

результатов исследования. Применение результатов анализа фактических данных по экономике жизненного цикла транспортных ЯЭУ в ядерной энергетике оправдано идентичностью технических принципов, заложенных в структуре транспортных и стационарных водо-водяных реакторных установок. Несмотря на то, что имеют место отличия, связанные с масштабом и конструктивным исполнением этих установок, результаты исследования серийного производства транспортных ЯЭУ справедливы и для серийного создания АЭС большой, средней и малой мощности. В частности, и в стационарной энергетике возможно заимствование наиболее эффективных методов из практики транспортного атомного машиностроения, судостроения и ремонта, организационно-технических и технологических подходов. В максимальной мере это касается проектов атомных станций малой и средней мощности как в наземном исполнении, так и плавучих энергоблоков, разрабатываемых с использованием основных решений транспортных ЯЭУ. К числу этих проектов относятся атомные станции с КЛТ-40, АБВ-6М, ВБЭР-300 разработки ОКБМ, создание которых основано на использовании технологий атомного судостроения с эволюционным сокращением затрат в условиях серийного производства, а также проектной и технологической унификации.

Для малых серий ЯЭУ получение экономического эффекта будет возможно за счет:

использования в новых проектах унифицированных решений, унифицированного оборудования, особенно для двухреакторных установок;

максимального использования преимуществ эволюционного совершенствования и развития проектов с допустимой ориентацией на имеющуюся технологию, производственную базу машиностроительных и крупных судостроительных заводов, сохранившуюся кооперацию.

При неизбежном в развитии техники внедрении качественно новых проектных решений для перспективных энергоблоков необходим тщательный сравнительный анализ их технико-экономической эффективности.

Выводы. В результате исследований показано, что при переходе на серийное создание АЭС с поставкой унифицированного оборудования и конструкций высокой заводской готовности могут быть реализованы значительные резервы сокращения затрат на всех стадиях их жизненного цикла и, следовательно, снижены капитальные затраты и себестоимость произведенной энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Reduction** of Capital Costs of Nuclear Power Plants. OECD/NEA, 2000.
2. **The Economic** Future of Nuclear Power. A Study Conducted at the University of Chicago, August 2004.
3. Митенков Ф.М., Авербах Б.А., Антифеева И.Н., Гуреева Л.В. Концептуальное исследование опыта серийного промышленного производства и влияния основных факторов на экономику жизненного цикла транспортных ядерных реакторных установок. — В сб.: 2-я Межд. научно-техн. конф. «Планирование развития энергетики: методология, программное обеспечение, приложения». М., 25—27 октября 2004 г. CD, File 5, с. 16—20.

УДК 621.039.546:621.039.524.44

ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩАЯ СБОРКА ТВСА ВВЭР-1000: НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Кайдалов В.Б., Преображенский Д.Г., Романов А.И., Самойлов О.Б., Фальков А.А., Шишкин А.А.

Отраслевая программа «Эффективное топливоиспользование на АЭС на период 2002—2005 годы и на перспективу до 2010 г.» предусматривала внедрение с 2002 г. на Калининской АЭС 4-годовой кампании на базе ТВСА с уран-

гадолиниевым топливом, а в перспективе и 5-годовой. В настоящее время эта задача решена, и то, что еще 5 лет назад казалось далекой перспективой, планомерно внедряется на первом энергоблоке. Первыми шагами к внед-

рению 5-годичной кампании явилась установка шести ТВСА на пятый год эксплуатации в 2002 г. (18-я кампания первого блока).

При разработке ТВСА основное внимание было направлено на минимизацию отрицательных последствий термомеханического и радиационного воздействий на геометрическую стабильность при эксплуатации. В этих целях в конструкции ТВСА реализованы следующие технические решения:

введен силовой каркас, образованный приваренными к дистанционирующим решеткам уголками. Его жесткость даже в случае полного исключения подкрепления со стороны твэлов достаточна для геометрической стабильности сборки в составе активной зоны;

применены оптимизированные дистанционирующие решетки с уменьшенным взаимодействием в паре твэл—ячейка дистанционирующей решетки, что сводит к минимуму усилия и изгибающие моменты, возникающие вследствие неоднородного радиационно-термического роста элементов сборки;

