для реалистического подхода моделировали конструкцию органов регулирования СУЗ из B_4C (~90% длины) и Dy_2O_3 (~10% длины в нижней части). Для консервативного подхода моделировали заниженную эффективность органов регулирования СУЗ, задаваемую состоящими только из Dy_2O_3 (100% длины), который является менее эффективным поглотителем (примерно на 10—15%) по сравнению с карбидом бора. Для обоих подходов в вариантах с полным введением органов регулирования СУЗ в активную зону консервативно моделировали, что стержни не доходят до нижнего торца топлива примерно на 10% высоты. Время погружения органов регулирования СУЗ принималось равным как проектному 4 с, так и увеличенному 15 с. Результаты анализа приведены в табл. 1, 2. Рассматривали падение разного числа органов регулирования СУЗ, включая варианты с наиболее консервативными комбинациями отказавших органов регулирования. В вариантах с падением трех групп в активную зону вводятся 19 наиболее эффективных органов регулирования СУЗ симметрично по секторам. Такие варианты предназначены для демонстрации достаточности относительно небольшого числа органов регулирования СУЗ для приведения активной зоны в безопасное состояние.

Т а б л и ц а 1. Выполнение критериев при разрыве паропровода в конце топливной загрузки

Но- мер	Вариант	Отключение ГЦН после начала исходного события	Порядок введения 49 органов регулирования после сигнала аварийной защиты	$T_{\text{тmax}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{обmax}}, ^\circ\text{C}$	Выпол- нение критериев
Реалистичная модель						
1	1. Без аварийной защиты	На аварийной петле	Все зависли	2086	347	Да
2	2. То же	Без отключения	»	2512	352	Да
3	3. »	Все 4	»	2394	362	Да
4	1. 3 группы ОР	На аварийной петле	Три группы введены за 4 с	1543	347	Да
5	2. »	Без отключения	То же	1712	347	Да
6	3. »	Все 4	»	1520	347	Да
Консервативная модель						
7	1. Без аварийной защиты	На аварийной петле	Все зависли	2603	355	Да
8	2. То же	Без отключения	»	>2840	>630	Нет

9	3. »	Все 4	»	>2840	>1000	Нет
10	1. 8 ОР за 15 с	На аварийной петле	8 зависли, остальные введены за 15 с	2499	656	Да
11	2. »	Без отключения	То же	2697	694	Да
12	3. »	Все 4	»	2452	348	Да
13	1. 8 ОР за 4 с	На аварийной петле	8 зависли, остальные введены за 4 с	2420	657	Да
14	2. »	Без отключения	То же	2806	765	Нет
15	3. »	Все 4	»	2380	486	Да
16	1. 1 ОР за 15 с	На аварийной петле	1 завис, остальные введены за 15 с	2460	348	Да
17	2. »	Без отключения	То же	2620	348	Да
18	3. »	Все 4	»	2397	348	Да
19	1. 1 ОР за 4 с	На аварийной петле	1 завис, остальные введены за 4 с	2060	348	Да
20	2. »	Без отключения	То же	2082	348	Да
21	3. »	Все 4	»	1994	348	Да

Примечания. В вариантах 1—6 в стационарном состоянии $N = 100\%$, $K_r = 1,4$, $K_z = 1,17$ ($H = 90\%$), $K_{инж} = 1,2$, $Q_{l_{max}} = 328$ Вт/см, коэффициент запаса до кризиса теплообмена 1,9, $T_{t_{max}} = 1519$ °C, $T_{об_{max}} = 347$ °C. В вариантах 7—21 в стационарном состоянии $N = 113,3\%$, $K_r = 1,49$, $K_z = 1,26$ ($H = 15\%$), $K_{инж} = 1,2$, $Q_{l_{max}} = 425$ Вт/см, коэффициент запаса до кризиса теплообмена 1,55, $T_{t_{max}} = 1920$ °C, $T_{об_{max}} = 348$ °C.

