

3. Солонин В.И., Перевезенцев В.В. Гидродинамически возбуждаемые вибрации пучка твэлов при различных характеристиках потока теплоносителя на входе в ТВС ВВЭР-440. — Изв. вузов. Машиностроение, 2006, № 3, с. 23—29.
4. Макаров В.В., Афанасьев А.В., Матвиенко И.В. Модальный анализ макетов ТВС реакторов ВВЭР при силовом и кинематическом возбуждении вибрации. — В сб.: Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР. Подольск, 2007, т. 2, с. 137—148.
5. Перевезенцев В.В., Солонин В.И., Сорокин Ф.Д. Нестационарные гидродинамические нагрузки и вибрации пучка твэлов в ТВС ВВЭР-440. — Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2008, № 4, с. 23—29.
6. Перевезенцев В.В. Вибрации и повреждения твэлов в турбулентном потоке теплоносителя в тепловыделяющих сборках ВВЭР. — Безопасность в техносфере, 2011, № 6, с. 11—17.

Поступила в Редакцию 20.03.12

УДК 621.039.4+621.039.5+621.039.51

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЫСТРОГО РЕАКТОРА ПСКД-600, ОХЛАЖДАЕМОГО ВОДОЙ СО СВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Фролова М.В., Алексеев П.Н., Теплов П.С., Чибиняев А.В. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

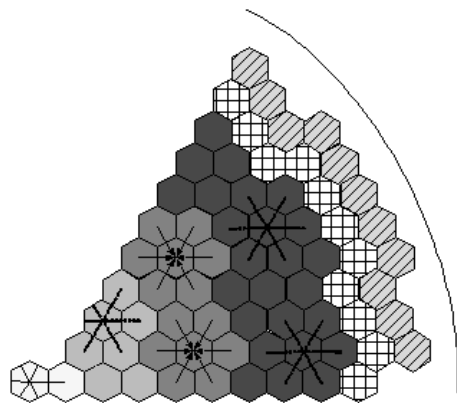
Реакторы со сверхкритическим давлением теплоносителя — новый класс энергетических реакторов, использующих для охлаждения воду с параметрами выше критических (374 °С, 22,1 МПа). В зависимости от технических решений они могут быть ближе к быстрым пароохлаждаемым, тепловым водо-водяным или быстро-тепловым легководным реакторам. Рабочее давление теплоносителя в них значительно выше (25 МПа), чем в ВВЭР, они работают с более низким расходом теплоносителя при более высокой температуре. Сверхкритические параметры теплоносителя позволяют добиться высокой термодинамической эффективности (к.п.д. до 45%). Такие реакторные системы могут иметь как тепловой, так и быстрый спектр нейтронов в зависимости от конструкции активной зоны. Для зон с тепловым спектром нейтронов в качестве замедлителя можно использовать легкую или тяжелую воду. Твэлы могут быть как стержневые, так и шаровые, в том числе микротвэлы. Высокая температура оболочек твэлов требует применения жаропрочных сплавов, например, на основе никеля или ванадия.

В настоящей работе исследовали нейтронно-физические характеристики быстрого легководного реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя ПСКД-600 [1]. Высокий положительный максимальный и полный эффект реактивности является одной из проблем быстрых реакторов. Исследования показали, что обезвоживание экранов и периферийной части активной зоны отрицательно влияет на полный

пустотный эффект реактивности. Вытеснение теплоносителя из центральной части активной зоны и реализация максимального положительного пустотного эффекта реактивности возможны, например, при разгерметизации твэлов за счет выхода газообразных продуктов деления. В настоящей статье представлен улучшенный вариант компоновки активной зоны, для которого достигается отрицательный пустотный эффект реактивности при высоком коэффициенте накопления вторичного топлива. Расчетные исследования проводили с помощью программного комплекса CONSUL [2, 3].

При разработке была поставлена задача использовать имеющиеся конструкторские решения — корпус, как у ВВЭР-1000, размер ТВС в целях выравнивания поля энерговыделения был снижен, как у ВВЭР-440, однако в связи с высоким давлением теплоносителя толщина оболочек твэлов увеличена.