обеспечена однородность в результате использования по всей высоте активной части ТВСА конструкционных материалов одного класса — циркониевых сплавов, что исключает возникновение дополнительных внутренних усилий из-за разницы коэффициентов линейного расширения;

использован в качестве материала уголков каркаса и направляющих каналов циркониевый сплав Э635, обладающий повышенными по сравнению со сплавом Э110 механическими свойствами и радиационной стойкостью;

обеспечена возможность независимого терморadiационного роста направляющих каналов один относительно другого, осевая нагрузка при транспортно-технологических операциях распределяется на все 18 направляющих каналов в результате применения головки специальной конструкции и гарантированного зазора между направляющими каналами и ячейками дистанционирующих решеток;

применена конструкция направляющих каналов, позволившая повысить изгибную жесткость на наиболее слабом участке между пучком твэлов и головкой ТВСА.

Угловая конструкция ТВСА характеризуется меньшим гидравлическим сопротивлением по сравнению с ТВС, каркас которой формируется на направляющих каналах. Кроме того, из-

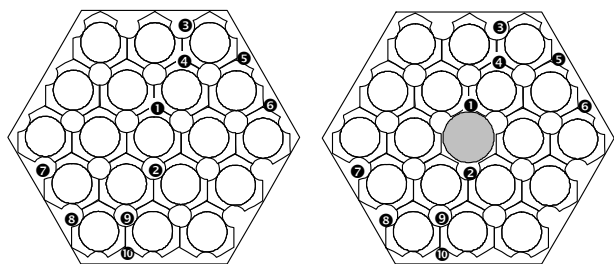
за наличия уголков на периферии ТВСА происходит перераспределение расхода теплоносителя из зазоров между ТВС в наиболее энергонапряженную центральную часть. В результате снижаются подогрев теплоносителя в центральной части ТВСА примерно на 2 °С (относительно безугловой конструкции), паросодержание на 10—12%, повышается минимальный коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи.

Применение сборок ТВСА, устойчивых к формоизменению, привело к снижению зазоров между ТВС в активной зоне до <5 мм, что дополнительно повышает коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи в результате уменьшения байпасных протечек через зазоры [1].

Угловая конструкция ТВСА по сравнению с каркасом, формируемым на направляющих каналах, не требует применения дистанционирующих решеток повышенной прочности и жесткости и характеризуется невысоким гидравлическим сопротивлением пучка твэлов, что является благоприятным фактором по условиям охлаждения твэлов в нормальных и аварийных режимах и для обеспечения совместимости ТВСА с другими ТВС в смешанных активных зонах.

Меньший, чем в других конструкциях ТВС ВВЭР-1000, диаметр направляющих каналов обуславливает дополнительное увеличение расхода в центральной области вблизи направляющих каналов и повышение запаса до кризиса теплоотдачи. Низкое гидравлическое сопротивление ТВСА повышает расход теплоносителя через реактор на 2%, расширяет возможности применения эффективных турбулизирующих перемешивающих решеток.

Экспериментальное обоснование конструкции ТВСА. В обоснование конструкции ТВСА был проведен комплекс экспериментальных исследований на моделях, фрагментах и макетах. Были изучены прочностные и жесткостные характеристики ТВСА, позволившие подтвердить ее геометрическую стабильность в процессе эксплуатации и верифицировать расчетные коды по термомеханике [2, 3]. В обоснование теплогидравлических характеристик и теплотехнической надежности ТВСА и ее модификаций выполнен комплекс экспериментальных исследований на электрообогреваемых 19-стержневых моделях (рис. 1). Проведены испытания более 20 моделей ТВСА,

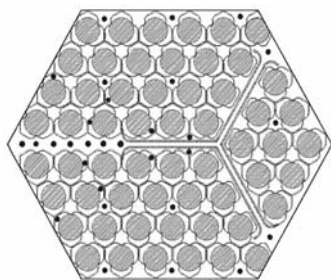


Р и с. 1. Сечение моделей ТВСА с равномерным радиальным энергораспределением: ○ — имитатор ТВЭЛов; ◐ — имитатор направляющего канала; ● — термопреобразователь в ячейке

