

СТАТЬИ

УДК 621.039.5

ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ХРАНЕНИИ ТОПЛИВА В БАССЕЙНАХ ВЫДЕРЖКИ НА АЭС С ВВЭР-1000 — ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ

Осадчий А.И. (ИЯР НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

Ядерная безопасность АЭС, как правило, связывается с ядерной энергетической установкой. При этом обеспечение безопасности реакторной установки имеет принципиальные отличия по сравнению с хранением и транспортировкой топлива. Это отличие обусловлено назначением и условиями функционирования объектов.

Ядерный реактор — это энергетическая установка, функционирующая в критическом состоянии. Работу реактора обеспечивает система управления и защиты. Хранение и транспортировка топлива в условиях нормальной эксплуатации в отличие от реактора осуществляются в подкритическом состоянии. Ядерная безопасность при обращении топлива достигается конструкцией самих средств транспортировки и хранения топлива, которые должны обеспечить подкритичность в условиях нормальной эксплуатации и при авариях.

Суть подходов к обоснованию ядерной безопасности средств транспортировки и хранения топлива при нормальной эксплуатации, нарушении нормальной эксплуатации, проектных и запроектных авариях на АЭС заключается в поиске и анализе по результатам расчетов состояний с максимальными коэффициентами $K_{эф}$ в соответствии с перечнем проектных и запроектных аварий. Его не рассчитывают для конкретных сценариев развития аварий и промежуточных состояний как в нашей стране, так и в мировой практике в силу огромного количества возможных вариантов развития аварий.

Возникновение ядерно опасных ситуаций при обращении топлива на АЭС с ВВЭР-1000 возможно вследствие использования в качестве топлива обогащенного урана, охлаждающей среды в бассейнах выдержки — воды. Необходимость ядерной безопасности при хранении и

транспортировке топлива на АЭС обусловлена тем, что достижение критичности способно самым радикальным образом усугубить последствия аварии при обращении со свежим и отработавшим топливом.

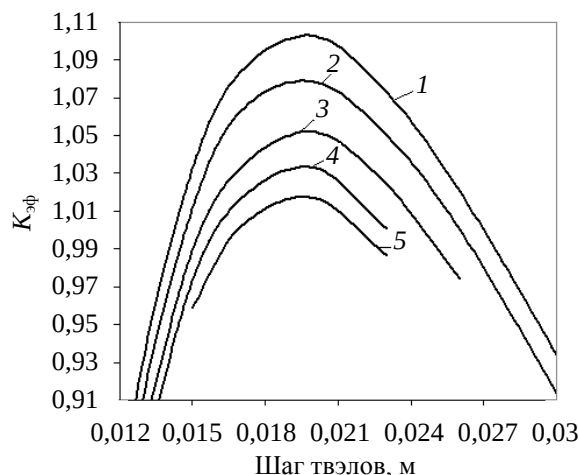
Современный этап развития ядерной энергетики с точки зрения обращения топлива на АЭС характеризуется как ужесточением требований безопасности, так и факторами, повышающими опасность при транспортировке и хранении топлива на АЭС. В соответствии с современными требованиями в проектах АЭС устанавливается приемочный критерий выполнения ядерной безопасности для условий нормальной эксплуатации и при проектных авариях. Для этих условий должна обеспечиваться подкритичность ($K_{эф} < 0,95$). Для тяжелых запроектных аварий с разрушением топлива, характеризующихся вероятностью менее 10^{-7} лет, требуются анализ и разработка организационно-технических мероприятий в целях минимизации последствий аварий. Факторами, повышающими опасность аварий, являются повышение обогащения топлива, которое достигло в настоящее время 5%, и времени хранения отработавшего топлива, что требует увеличения вместимости бассейнов выдержки.

Общим принципом в устройствах хранения и транспортировки топлива, обеспечивающим подкритичность, является максимально возможное поглощение нейтронов. В физически большом массиве плотно размещенных ТВС ВВЭР-1200 обогащением топлива 5%, заполненном водой без растворенного в ней поглотителя, коэффициент размножения $K_{эф} \sim 1,5$. Это требует разработки конструкций для безопасной транспортировки и хранения топлива. Данная задача допускает различные решения, общим для которых является размещение ТВС с су-

щественно большим шагом, чем в реакторе. При этом возможный шаг размещения ТВС зависит от конструкции средства обращения топлива. В настоящее время на АЭС с ВВЭР-1000 используются стеллажи бассейнов выдержки двух типов, в которых ТВС размещены в треугольной решетке с шагом 40 см без использования поглотителей (неуплотненные стеллажи) и с шагом 30 см в шестигранных трубах из бористой стали (уплотненные стеллажи).