Т а б л и ц а 2. Выполнение критериев при разрыве паропровода в начале топливной загрузки

Но- мер	Вариант	Отключение ГЦН после начала исходного события	Порядок введения 49 органов регулирования после сигнала аварийной защиты	$T_{t_{max}}$, °C	$T_{об_{max}}$, °C	Выпол- нение критериев
Реалистичная модель						
1	2. Без аварийной защиты	Без отключения	Все зависли	2057	352	Да
2	1. 3 группы ОР	На аварийной петле	Три группы упали за 4 с	1476	347	Да
Консервативная модель						
3	2. Без аварийной защиты	Без отключения	Все зависли	2453	727	Да
4	3. То же	Все 4	»	2189	858	Да

Примечания. В вариантах 1, 2 в стационарном состоянии $N = 100\%$, $K_r = 1,41$, $K_z = 1,13$ ($H = 45\%$), $K_{инж} = 1,2$, $Q_{l_{max}} = 319$ Вт/см, коэффициент запаса до кризиса теплообмена 2,13, $T_{t_{max}} = 1476$ °C, $T_{об_{max}} = 347$ °C. В вариантах 3, 4 в стационарном состоянии $N = 113,8\%$, $K_r = 1,5$, $K_z = 1,17$ ($H = 30\%$), $K_{инж} = 1,2$, $Q_{l_{max}} = 406$ Вт/см, коэффициент запаса до кризиса теплообмена 1,45, $T_{t_{max}} = 1869$ °C, $T_{об_{max}} = 347$ °C.

В качестве предельного случая рассматривали отказ электрической части аварийной защиты, при котором не происходит обесточивания приводов и введения органов регулирования в активную зону. Вероятность такого события не превышает $1 \cdot 10^{-6}$ на требование.

Моделировали консервативное зависание восьми (консервативно принято более шести—семи органов регулирования) наиболее эффективных органов регулирования СУЗ в холодном секторе в крайнем верхнем положении, что обеспечит не

меньшую эффективность аварийной защиты при зависании всех 49 органов регулирования СУЗ (равновероятно по высоте). Рассматривали также традиционные варианты с зависанием одного наиболее эффективного органа регулирования СУЗ в холодном секторе в крайнем верхнем положении. Наконец, рассматривали три сценария: 1 — с отключением ГЦН на аварийной петле (проектное протекание режима), 2 — без отключения ГЦН на аварийной петле и 3 — с отключением всех четырех ГЦН (обесточивание). Сценарии 2 и 3 содержат в себе дополнительные отказы, вероятность каждого из них не превышает $2 \cdot 10^{-3}$. Режим анализировали для наиболее консервативного момента — конца работы стационарной кампании ВВЭР-1000, когда обратная связь по температуре теплоносителя наиболее отрицательна (см. табл. 1), а также и для начала стационарной кампании (см. табл. 2) для сравнения.

Критерии проектных аварий. При анализе проектных аварий проверяется выполнение следующих критериев:

отсутствие локального плавления топлива на протяжении всего переходного процесса. Консервативно температура выгоревшего топлива в твэлах не должна превышать 2570 °С, после двух лет работы 2700 °С, для свежего 2840 °С;

соблюдение основных критериев охлаждения активной зоны (максимальная температура оболочки твэлов не должна превышать 1200 °С, локальная глубина окисления 18% первоначальной глубины, количество прореагировавшего циркония оболочек твэлов — 1% его массы в активной зоне);

давление теплоносителя, охлаждающего активную зону, не должно превышать расчетное на 35% (с учетом динамики переходных процессов в оборудовании, трубопроводах и времени срабатывания предохранительных устройств), т.е. 23,8 МПа;

давление среды второго контура в парогенераторах и паропроводах свежего пара не должно превышать расчетное на 35% (с учетом динамики переходных процессов в оборудовании, трубопроводах и времени срабатывания предохранительных устройств), т.е. 10,5 МПа;

максимальная радиально усредненная энтальпия выгоревшего топлива не должна превышать 840 Дж/г в любой точке активной зоны.

Проектные и запроектные аварии. Авария с разрывом паропровода является одной из наиболее маловероятных проектных, в Требованиях европейских эксплуатирующих организаций она также относится к категории маловероятных исходных событий проектных аварий. Поэтому указанные критерии, строго говоря, должны применяться только к варианту 19 в табл. 1 и к вариантам 20 и 21 с дополнительными отказами. Все остальные варианты табл. 1, 2 с множественными отказами органов регулирования СУЗ относятся к запроектным авариям. В идеологии Требований европейских эксплуатирующих организаций это соответствует категории «расширенных условий проектирования», подразделяемой на подкатегории «сложных последовательностей» и «тяжелых аварий», для которых критерии менее жесткие, чем для проектных аварий. Считается, что повреждение активной зоны начинается при нарушении критериев проектных аварий (категория 4). Сложные последовательности проходят без значительных повреждений активной зоны, при тяжелых авариях возможны существенные повреждения и плавление активной зоны.