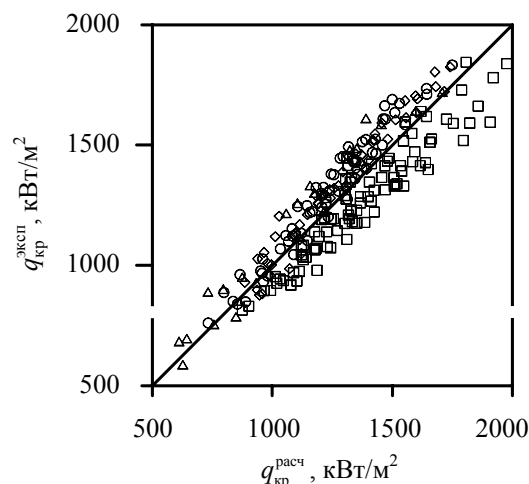
в том числе с имитацией условий около уголков, с направляющими каналами, с различным шагом установки дистанционирующих решеток, с радиальной и высотной неравномерностью тепловыделения. Исследован подогрев теплоносителя в характерных ячейках пучка, кризис теплоотдачи и закризисный теплообмен в стационарных и нестационарных условиях.

Распределение локальных скоростей и расходов теплоносителя в ячейках по сечению и в зазоре между ТВС изучено на 57-стержневой модели ТВСА, содержащей фрагменты трех соседних сборок (рис. 2).

На основе экспериментов проведена дополнительная верификация аттестованной программы КАНАЛ (ОКБМ) ячейкового теплогидравлического расчета ТВС в стационарных режимах. Показана достоверность расчета по этой программе локальных характеристик теплоносителя и кризиса теплоотдачи с учетом тепловой и гидравлической неидентичности ячеек и особенностей конструкции ТВСА. Погрешность расчета критического теплового потока не превышает 15%. Выполнено расчетно-экспериментальное обоснование гидравлической совместности ТВСА с другими конструкциями ТВС ВВЭР-1000 (рис. 3). Экспериментальные исследования и результаты теплогидравлических расчетов подтвердили надежное охлаждение



Р и с. 2. Сечение экспериментальной 57-стержневой модели ТВСА: ● — зона измерения вектора скорости



Р и с. 3. Расчетный и экспериментальный критический тепловой поток для моделей ТВСА с равномерным (○) и неравномерным энергораспределением (◻), направляющим каналом (◊), несимметричная модель (Δ)

ТВЭЛов ТВСА во всех проектных режимах эксплуатации.

В целом для проведения исследований, завершившихся испытаниями полномасштабных макетов ТВСА, было задействовано свыше 30 стендов, в том числе четыре для статических прочностных испытаний, два для вибрационных, включая гидродинамическое возбуждение теплоносителем, четыре для термомеханических, по три для гидравлических и ресурсных испытаний, два для прочностных аварийных испытаний и 13 для испытаний полномасштабных макетов ТВСА. Для испытаний были также задействованы стенды сторонних организаций: стенд для испытаний 19-стержневой модели ТВСА на кризис теплообмена (ФЭИ им. А.И. Лейпунского), стенд для проведения испытаний на сброс органов СУЗ (АО «Ижорские заводы»), стенд для испытаний полномасштабного макета ТВСА в условиях максимальной проектной аварии и максимального расчетного землетрясения (ОАО «Машиностроительный завод»), 7-кассетный стенд для ресурсных, термочастотных и термомеханических испытаний (ОКБ «Гидропресс»).

С 2002 г. в ОКБМ проводятся работы по совершенствованию конструкции ТВСА, направленные на повышение эксплуатационных характеристик, надежности и технологичности. Основные результаты работ таковы.