Анализ требований нормативной и проектной документации АЭС с ВВЭР показывает, что для обеспечения ядерной безопасности необходимо создание конструкций средств обращения с подкритичностью $K_{эф} < 0,95$ при возможно более плотном размещении ТВС, полной загрузке средств топливом максимального обогащения. Особенности размещения ТВС в средствах хранения и транспортировки вместе с возможностью изменения плотности воды, содержания борной кислоты и геометрии в аварийных ситуациях обуславливают физические особенности задач данного типа и отличают их от традиционных задач расчета активных зон водородных реакторов. Расчет критичности в средствах транспортировки и хранения требует, с одной стороны, корректного учета анизотропии рассеяния, что присуще расчету защиты от нейтронного излучения, с другой, подробной пространственной и энергетической сетки, что присуще расчету ячеек прецизионными методами.

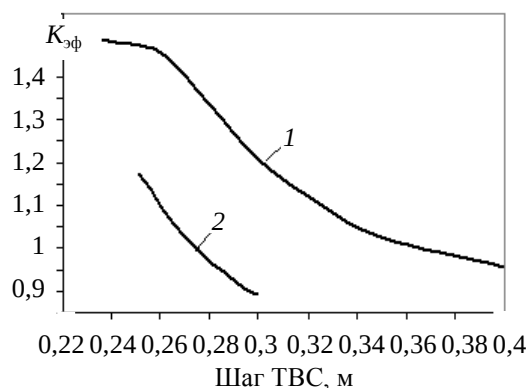
В настоящее время на АЭС с ВВЭР-1000 используются ТВС с максимальным обогащением топлива 5%. При этом обогащении критичность может быть достигнута как при плотном размещении двух ($K_{эф} \cong 1,05$) и более ТВС, так и при разрушении одной ТВС в водной среде. Представленная на рис. 1 зависимость показывает, что $K_{эф}$ в авариях с нарушением дистанционирования твэлов одной ТВС в водной среде может изменяться в широком диапазоне — от 0,6 при тесной упаковке твэлов до 1,1 при шаге размещения около 0,02 м. При этом $K_{эф} > 1$ в широком диапазоне шага расположения твэлов при разной высоте топливного столба. Это выдвигает соответствующие требования к конструкциям средств обращения с топливом и организационно-техническим мероприятиям в целях недопущения возникновения самоподдержи-



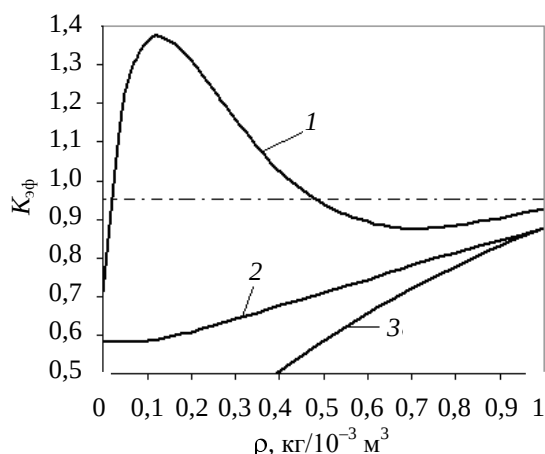
Р и с. 1. Зависимость $K_{эф}$ от шага размещения твэлов в одной ТВС в водной среде при высоте столба топлива 3,5 (1), 1 (2), 0,7 (3), 0,6 (4), 0,5 м (5)

вающейся цепной реакции в авариях при транспортировке и хранении топлива. Результаты расчета, приведенные в настоящей работе, получены по программе САПФИР-2006. Первоначально подкритичность в бассейнах выдержки АЭС с ВВЭР-1000 обеспечивалась за счет выбора шага размещения ТВС в водной среде без использования твердых поглотителей, при котором выполнялось требование $K_{эф} < 0,95$ при обогащении топлива 4,4% (рис. 2). Однако данный способ размещения ТВС характеризуется низкой вместимостью бассейнов, позволяющей выдержать ТВС в течение 3 лет.

