

страны-пользователя, и транспортабельным реакторным блоком, снабжающим паром турбогенераторную установку и сдаваемым в аренду страной-поставщиком, в максимальной степени снижает риск страны-пользователя, поскольку риск, связанный с ядерной частью комплекса, принимает на себя страна-поставщик транспортабельного реакторного блока. Оценки экономической эффективности показали, что при существующих тарифах на пресную воду и электрическую энергию в развивающихся странах его эксплуатация будет рентабельна как для страны-пользователя, так и для страны-поставщика, в том числе и при финансировании строительства береговой части опреснительного энергокомплекса и транспортабельного реакторного блока за счет кредитов на возвратной основе при приемлемых ставках, составляющих ориентировочно 5—8% для береговой части в развивающихся странах и 15% для транспортабельного реакторного блока в нашей стране. Предложенный к использованию СВБР-75/100, обладая высокоразвитыми свойствами внутренней самозащищенности и пониженным риском несанкционированного распространения делящихся материалов, обеспечивает высокую социальную приемлемость опреснительного комплекса и создает условия для его использования в развивающихся странах, в том числе и политически нестабильных регионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Technical** and Economic Evaluation of Potable Water Production Through Desalination of Seawater by Using Nuclear Energy and other Means. IAEA-TECDOC-666. Vienna, 1992.
2. Зродников А.В., Читайкин В.И., Тошинский Г.И. и др. АЭС на основе реакторных модулей СВБР-75/100. — Атомная энергия, 2001, т. 91, вып. 6, с. 415—425.

УДК 621.1.039.534

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТВС-2М ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ

Драгунов Ю.Г., Рыжов С.Б., Васильченко И.Н., Кобелев С.Н.

Отраслевой программой «Эффективное топливоиспользование на АЭС на период 2002—2005 годы и на перспективу до 2010 года» предусмотрено внедрение на Балаковской АЭС топливных циклов, обеспечивающих увеличенный КИУМ (коэффициент использования установленной мощности). Первыми шагами для достижения поставленной цели явились разработка и внедрение ТВС с жестким каркасом — ТВС второго поколения, получившей название ТВС-2. Она спроектирована для 4-годового топливного цикла и 3×350 эф. сут с выгоранием до 55 МВт·сут/кг. Прогнозируемый за время эксплуатации прогиб оси ТВС не превысит 5 мм.

ТВС-2 по сравнению со штатно эксплуатируемой усовершенствованной ТВС имеет следующие основные конструктивные решения:

образован жесткий сварной каркас (дистанционирующие решетки приварены к направляющим каналам) для обеспечения сопротивляемости изгибающим и крутящим нагрузкам;

применен сплав Э-635 для изготовления направляющих каналов и центрального канала в целях повышения механических свойств и стабильности геометрии при длительной эксплуатации;

повышена изгибная жесткость дистанционирующих решеток (увеличены до 30 мм высота ячеек и до 0,3 мм толщина стенки трубы ячеек) для исключения потери формы при температурном и радиационном удлинении;

оптимизирована геометрия ячеек дистанционирующих решеток для обеспечения оптимальных усилий хода твэлов в ячейках, что снизило термомеханические нагрузки на элементы пучка твэлов при сохранении их стойкости к фреттинг-износу в процессе эксплуатации;

увеличена поперечная жесткость головки (введена направляющая обечайка) для повышения устойчивости и снижения трения в ее элементах;

увеличен размер «под ключ» для ограничения максимальных прогибов в активной зоне в процессе эксплуатации;

оптимизированы число и расположение дистанционирующих решеток по высоте пучка твэлов для снижения металлоемкости, трудоемкости производства и обеспечения необходимых гидравлических характеристик;

внедрена нижняя решетка с центрально-симметричными проливными отверстиями для улучшения гидродинамики потока на входе в пучок твэлов. Такая решетка имеет более высокую прочность без уменьшения проходного сечения для теплоносителя;

установлены патрубки термоконтроля в головке для повышения представительности штатного термоконтроля на выходе из ТВС.

С увеличением высоты ячеек увеличился коэффициент гидравлического сопротивления дистанционирующих решеток. Поэтому в техническом проекте число дистанционирующих решеток уменьшено с 15 до 12 (ТВС-2) и до 13 (ТВС-2М). Исполнение ТВС-2 с 12 дистанционирующими решетками является базовой конструкцией, с 15 дистанционирующими решетками — специальной конструкцией, созданной в целях ускоренного выравнивания деформаций штатной активной зоны.

Для проверки выполнения проектных пределов были проведены измерения теплогидравлических характеристик при пуске 1-го блока Балаковской АЭС в 13-ю топливную загрузку после планово-предупредительного ремонта в 2003 г. на разных уровнях мощности и с разным числом работающих ГЦН. Расчетные значения подогрева теплоносителя подтвердились.