Внедрение головки с трубками термоконтроля. Первым этапом совершенствования явилось создание совместно с РНЦ «Курчатовский

институт» головки с трубками термоконтроля, предназначенной для повышения достоверности измеряемой температуры на выходе из активной зоны — исключения эффекта, связанного с тем, что термопары для измерения температуры теплоносителя на выходе из активной зоны расположены в зоне головки, куда по направляющим каналам поступает недогретый теплоноситель с входа активной зоны. Вследствие этого измеряемая температура на 10—15 °С ниже температуры на выходе из активной зоны. Для решения этой проблемы в конструкцию головки были введены три трубки, подводящие «горячий» теплоноситель непосредственно к термопарам. В результате измеряемая выходная температура и подогрев в ТВСА с модернизированной головкой отличаются от расчетных балансных значений на 1—2 °С. Кроме того, существенно расширяются возможности использования данных термоконтроля для восстановления энергораспределения и повышается безопасность эксплуатации ВВЭР-1000.

Повышение надежности ТВСА. С увеличением срока службы в активной зоне возрастают экономические потери в случае выхода ТВС из строя в первые годы эксплуатации. Это связано с увеличением стоимости вследствие повышения обогащения топлива ^{235}U и загрузки урана. Поэтому перед разработчиком топлива стоят две задачи: повышение эксплуатационной надежности топлива и обеспечение ремонтоспособности в условиях бассейна выдержки АЭС. Каждое из этих направлений в полной мере реализовано в конструкции ТВСА.

Установка специального фильтра. Основной причиной выхода ТВС из строя является повреждение оболочек твэлов посторонними частицами, находящимися в теплоносителе. Для исключения этого явления на входе в ТВС устанавливается специальный фильтр. Впервые в ТВСА два таких фильтра были установлены в опытную эксплуатацию в 2002 г. После этого конструкция фильтра претерпела некоторые изменения, направленные на повышение технологичности. В настоящее время фильтр успешно эксплуатируется на первых двух энергоблоках Калининской АЭС. Проводимые ежегодные осмотры показывают, что на фильтре отсутствуют какие-либо отложения, приводящие к блокировке проходного сечения.

Антивибрационный нижний узел. Второй причиной выхода ТВС из строя является фреттинг-износ оболочек твэлов в ячейках дистанционирующих решеток. В основном он проявляется в нижней части на участке выравнивания расхода теплоносителя между ТВС. Наиболее выражен он на периферии активной зоны, где имеются значительные неравномерности расхода теплоносителя на входе в ТВС и, как следствие, большие поперечные перетечки теплоносителя, вызывающие вибрацию твэлов. Противодействие фреттинг-износу особенно актуально при внедрении 5-годичной кампании топлива со схемой перестановок, при которой ТВС с уже ослабленными связями твэл—ячейка дистанционирующей решетки переставляется на периферию активной зоны.

Для снижения вибрации твэлов в нижнем пролете ТВСА в конструкцию нижнего опорного узла была введена стальная антивибрационная решетка, которая устанавливается на некотором расстоянии от опорной плиты и представляет собой дистанционирующую решетку уменьшенной высоты. Экспериментальные исследования с имитацией поперечных перетечек теплоносителя подтвердили работоспособность данного узла и существенное снижение амплитуды вибрации твэлов в нижнем пролете.

Разборность ТВСА. Она преследует несколько целей: ремонт свежей ТВС в случае повреждения при транспортировке, ремонт и возвращение недовыгоревшей негерметичной ТВС в активную зону, ремонт и отправка на завод регенерации отработавшей негерметичной ТВС, исследования ТВС и отдельных твэлов в процессе эксплуатации. Последние три задачи решаются при наличии на станции стенда инспекции и ремонта ТВС.

Для разборности в конструкцию ТВСА введены изменения, позволившие снимать и устанавливать головку (цанговое крепление на направляющих каналах). Возможность ремонта ТВСА в условиях бассейна выдержки в настоящее время подтверждена на созданном в ОКБМ стенде инспекции и ремонта. Натурные испытания по сборке-разборке отработавшей штатной ТВСА намечены на 2008 г. на первом энергоблоке Калининской АЭС.

Уменьшение числа дистанционирующих решеток в составе ТВСА с 15 до 8 при увеличении их высоты с 20 до 35 мм. Данное техни-

ческое решение позволяет снизить трудоемкость изготовления ТВСА, уменьшить количество конструкционных материалов в активной зоне, гидравлическое сопротивление и повысить жесткость дистанционирующей решетки, что улучшает термомеханику сборки. В настоящее время в эксплуатации находятся 32 ТВСА с восемью дистанционирующими решетками. Максимальное время эксплуатации двух из них составляет 3 года, результаты эксплуатации положительные.