Результаты анализа. В табл. 1, 2 приведены проанализированные варианты разрыва паропровода и выводы о выполнении или невыполнении всех критериев («да» или «нет»). Из всех критериев численные значения представлены только для максимальной температуры топлива ($T_{\text{тmax}}$) и оболочки твэла ($T_{\text{обmax}}$). В случае возникновения кризиса теплообмена максимальная температура оболочки твэла выделена жирным шрифтом. В табл. 1, 2 приведено также стационарное состояние до аварии с указанием необходимых параметров. Видно, что для реалистического подхода обеспечиваются благоприятные показатели. Для консервативного подхода специально смоделированы более пессимистические показатели, близкие к проектным пределам, однако, как говорилось, для их реализации пришлось моделировать погружение органов регулирования СУЗ в активную зону и существенное повышение мощности активной зоны.

Из результатов анализа, представленных в табл. 1, 2, можно заключить следующее:

в вариантах с реалистическим подходом (1—6 в табл. 1 и 1, 2 в табл. 2) все критерии выполняются. Вариантами 4—6 показана достаточность всего 19 органов регулирования СУЗ, равномерно распределенных по секторам активной зоны, для приведения реактора в безопасное состояние;

большинство рассмотренных вариантов с консервативным подходом (7, 10—13, 15—21 в табл. 1 и 3, 4 в табл. 2) также обеспечивают выполнение всех критериев;

варианты с консервативным подходом 8, 9 в табл. 1 с дополнительными отказами не удовлетворяют критериям проектных аварий и приводят к плавлению центральной части незначительного числа твэлов (не более 0,01%) в активной зоне. Поскольку расчет останавливается при достижении температуры плавления топлива, то нет ответа на вопрос, будет ли нарушен критерий по температуре оболочки твэла. Аналогичные сценарии, реализующиеся в начале кампании, удовлетворяют критериям (см. варианты 3, 4 в табл. 2), что объясняется менее отрицательной обратной связью по температуре теплоносителя. Заметим, что вероятность того, что ГЦН на петле с аварийным парогенератором не отключится, для ВВЭР-1000 оценена в проекте равной $1,7 \cdot 10^{-3}$, вероятность обесточивания в результате закрытия стопорных клапанов турбогенератора — $1,3 \cdot 10^{-3}$, что свидетельствует о маловероятности таких запроектных сценариев. Таким образом, варианты 8, 9 в идеологии Требований европейских эксплуатирующих организаций относятся к подкатегории сложных последовательностей;

варианты 16—21 показывают, что зависание одного наиболее эффективного органа регулирования в крайнем верхнем положении в холодном секторе активной зоны не приводит к нарушению выполнения критериев. Кризис теплообмена отсутствует. Причем в вариантах 19—21 истинно проектных аварий режимы протекают с незначительным повышением температуры топлива. Таким образом, система из 49 органов регулирования СУЗ обеспечивает ввод эффективности, достаточной для приведения реактора в безопасное состояние;

маловероятные запроектные варианты 10—15, кроме варианта 14, в табл. 1 показывают, что зависание восьми органов регулирования в крайнем верхнем положении в наиболее эффективной компактной конфигурации (и в холодном секторе

активной зоны) не приводит к нарушению выполнения критериев. Это означает, что зависание даже всех 49 органов регулирования СУЗ (равновероятно по высоте и по ячейкам активной зоны) с вероятностью не ниже 95% обеспечит эффективность аварийной защиты, достаточную для приведения реактора в безопасное состояние. Исключением является вариант 14 с дополнительным маловероятным отказом, при котором реализуется плавление центральной части незначительного числа твэлов (не более 0,01%) в активной зоне. Тем не менее вариант 14 проходит более мягко по сравнению с вариантами 8, 9, в частности, температура оболочки 765 °С значительно ниже 1200 °С и также может быть отнесен к запроектной подкатегории сложных последовательностей. Сценарии 10—15 можно считать «экзотическими» по числу зависших в крайнем верхнем положении органов регулирования СУЗ и их концентрированности в холодном секторе;

замедление падения органов регулирования СУЗ с проектного значения 4 с до 15 с (сравним варианты 19—21 с вариантами 16—18) не приводит к нарушению выполнения критериев, но существенно увеличивает (на 400—500 °С) максимальную температуру топлива. Однако для вариантов, в которых в холодный сектор не падают органы регулирования СУЗ, эта закономерность не имеет места и даже проявляется парадоксальный на первый взгляд результат, при котором более быстрое падение органов регулирования может приводить к худшему результату (сравним варианты 14 и 11). Сравнение варианта 7 с вариантами 10 и 13 показывает, что в некоторых случаях вариант «без аварийной защиты» может быть более предпочтительным, так как проходит без кризиса теплообмена, чем варианты с несимметричным падением множества органов регулирования СУЗ. Это объясняется быстрым охлаждением топлива и теплоносителя и тем самым быстрым ростом реактивности в холодном секторе активной зоны при быстром падении органов регулирования СУЗ за пределами холодного сектора;