Опытно-промышленная эксплуатация 54 ТВС-2 в исполнении с 15 дистанционирующими решетками на 1-м энергоблоке Балаковской АЭС в 2003 г. прошла успешно. Уже в начале 13-й топливной кампании прогибы ТВС и зазоры между ТВС снизились примерно в 2 раза. Существенно уменьшились и усилия трения при перемещении органов регулирования системы управления и защиты с уплотненного верхнего блока. Время падения органов регулирования системы управления и защиты не превысило проектных пределов.

В 14-ю топливную кампанию были установлены ТВС-2 с 12 дистанционирующими решетками. Их эксплуатация подтвердила тенденцию к дальнейшему уменьшению прогибов ТВС в активной зоне, снижению усилий при загрузке-выгрузке ТВС, стабилизацию времени падения органов управления системы управления и защиты на уровне не более 2 с.

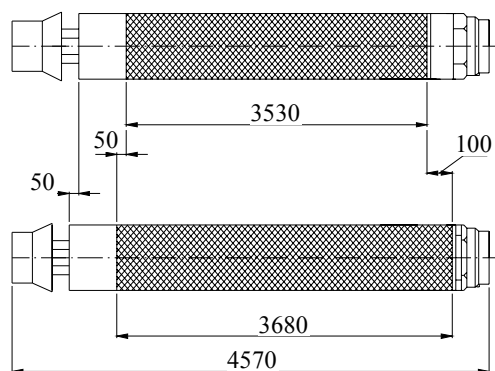
После перехода на стационарную загрузку скорость перемещения ТВС-2 при транспортно-технологических операциях может быть существенно увеличена (обосновано до 4 м/мин). Это дает возможность значительно сократить цикл вертикального перемещения в пределах активной зоны и общее время перегрузки топлива на АЭС.

Внедрение ТВС-2 позволило усовершенствовать методику, учитывающую увеличенные межкассетные зазоры, и получить дополнительные возможности для выбора топливных загрузок, установления новых проектных ограничений и повышения мощности.

Проектные характеристики ТВС-2 показывают, что на базе данной конструкции могут быть реализованы любые допустимые с точки зрения нейтронной физики и установленных ограничений по исходному обогащению топливные циклы. Для их внедрения должны быть реализованы мероприятия по увеличению цикла технического освидетельствования и ремонта другого оборудования.

Одним из путей повышения КИУМ является удлинение кампании, которое может быть достигнуто за счет увеличения загрузки топлива в ТВС, и повышение обогащения топлива. Повышение обогащения топлива с точки зрения ядерной безопасности ограничено 5%. Анализ показал, что в существующей конструкции ТВС-2 ВВЭР-1000 имеются резервы для размещения дополнительного количества топлива. Так, конструкция хвостовика позволила сократить его высоту на 100 мм и на столько же удлинить твэлы вниз. Головку ТВС тоже можно укоротить на 100 мм, но удлинение твэла вверх ограничено размером выгородки реактора — не более 50 мм. Для ближайших разработок размер газосборника удлиненного твэла сохранен штатным.

Столб топлива может быть удлинен на 150 мм, что позволит увеличить загрузку топлива примерно на 4,2% и на столько же кампанию (рис. 1). Исследованиями установлено, что увеличить загрузку топлива возможно и путем уменьшения диаметра центрального отверстия топливной таблетки. На первом этапе предполагается его снизить до 1,2 мм, затем перейти к таблеткам без отверстия, аналогично топливу, поставляемому фирмой «Вестингауз» (США) на АЭС «Темелин» (Чехия). Как показали технологические исследования на заводах-изготовителях, увеличить за-



Р и с. 1. Схема удлинения топливного столба

грузку топлива можно и за счет повышения наружного диаметра топливной таблетки на 0,03 мм. Таким образом, суммарная загрузка топлива возрастет примерно на 16,7%, на столько же и длительность кампании.

С учетом положительных результатов внедрения ТВС-2 при разработке ТВС с увеличенной загрузкой топлива — ТВС-2М за основу принята конструкция с 12 дистанционирующими решетками с шагом 340 мм, обладающая оптимальным сочетанием достаточной термоме-

ханической устойчивости и приемлемым коэффициентом гидравлического сопротивления с точки зрения выполнения критериев безопасного охлаждения зоны (рис. 2).