Повышение ураноемкости путем увеличения диаметра топливной таблетки и высоты топливного сердечника. Для повышения экономической эффективности использования топлива проработаны два направления развития ТВСА, которые по результатам опытной эксплуатации могут быть объединены в одном конструктивном решении, — увеличение высоты топливного сердечника и изменение геометрии топливной таблетки (уменьшение до исключения центрального отверстия, повышение наружного диаметра таблетки при сокращении толщины оболочки твэлов).

Увеличение высоты топливного сердечника на 150 мм реализовано в конструкции ТВСА-У путем сокращения высоты концевых деталей — головки и хвостовика. При этом для исключения проблем с эффективностью органов СУЗ на первом этапе внедрения высота топливного сердечника была повышена за счет бланкетов из природного урана. При проведении комплекса работ по увеличению длины поглощающих стержней СУЗ, высоты поглотителя и хода органов СУЗ возможна комплектация удлинённых участков топливного сердечника обогащенным ураном. Увеличение загрузки урана в ТВСА при этом составляет около 21 кг. Две опытные ТВСА-У с бланкетами из природного урана эксплуатируются в настоящее время на Калининской АЭС в течение 4-й кампании топлива.

В рамках второго направления в настоящее время разработан технический проект ТВСА-альфа, в конструкции которой применяются твэлы с топливной таблеткой диаметром 7,8 мм без центрального отверстия. При этом толщина стенки оболочки составляет 0,57 мм. Для снижения газовыделения в твэлах используются топливные таблетки с зерном размером 25—30 мкм. Увеличение загрузки урана в ТВСА составляет 50,3 кг. В настоящее время одна опыт-

ная ТВСА с 18 твэлами повышенной ураноемкости эксплуатируется второй год, шесть ТВСА-альфа, полностью укомплектованные такими твэлами, поставлены на эксплуатацию. В дальнейшем при положительных результатах работы и решении вопросов с эффективностью органов СУЗ возможно совмещение указанных решений в рамках одной конструкции ТВСА. Увеличение загрузки урана при этом составит 73,5 кг относительно базового проекта.

Применение перемешивающих решеток.

Более низкое гидравлическое сопротивление ТВСА и ТВСА-альфа по сравнению с серийной ТВС ВВЭР-1000 позволяет установить в ТВСА перемешивающие решетки. Они представляют собой систему взаимопересекающихся пластин, на которых имеются дефлекторы-лепестки, отогнутые относительно вертикали пластин. Постановка перемешивающих решеток позволяет снизить градиент температуры по сечению ТВСА и соответственно повысить среднюю температуру на выходе из активной зоны при сохранении максимальной температуры в наиболее напряженной ячейке, увеличить запас до кризиса теплообмена. В результате возможно достижение следующих экономических улучшений: внедрение более эффективных топливных циклов с $K_r > 1,6$ и увеличение мощности энергоблока на 8—10% (при условии обоснования стационарного оборудования).

Усовершенствования конструкции ТВСА и успешные ресурсные испытания создали условия для внедрения экономически эффективной 5-годичной кампании топлива на базе 36 ТВСА подпитки. Основные показатели ТВСА в перспективном 5-годичном цикле следующие:

Общее время работы на номинальной мощности, эф. ч . . .	40 000
Среднее обогащение топлива подпитки, % . . .	4,83
Максимальное выгорание топлива, МВт·сут/кг:	
ТВСА . . .	68
твэл . . .	72
Относительная мощность твэла . . .	1,6
Максимальная линейная мощность твэла, Вт/см . . .	448

Результаты эксплуатации ТВСА. В настоящее время ТВСА успешно эксплуатируются на 16 энергоблоках ВВЭР-1000 АЭС России,

Украины и Болгарии, что составляет более 70% всех ВВЭР-1000. Вновь введенные блоки ВВЭР-1000 — 3-й Калининской, 2-й Хмельницкой и 4-й Ровенской АЭС эксплуатируются с ТВСА.