Более высокие параметры пара на входе в активную зону и парогенератор позволяют достичь высокой термодинамической эффективности, однако из-за этого невозможно использовать сплавы циркония для оболочек твэлов. Поэтому в качестве материала оболочек твэлов принят композит SiC/SiC [4, 5]. Исследования показали его уникальные возможности удерживать продукты деления при температуре до 1600 °С. Кроме того, значительно снижается пустотный эффект реактивности. Благодаря более низкому сечению поглощения SiC удается снизить содержание плутония в активной зоне.

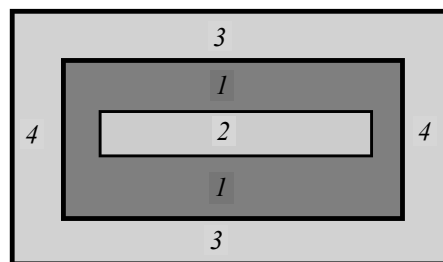


Р и с. 1. Картограмма размещения ТВС разного типа в активной зоне реакторной установки ПСКД-600: , , , — ТВС типа 1—5 и боковой зоны воспроизводства соответственно; , , — кластер регулирующих, компенсирующих стержней и аварийной защиты соответственно

Поскольку ПСКД-600 разрабатывался для эффективной по сравнению с ВВЭР-1000 работы в замкнутом топливном цикле, в нем используется смешанное оксидное топливо с плутонием, регенерированным из отработавшего топлива ВВЭР. Неравномерности энерговыделения в активной зоне будут снижены за счет использования трех групп ТВС с разным содержанием PuO_2 (рис. 1). Содержание PuO_2 было выбрано так, чтобы кампания реактора составляла 330 эф. сут.

Исследования пустотного эффекта реактивности показали необходимость изменения геометрии активной зоны. Толщина торцевых экранов снижена до 0,15 м по сравнению с исходным вариантом (0,25 м), что позволяет увеличить утечку нейтронов при потере теплоносителя и уменьшить пустотный эффект реактивности. Для самообеспечения топливом в замкнутом ядерном топливном цикле и уменьшения флюенса на конструкционные материалы экраны сохранены. В торцевых и боковых зонах воспроизводства находится обедненный уран с содержанием ^{235}U 0,2% по массе.

Для снижения максимального пустотного эффекта реактивности дополнительно введена ториевая центральная зона воспроизводства толщиной 0,3 м, что одновременно позволяет увеличить коэффициент накопления топлива (отношение массы делящихся изотопов в выгружаемом топливе к массе делящихся изотопов в загружаемом топливе) (рис. 2). Наличие ThO_2



Р и с. 2. Радиальный разрез активной зоны ПСКД-600 с ториевой центральной зоной воспроизводства: 1 — активная зона; 2, 3, 4 — центральная, торцевая и боковая зона воспроизводства соответственно

в центральной зоне воспроизводства необходимо для достижения приемлемого максимального пустотного эффекта реактивности.

Система управления и защиты ПСКД-600 состоит из набора кластеров. Регулирующие и компенсирующие стержни содержат природный бор, в стержнях аварийной защиты 80% ^{10}B . Кластеры компенсирующих стержней выводятся из активной зоны в течение кампании реактора.

Основные нейтронно-физические характеристики ПСКД-600 следующие:

Кампания, сут . . .	330
Загрузка, т тяж. мет.:	
активная зона . . .	32,3
центральная зона . . .	5,9
торцевые экраны . . .	7,6
боковой экран . . .	18,6
Среднее выгорание выгружаемого топлива в стационарном цикле, МВт·сут/кг тяж. мет.:	
активная зона . . .	54,2
центральная зона . . .	18,9
торцевые экраны . . .	3,6
боковой экран . . .	6,8
Максимальное выгорание выгружаемого топлива в стационарном цикле, МВт·сут/кг тяж. мет. . . .	74,7
Годовой расход топлива, т тяж. мет./год:	
активная зона . . .	8,08
центральная зона . . .	1,47
торцевые экраны . . .	1,91
боковой экран . . .	3,1
Запас реактивности на выгорание, % . . .	1,5
Коэффициент накопления топлива:	
активная зона . . .	0,88
центральная зона . . .	0,05
торцевые экраны . . .	0,04
боковой экран . . .	0,05
Наработка, кг/год:	
активная зона (Pu) . . .	—84
центральная зона (^{233}U) . . .	48
торцевые экраны (Pu) . . .	42
боковой экран (Pu) . . .	48