Этот способ размещения характеризуется также возможностью роста $K_{эф}$ при снижении плотности теплоносителя в аварийных ситуациях с кипением воды. Зависимость $K_{эф}$ от плотности воды для компактных (шаг размещения ТВС 30 см) и неуплотненных (шаг размещения 40 см) стеллажей приведена на рис. 3.



Р и с. 2. Зависимость $K_{эф}$ от шага размещения ТВС в водной среде без поглотителей (1) и трубе из бористой стали (2)



Р и с. 3. Зависимость $K_{эф}$ от плотности воды в стеллажах хранения топлива различной конструкции: 1 — ТВС с шагом размещения 40 см без поглотителей; 2 — ТВС в трубах из бористой стали, плотность воды меняется равномерно; 3 — ТВС в трубах из бористой стали, плотность воды меняется внутри трубы

Зависимость $K_{эф}$ от плотности воды (кривая 1 на рис. 3) получена в предположении равенства плотности воды в ТВС, размещенных с шагом 40 см, и пространстве между ними. Нестационарность процесса кипения и особенность распределения пара в ТВС и зазорах между ними не позволяют рассматривать эту зависимость как консервативную. Это обусловлено тем, что снижение плотности воды в решетках ТВС приводит к уменьшению $K_{эф}$, плотности воды в зазоре между ТВС, т.е. воды, за счет которой обеспечивается подкритичность, — к росту. Распределение плотности пароводяной смеси по объему бассейна в области топливных столбов ТВС в авариях с кипением теплоносителя в бассейнах является необходимым условием для определения $K_{эф}$.

Временные характеристики распределения пара имеют порядок секунд, время жизни нейтронов в бассейне менее 10^{-3} с, т.е. с точки зрения критичности кипение теплоносителя характеризуется бесконечно большим количеством состояний. Для расчетного обоснования критичности необходимо определение возможного распределения пароводяной смеси по объему бассейнов выдержки с учетом временных особенностей процесса. Плотность теплоносителя при кипении, усредненная за большие промежутки времени, не характеризует состояние бассейна выдержки с точки зрения возможности достижения критичности.

Важной характеристикой средств обращения топлива является также обеспечение подкритичности в тяжелых запроектных авариях с

внешними воздействиями, приводящими к разрушению ТВС. В неуплотненных стеллажах бассейна выдержки нет элементов, препятствующих образованию критической массы при разрушении ТВС. Возможность достижения критичности при разрушении показана на рис. 1. В этом случае подкритичность может быть обеспечена только при наличии борной кислоты в теплоносителе.

Задача увеличения вместимости бассейнов с обеспечением времени выдержки отработавших ТВС 10 лет при обогащении топлива 5% и ядерной безопасности в авариях со снижением и перераспределением плотности воды и внешними воздействиями принципиально не может быть решена в рамках рассмотренной конструкции.

Для выполнения требований, предъявляемых к современным энергоблокам АЭС, потребовалась разработка конструкции стеллажей бассейнов выдержки, обеспечивающих:

увеличение вместимости в 2 раза по сравнению с неуплотненным (шаг размещения 40 см) бассейном;

размещение ТВС обогащением топлива до 5%;

ядерную безопасность в условиях нормальной эксплуатации и при проектных авариях, включая аварии со снижением и перераспределением плотности воды;

отрицательные реактивностные обратные связи;

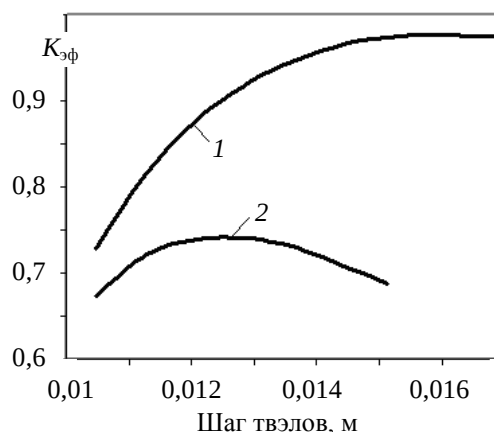
локализацию разрушенного топлива в пределах шестигранных труб, препятствующую образованию локальной критической массы в запроектных авариях.