Замещение серийных ТВС ВВЭР-1000 на ТВСА на Калининской АЭС обеспечило эффективное выпрямление активной зоны и уменьшение прогибов ТВС с 20 до 5 мм, скручивание ТВСА не превысило 0,7 град. Динамика снижения кривизны ТВС и зазоров между ними приведена на рис. 4.

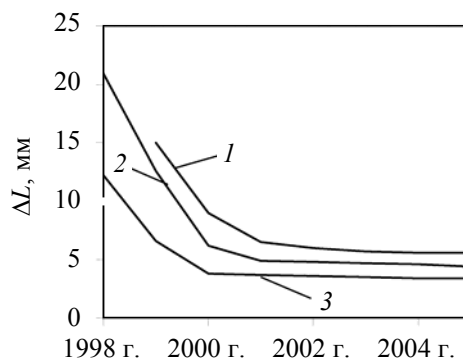
Активная зона из ТВСА геометрически стабильна, что обеспечивает сохранение в процессе эксплуатации ее теплогидравлических и нейтронно-физических характеристик, а также нормальное функционирование рабочих органов СУЗ. Усилие их перемещения не превышает 40 Н, время падения — не более 2,7 с и не изменяются в течение кампании.

Послереакторные исследования двух отработавших ТВСА после 4 и 6 лет эксплуатации подтвердили их работоспособность, жесткость каркаса, геометрическую стабильность и нормальное состояние оболочек твэлов. Наличие уголков жесткости позволяет повысить (в активной зоне в 10 раз) скорость вертикального перемещения ТВСА при транспортно-технологических операциях во время перегрузки топлива. На Калининской АЭС это позволило сократить время перегрузки топлива на 4—5 сут, что в итоге сократило сроки проведения плановых ремонтов и повысило КИУМ энергоблока.

Реализована 4-годовая кампания топлива на базе 42 ТВСА подпитки. Внедряются эффективные схемы перегрузок топлива путем реализации новых проектных ограничений на неравномерность энерговыделения твэлов ($K_r = 1,6$).

К настоящему времени 18 ТВСА отработали 5 лет, 7 ТВСА — 6 лет, в 2006 г. завершена эксплуатация одной ТВСА в течение 7 лет. Достигнуты следующие основные показатели работоспособности: максимальное выгорание топлива ТВСА — 61,8 МВт·сут/кг, твэла — 71 МВт·сут/кг, эффективное время работы на номинальной мощности 49 800 эф. ч, календарное время 54 700 ч.

Положительные качества ТВСА — геометрическая стабильность, повышенные теплотех-



Р и с. 4. Расчетное (1), фактическое изменение изгиба ТВС (2), фактический зазор между ТВС (3) с 14-й по 20-ю топливную кампанию

нические запасы, невысокое гидравлическое сопротивление позволяют ослабить проектные ограничения на неравномерность энерговыделения до $K_{r\max} = 1,65$ для реализации эффективного использования топлива и увеличения номинальной мощности активной зоны на 8—10%.

Заключение. Конструкция ТВСА, основанная на жестком уголкового каркасе, является наиболее оптимальной для гексагональной структуры активной зоны ВВЭР-1000. Технические решения ТВСА нового поколения соответствуют мировым тенденциям совершенствования топлива PWR и подтверждены реакторными испытаниями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кууль В.С., Самойлов О.Б., Фальков А.А. и др. Исследование теплогидравлических характеристик ТВСА ВВЭР-1000. — В сб.: 3-я Научно-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, 26—30 мая 2003 г., с. 125.
2. Самойлов О.Б., Вахрушев В.В., Куприянов А.В. и др. Экспериментальные исследования теплогидравлических характеристик на моделях ТВСА ВВЭР-1000. — В сб.: 4-я Межд. научно-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, 23—27 мая 2005 г., с. 102.
3. Самойлов О.Б., Фальков А.А., Шипов Д.Л. и др. Теплогидравлические и гидродинамические исследования характеристик ТВС альтернативной конструкции ВВЭР-1000. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2004, вып. 2, с. 47—55.