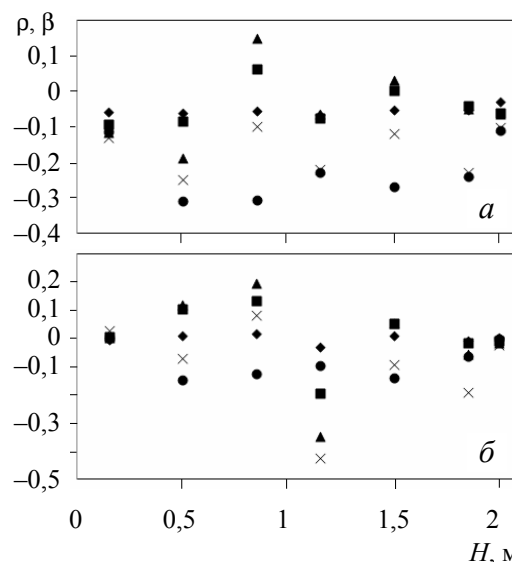
В связи с использованием в качестве материала оболочек твэлов композита SiC/SiC изменится энерговыделение, вследствие чего и выгорание по сравнению с исходным [6].

Благодаря быстрому спектру нейтронов коэффициент накопления топлива в активной зоне близок к 1, в сочетании с экранами и центральной зоной воспроизводства он превышает 1. Расчеты свидетельствуют о возможности самообеспечения топливом в замкнутом ядерном топливном цикле. Для обеспечения безопасности можно организовать пристанционный топливный цикл, для которого не потребуется длительная выдержка топлива.

Благодаря использованию разного содержания PuO_2 в зонах (14,5, 14,5, 17,5, 17,5 и 20% для ТВС типа 1—5 соответственно) удастся достичь большой центральной области с равномерным распределением энерговыделения, что положительно повлияет на теплосъем. Коэффициент неравномерности энерговыделения не превышает 1,45 и незначительно изменяется в течение кампании. Основное влияние на изменение энерговыделения оказывает вывод регулирующих стержней из активной зоны.

Для компоновки с ториевой центральной зоной воспроизводства (оболочки твэлов из композита SiC/SiC) удастся достичь небольшого по модулю отрицательного пустотного эффекта реактивности при полной потере теплоносителя, благодаря чему обеспечиваются требования безопасности при обезвоживании и заливке водой активной зоны. Исследования показали, что как на начало, так и на конец кампании при отклонении плотности теплоносителя от рабочей реактивность снижается. Поскольку максимальный коэффициент реактивности достигается при рабочей плотности теплоносителя, при любых отклонениях от номинального режима реактор будет заглушаться, чего не удавалось добиться для предыдущих вариантов компоновки активной зоны [6].

Поскольку при работе ПСКД-600 возможно обезвоживание отдельных зон реактора, рассматривалось независимое обезвоживание ТВС каждого типа (см. рис. 1). Расчетное распределение показывает снижение максимального и полного пустотного эффекта реактивности при наличии центральной зоны воспроизводства по сравнению с начальным вариантом (как на начало, так и на конец кампании реактора). Ни в



Р и с. 3. Пустотный эффект реактивности ПСКД-600 на начало (а) и конец кампании (б): $\blacklozenge$, $\blacktriangle$, $\blacksquare$, $\times$, $\bullet$ — ТВС типа 1—5 соответственно

одной зоне пустотный эффект реактивности не превышает 0,9 (такой пустотный эффект может быть скомпенсирован за счет эффекта Доплера), что подтверждает возможность обеспечения требований безопасности. Некоторая асимметрия распределения объясняется смещением нейтронного поля за счет погруженных органов системы управления и защиты, расположенных в зонах 1—3 (рис. 3).

При перегрузке реактора происходит залив отдельных каналов с возможным всплеском реактивности. Расчеты показали, что извлечение любого числа ТВС как в начале, так и в конце кампании снижает реактивность.