Исследования и расчетный анализ позволили определить физические основы и конструктивные решения, которые обеспечили разработку и внедрение на АЭС с ВВЭР-1000 стеллажей бассейнов выдержки, удовлетворяющих перечисленным требованиям.

Реализованная в настоящее время на АЭС с ВВЭР-1000 конструкция стеллажей бассейнов выдержки представляет собой дистанционированные между собой и размещенные в треугольной решетке с шагом 30 см шестигранные трубы из бористой стали ЧС-82 с содержанием бора 1,3—1,8% по массе. Данная конструкция представляет собой комбинированную ловушку нейтронов, обеспечивающую эффективное поглощение тепловых нейтронов по периферии ТВС и замедление быстрых в слое воды между шестигранными трубами с последующим по-

глощением. Это техническое решение позволяет увеличить вместимость стеллажей бассейнов выдержки примерно в 2 раза. В стеллажах бассейнов выдержки данной конструкции $K_{эф}$ имеет максимальное значение в условиях нормальной эксплуатации. В авариях со снижением плотности (кипение) теплоносителя $K_{эф}$ снижается. Представленные на рис. 3 зависимости показывают, что при снижении плотности воды внутри ТВС, находящихся в шестигранных трубах (подъемный участок пароводяной смеси), и неизменной плотности воды между шестигранными трубами (опускной участок) $K_{эф}$ уменьшается быстрее, чем при равномерном снижении плотности по объему бассейна выдержки. В тяжелых запроектных и постулируемых авариях с внешним воздействием, таким, как падение в бассейн плит перекрытия, средств транспортировки топлива, элементов строительной конструкции, мостового крана и др., приводящим к разрушению ТВС, шестигранные трубы являются локализирующим для делящихся веществ элементом конструкции, препятствующим образованию критической массы.

Многообразие возможных сценариев аварий с разрушением ТВС и элементов конструкции стеллажей бассейнов выдержки и конечных состояний при разрушении требует консервативных моделей при определении $K_{эф}$ в авариях и обосновании ядерной безопасности. Консервативность расчетной модели должна включать неопределенность как состояния топлива (фрагментации при разрушении), так и локализации разрушений. Для консервативного расчетного определения целесообразно принять бесконечную решетку ТВС, разрушенных внутри шестигранных труб. Зависимость, представленная на рис. 4, показывает, что как при наличии борной кислоты в теплоносителе, так и ее отсутствии



Р и с. 4. Зависимость $K_{эф}$ бесконечной решетки разрушенных ТВС ВВЭР-1000 внутри шестигранных труб стеллажа бассейна выдержки от шага размещения твэлов: 1 — без борной кислоты в теплоносителе; 2 — с борной кислотой 16 г/кг H_2O

обеспечивается подкритичность в стеллажах бассейна выдержки данной конструкции.

Повышение технико-экономических характеристик АЭС в целом и эффективности использования топлива делает необходимым совершенствование топливных циклов и ТВС и выдвигает требования к средствам транспортировки и хранения топлива. Эти требования заключаются в обеспечении ядерной безопасности при использовании ТВС с увеличенной ураноемкостью и повышенным сверх 5% обогащением.

Разработанные к настоящему времени шестигранные трубы из бористой стали (ЧС-82М) с содержанием бора 2—2,5% по массе позволяют сделать следующий шаг в реализации конструкций средств обращения топлива для энергоблоков с ВВЭР-1000 (ВВЭР-1200), обеспечивая в перспективе возможность внедрения ТВС повышенной ураноемкости и обогащением топлива свыше 5%.

Поступила в Редакцию 23.07.10

УДК 621.039.52

УМЕНЬШЕНИЕ ДИСПЕРСИИ В РАСЧЕТАХ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ВВЭР ПОСРЕДСТВОМ ГИБРИДНОГО МЕТОДА CADIS

Руссков А.А., Волощенко А.М. (ИПМ РАН, г. Москва),
Гуревич М.И. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

Знание флюенса быстрых нейтронов и повреждающей дозы корпуса ВВЭР с достаточной точностью является необходимым условием

обоснования безопасной эксплуатации. Трехмерный S_N -расчет с помощью программ TORT [1] или КАТРИН [2] и одной из проблемно-ориен-