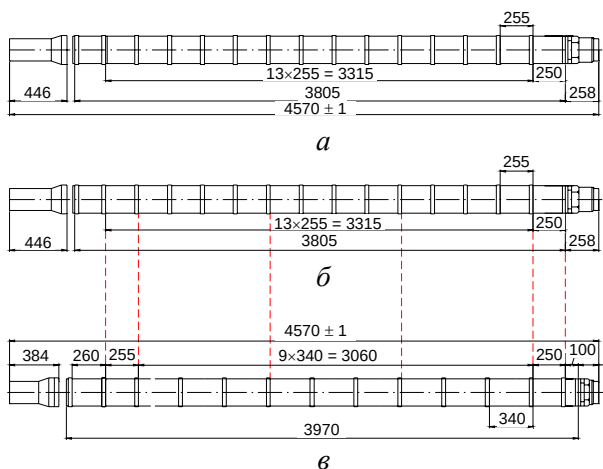
Удлинение топливного столба требует учета изменения границ топлива относительно координат точек системы внутриреакторного контроля. Изменение границ топлива относительно поглотителя в поглощающем стержне требует удлинения самого поглотителя и увеличения его рабочего хода. Это потребует замены поглощающих стержней, штанг приводов и датчиков по-

ложения системы управления и защиты. Все эти проблемы могут быть решены в дальнейшем, на ближайшую перспективу решается вопрос о применении бланкетов в зонах удлинения топливного столба. Применение бланкетов не позволит получить максимальный эффект удлинения кампании, но снизит удельный расход природного урана, что для этого промежуточного решения является положительным фактором.

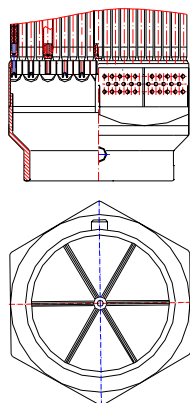
Удлинение столба обогащенного топлива вверх приводит к повышению потока нейтронов и флюенса на зону сварного шва корпуса реактора и нижние концы стержней с поглотителем, а также некоторому ухудшению радиационной обстановки под оболочкой. Эти изменения должны учитываться в проекте. Применение бланкетов позволит сохранить эти параметры без изменений.

На первом этапе в ТВС-2М решено зоны удлинения топливного столба заполнить бланкетами, выполненными из таблеток обогащением 0,7—2%. Таким образом, границы топлива основного обогащения остались в штатных пределах. Это существенно упрощает обоснование внедрения ТВС-2М на действующих реакторах, а также облегчает с точки зрения нейтронной физики дальнейший переход к удлиненному столбу топлива без бланкетов с еще более экономичными характеристиками.

В области теплогидравлики решена проблема повышения коэффициента гидравлического сопротивления ТВС вследствие удлинения пучка твэлов и увеличения числа дистанционирующих решеток. В качестве критерия принят коэффициент гидравлического сопротивления ТВС-2 с 15 дистанционирующими решетками. Гидравлические потери удалось компенсировать изменением конструкций головки и хвостовика. По результатам испытаний гидравлическое сопротивление макета ТВС-2М получено близким к ТВС-2 с 12 дистанционирующими решетками. При проектировании ТВС-2М определено оптимальное число дистанционирующих решеток — 13, которое обеспечило приемлемые жесткость и устойчивость каркаса ТВС.

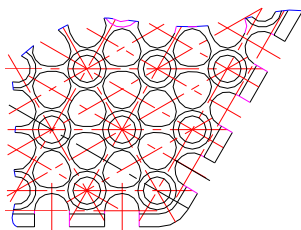


Р и с. 2. Исполнение ТВС и схема расположения элементов (дистанционирующей решетки, хвостовика, головки) в ТВС-2 с 15 (а) и 12 дистанционирующими решетками (б), ТВС-2М (в)



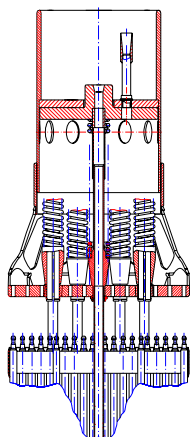
Р и с. 3. Нижняя часть ТВС-2М

В области механики требовалось решить проблему надежности узлов крепления твэлов в нижней решетке. В укороченном хвостовике существенно сокращен участок стабилизации, в котором должны выравниваться по сечению скорости входящего потока теплоносителя. Поэтому для ускорения стабилизации потока в хвостовике коробчатая конструкция опорных ребер заменена на радиальную (рис. 3). Для повышения вибростойкости узлов крепления твэлов и самих твэлов на входном участке первая дистанционирующая решетка установлена на уровне 100 мм от нижней решетки. При разогреве до рабочих параметров за счет разности температурных расширений стальной нижней и циркониевой первой решеток необходимые конструктивные зазоры исчезают и создаются дополнительные силы, зажимающие заглушки твэлов в нижней решетке. Близость первой дистанционирующей решетки к нижней решетке, а также разный размер первых трех пролетов между дистанционирующими решетками создают условия для снижения вибронагрузок на узлы крепления твэлов в нижней решетке и на нижние концы самих твэлов. Такое расположение первой дистанционирующей решетки позволило сохранить расположение остальных дистанционирующих решеток на штатных уровнях базового варианта (ТВС-2 с 12 дистанционирующими решетками). В конструкции цангового соединения нижней заглушки твэла с нижней решеткой устранен радиальный люфт. Устранение радиального зазора совместно с уменьшением расстояния от нижней решетки до первой дистанционирующей решетки повысило вибростойкость крепления твэлов.