варианты с зависанием всех органов регулирования в крайнем верхнем положении «без аварийной защиты» характеризуются потерей теплоносителя первого контура за счет открытия предохранительного клапана компенсатора давления. В таких режимах реактивность контролируется, и мощность в итоге ограничивается за счет действия внутренне присущих свойств — обратных связей по температуре топлива и воды. Поэтому в таких вариантах реактивность колеблется около нулевого значения. Снижение мощности происходит относительно медленно, и приведение реактора в подкритическое состояние (не менее 1%) обеспечивается насосами аварийного ввода бора в течение 15—30 мин с учетом режима расхолаживания. Однако даже для таких режимов почти всегда критерии, в том числе и давление первого и второго контуров теплоносителя выполняются. Исключениями являются маловероятные запроектные сценарии в вариантах 8, 9. В остальных случаях, когда мощностной эффект компенсируется полностью или почти полностью, т.е. реализуется ввод даже относительно небольшой эффективности аварийной защиты, режимы протекают значительно мягче, без открытия предохранительного клапана компенсатора давления и с более быстрым достижением надежного уровня подкритичности не менее 1%. Таким образом, критерий успеха аварийной защиты определяется компенсацией большей части мощностного эффекта, что согласуется с зарубежными подходами. Так, в AP-600, -1000 (США) при аварии с разрывом па-

ропровода со срабатыванием аварийной защиты активная зона достигает подкритичности через 15—20 мин за счет подачи бора;

на основе множества расчетов обнаружена следующая существенная особенность. Реактивность (или подкритичность) реактора не является адекватным критерияльным показателем, поскольку ее трудно рассчитать и измерить, особенно в быстром переходном режиме. Так, реактивность, вычисленная по изменению мощности (как это делается в реактиметре на основе показаний системы АКНП реактора), отрицательна после введения органов регулирования СУЗ, тогда как в холодном секторе мощность возрастает и возможно даже нарушение критериев по топливу. И наоборот, реактивность может быть положительна в состояниях на низкой мощности, с большими запасами по выполнению критериев. Поэтому в нормах [1], в формулировках требований к системам останова реактора целесообразно использовать критерии целостности физических барьеров безопасности вместо подкритичности, как это принято в Требованиях европейских эксплуатирующих организаций.

Заключение. Предложенный подход к определению минимально достаточной эффективности аварийной защиты ВВЭР включает в себя новый вероятностный метод определения эффективности аварийной защиты при отказах различного числа органов регулирования, использование вероятностных аргументов, снижение избыточного консерватизма при анализе безопасности. Для этого используются реалистические объединенные (сопряженные) коды с трехмерной нейтронной кинетикой и теплогидродинамикой. Применяется также современная идеология безопасности.

С использованием предложенного подхода получены следующие новые результаты:

на примере ВВЭР-1000 с рассмотрением большого числа вариантов показана достаточность эффективности аварийной защиты с 49 органами регулирования СУЗ (с учетом отказов различного числа органов регулирования) для приведения реактора в безопасное состояние в определяющей проектной аварии с разрывом паропровода, для которой действие аварийной защиты наиболее востребовано;

получено объяснение, почему на зарубежных PWR применяется меньшее число органов регулирования, чем в ВВЭР;

прояснены смысл и вероятностная основа постулирования количественного принципа аварийной защиты без учета одного органа регулирования с максимальной эффективностью в качестве одного из ключевых принципов для обоснования безопасности в детерминистическом приближении;

предложено откорректировать требования ПБЯ [1] к системам останова реактора, в которых вместо подкритичности целесообразно применять критерии целостности физических барьеров безопасности, как это принято в Требованиях европейских эксплуатирующих организаций.