Таким образом, изменения, внесенные в активную зону и экраны, — снижение толщины торцевых зон воспроизводства, введение не поглощающего нейтроны материала оболочки твэлов, использование тория в центральной зоне воспроизводства позволили добиться приемлемого максимального и полного пустотного эффекта реактивности. Расчетные исследования показали обеспечение требований безопасности ПСКД-600 и возможность его работы в коротком уран-плутоний-ториевом замкнутом топливном цикле в режиме самообеспечения топливом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субботин С.А., Чибиняев А.В., Седов А.А. и др. Перспективы и проблемы использования в реакторах легководного теплоносителя сверхкритического давления

- для повышения эффективности ядерного топливного цикла. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2010, вып. 1, с. 3—12.
2. Цибульский В.Ф., Чибиняев А.В. CONSUL — программа уточненного комплексного расчета ядерного реактора. — Там же, 1995, вып. 3, с. 29—32.
 3. Теплов П.С., Чибиняев А.В. Развитие программного комплекса CONSUL на основе спектральной программы WIMS-D5: Препринт ИАЭ-6383/5, 2005.
 4. Yueh K., Carpenter D., Feinroth H. Clad in clay. — Nucl. Engng Intern., 2010, v. 55, № 666, p. 75—87.

5. Carpenter D. Assessment of Innovative Fuel Designs for High Performance Light Water Reactors. Master Thesis at Massachusetts Institute of Technology, June 2006.
6. Чибиняев А.В., Алексеев П.Н., Теплов П.С., Фролова М.В. Нейтронно-физические характеристики двух-контурного энергетического реактора с закритическими параметрами пара. — В сб.: 7-я Межд. научно-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, ОКБ «Гидропресс», 17—20 мая 2011, с. 36—37.

Поступила в Редакцию 7.02.12

УДК 669.017:539.4

ДИАГРАММА ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ПРИ УСТАЛОСТИ С ВЫСОКОЙ АСИММЕТРИЕЙ

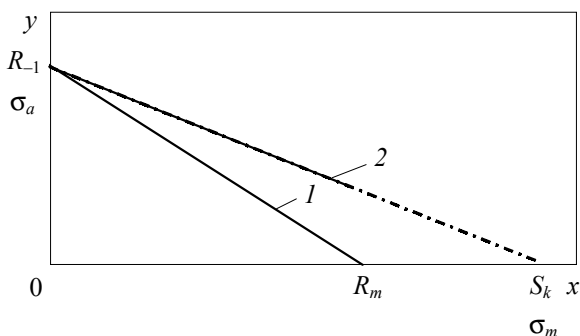
Европин С.В., Филатов В.М. (ОАО «НИКИЭТ», г. Москва)

Влияние асимметрии циклического нагружения при обосновании длительной работоспособности конструкций, в том числе и элементов ядерных установок регламентируется нормативной документацией по расчетам на прочность во всех странах. Несмотря на обилие моделей диаграмм предельного состояния усталостного разрушения материалов с разным средним напряжением в цикле (диаграммы Смита, Герберга, Зодерберга и др. [1]), практическое применение в нормативах получила диаграмма Гудмана (кривая 1 на рис. 1). Для инженерных расчетов с коэффициентом запаса по амплитуде напряжения, равным 2, диаграмма Гудмана [2] в середине XX в. подтвердила достаточность своего применения для прогноза работоспособности конструкций промышленных объектов. По мере старения конструкций была выявлена тенденция изменения свойств конструкционных материалов и прежде всего снижение пластичности. Но именно пластичность материалов не учитывается линейной диаграммой Гудмана, и может воз-

никать иллюзия, что сопротивление высокоцикловой усталости материалов не зависит от длительности эксплуатации.

Для облучаемых элементов ядерных реакторов влияние асимметрии высокоциклового нагружения наиболее актуально, поскольку в процессе длительного нейтронного облучения прочность конструкционных материалов, как правило, повышается, пластичность всегда уменьшается вплоть до нулевых значений. Поэтому именно в ядерной энергетике была предложена модель влияния асимметрии циклического нагружения с учетом пластических характеристик материалов (см. рис. 1, кривая 2), которая была использована при подготовке норм расчета на прочность [3] и последующих документов по обоснованию продления сроков службы оборудования и трубопроводов энергоблоков АЭС.

Вместе с тем следует отметить, что предложенная в работах [4, 5] линейная диаграмма предельного состояния с истинным сопротивлением отрыву S_k металла в качестве предельного среднего напряжения относилась к углеродистой и легированной стали. При этом в области среднего напряжения на уровне временного сопротивления R_m^T и выше, а также для стали аустенитного класса экспериментальных данных не было. Поэтому были выполнены специальные исследования усталости образцов из стали марки 08X18H10T в данной области среднего напряжения, методика и результаты которых приводятся в настоящей работе.



Р и с. 1. Диаграмма предельного состояния: 1, 2 — диаграмма Гудмана и модифицированная соответственно