Р и с. 4. Фрагмент нижней решетки ТВС-2М

Вибронагрузки на нижние концы твэлов снижает нижняя решетка с центрально-симметричными проливными отверстиями, обеспечивающими равномерность потоков вокруг каждого твэла (рис. 4).



Р и с. 5. Фрагмент головки ТВС-2М

Существенной модернизации подверглась и головка ТВС-2М. Она укорочена на величину, позволяющую удлинить твэлы вверх, а также увеличить запас на их свободный радиационный и температурный рост (рис. 5). В головке также реализованы изменения, необходимые для снижения гидравлических потерь потока на выходе из ТВС-2М. Для компенсации потери поперечной жесткости модернизирована конструкция цанг, обеспечивающих безлюфтовое соединение с направляющими каналами, а также увеличена база скольжения между верхней и нижней частями головки. Для снижения трения в узлах головки оптимизированы направляющие втулки и их материалы. Испытаниями подтверждена эффективность данных решений — трение в головке уменьшилось примерно на 26%.

Несмотря на большие изменения конструкции головки, удалось сохранить удачное и проверенное опытом соединение головки с направляющими каналами. Работоспособность конструкции подтверждена не только в заводских условиях, но и послереакторными исследованиями. Работоспособность съемной головки про-

верена в НИИАРе на шести УТВС с аналогичным цанговым соединением, две из них отработали три и четыре топливных цикла соответственно. Это дает основания считать ТВС-2М ремонтпригодной конструкцией.

Увеличение массы ТВС повысило запасы до всплытия. За счет этих запасов стало возможным применить в головке пружины меньшей жесткости. По расчетным оценкам минимальный запас до всплытия ТВС-2М для стационарной загрузки составляет не менее 1,29 на холодной воде (при 200 °С) и не менее 1,37 в номинальном режиме. Уменьшение усилий поджатия ТВС в свою очередь повышает устойчивость пучка твэлов при эксплуатации.

Экспериментальное обоснование подтвердило, что характеристики ТВС-2М соответствуют проектным, по изгибной жесткости она не уступает ТВС-2. Поэтому прогнозируется такое же успешное ее внедрение.

Максимальное использование апробированных конструкторских решений базовой ТВС-2 обеспечивает надежность конструкции ТВС-2М и высокую готовность производства.

Таким образом, совокупность представленных решений дает возможность достичь проектного выгорания ~68 МВт·сут /кг в ТВС-2М и обеспечить возможность перехода на перспективные топливные циклы с удлиненной кампанией в рамках реализации отраслевой программы.

УДК 621.039.524.44:621.039.546.3.001.6

ВЛИЯНИЕ СИЛ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ТВЭЛАМИ И ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИМИ РЕШЕТКАМИ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ И РЕСУРС ТВС ВВЭР

Драгунов Ю.Г., Дроздов Ю.Н., Макаров В.В.

Одними из наиболее серьезных проблем отечественных и зарубежных PWR были неполное введение органов регулирования СУЗ либо превышение проектного времени их падения в активную зону вследствие термомеханического искривления ТВС, фреттинг-коррозия оболочек твэлов при трении о дистанционирующие решетки в процессе вынужденных колебаний. Усовершенствование конструкции ТВС в целях повышения ее надежности сопровождалось расчетно-аналитическими и экспериментальными исследованиями поперечного изгиба и вибропрочности. Помимо исследований упругого сопротивления ТВС представляют интерес и результаты изучения неупругого сопротивления поперечному изгибу [1, 2].

ТВС ВВЭР-1000 состоит из головки, направляющих каналов, твэлов, дистанционирующих решеток, хвостовика и содержит несколько тысяч связей деталей силами трения (рис. 1). Поперечный изгиб ТВС сосредоточенной силой в форме петель гистерезиса характеризуется существенной нелинейностью вследствие конструкционного трения. На рис. 2 показаны две петли гистерезиса, полученные при изгибе ТВС разного конструктивного исполнения. Неупругое сопротивление, определяемое по максимальной ширине петли гистерезиса, составляет 100—600 Н. Установлено, что сила неупругого сопротивления зависит от способа соединения