Предлагаемый подход позволит успешно решить следующие задачи, которые повысят конкурентоспособность ВВЭР:

использование стержней с уменьшенной поглощающей способностью («серые» стержни) в активной зоне с большим числом приводов;

дополнительные запасы безопасности и возможность повышения номинальной мощности на 10—15%;

обоснование допустимости того, что поглотитель не доходит до нижнего торца топлива при полностью погруженных органах регулирования СУЗ в случае конструктивного увеличения длины топливной части;

обоснование разделения органов регулирования СУЗ на две независимые подсистемы, каждая из которых способна обеспечить приведение реактора в безопасное состояние.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Правила** ядерной безопасности реакторных установок атомных станций ПБЯ РУ АС-89, ПНАЭ Г-1-024-90. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. **Программа** БИПР-7А. Паспорт аттестации ГАН РФ № 84 от 18.12.1997 г.
3. **Программа** САПФИР_95.1. Паспорт аттестации ГАН РФ № 205 от 15.12.2005 г.
4. **Программа** САПФИР_95&RC_ВВЭР. Паспорт аттестации ГАН РФ № 206 от 15.12.2005 г.
5. **Программа** ДИНАМИКА-97. Паспорт аттестации ГАН РФ № 110 от 02.09.1999 г.
6. **Пономаренко Г.Л., Быков М.А., Подшибякин А.К.** Моделирование энергораспределения в активной зоне ВВЭР для анализа безопасности. — Атомная энергия, 2003, т. 94, вып. 5, с. 339—344.
7. **Пономаренко Г.Л., Быков М.А., Подшибякин А.К. и др.** Возможность экспериментального исследования перемешивания теплоносителя на действующих энергоблоках методом борного регулирования. Тезисы докл. научно-техн. сем. «Оценка экспериментальных данных и верификация расчетных кодов». Сосновый Бор, 4—8 октября 2004, с. 82—86.

8. Пономаренко Г.Л., Быков М.А., Алехин Г.В. Предварительное обоснование исследования перемешивания теплоносителя методом борного регулирования. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС, 2004, вып. 7, с. 61—74.
9. Kliem S., Mittag S., Weiß F.-P., Langenbuch S. Uncertainty and sensitivity analysis for the modeling of a start-up experiment in a VVER-1000 reactor. Тезисы докл. 4-й Межд. научно-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, 23—26 мая 2005, с. 46.
10. Рыжов С.Б., Пономаренко Г.Л., Васильченко И.Н. и др. Возможность повышения эффективности использования топлива в активной зоне ВВЭР-1000. Тезисы докл. 3-й научно-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, 26—30 мая 2003, с. 46.

Поступила в Редакцию 3.03.06

УДК 621.039.58

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ПРЯМОТОЧНОГО КОРПУСНОГО РЕАКТОРА С ПЕРЕГРЕВОМ ПАРА

*Филиппов Г.А., Гришанин Е.И., Фальковский Л.Н., Фонарев Б.И. (ВНИИАМ),
Алексеев П.Н., Кухаркин Н.Е., Фомиченко П.А., Цибульский В.Ф.,
Чибиняев А.В. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

Перспективным направлением повышения технико-экономических характеристик АЭС в настоящее время рассматривается применение реакторных установок со сверхкритическими параметрами легководного теплоносителя [1—4]. В них предполагается использовать стержневые твэлы с оболочкой из жаропрочной стали с высоким содержанием никеля или сплавов на основе никеля. Рассматриваются варианты тепловых и быстрых реакторов с температурой теплоносителя на выходе 500—550 °С. Максимальная температура оболочек твэлов оценивается на уровне 620—650 °С.

Основная мотивация для разработки такой реакторной установки усматривается в повышении к.п.д. с 33—35 до 41—45%. Естественно, что при использовании одноконтурной схемы возможно снижение капитальных затрат за счет отсутствия парогенераторов, циркуляционных насосов и уменьшения размеров защитной оболочки. Высокие параметры пара также позволят существенно уменьшить габариты турбоустановки, машинного зала и др. Однако в этих работах не учитываются перенос продуктов коррозии вследствие отсутствия отмывки теплоносителя от продуктов коррозии и их 100%-ное поступление в паротурбинную установку. При таком подходе стоимость обслуживания и ремонта технологического оборудования может превысить экономию на капитальных затратах.

Развитие реакторов с легководным теплоносителем ВВЭР (PWR), кипящих ВК (BWR) и РБМК не случайно остановилось на низких параметрах пара. В 1950—60 годах активно дискутировался вопрос, что выгоднее — насыщенный пар при использовании твэлов с оболочками из сплава циркония и хорошем балансе нейтронов или пар высоких параметров и ухудшение характеристик топливного цикла из-за применения твэлов со стальными оболочками. Для решения этого спора в США были сооружены экспериментальные корпусные реакторы Bonus и Pathfinder с перегревом пара в активной зоне. В нашей стране на Белоярской АЭС были построены два блока с уран-графитовыми канальными реакторами с перегревом пара до 510 °С [5].