

В настоящем выпуске журнала публикуются статьи специалистов ОКБ «Гидропресс», подготовленные в соответствии с направлениями его становления и развития и приуроченные к 60-летию юбилею.

В статьях описываются результаты научно-производственной деятельности, которые внесли большой вклад в развитие ядерной энергетики и атомной отрасли нашей страны, рассматриваются основные направления исследований, над которыми коллектив работает в настоящее время.

УДК 621.039.53

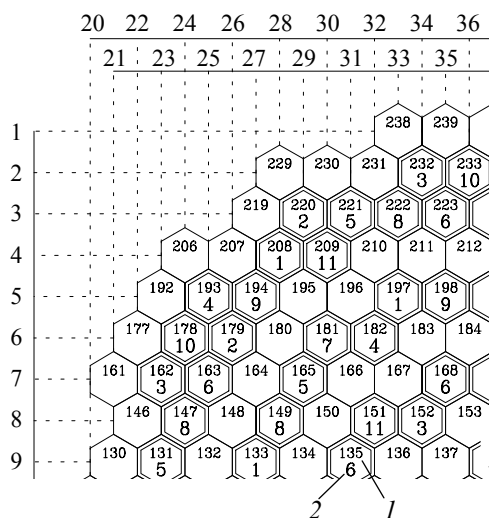
ПРЕЕМСТВЕННОСТЬ ПРИ ВЫБОРЕ РЕШЕНИЙ ПО КОНСТРУКЦИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР-1500

Васильченко И.Н., Кобелев С.Н., Вьялицын В.В., Мальчевский Д.В.

Актуальной задачей последних лет является разработка АЭС с ВВЭР-1500. Эта задача продиктована стремлением на базе высоких достижений современной технологии и производства создать конкурентоспособную АЭС и сохранить приоритетное место нашей страны в мировой ядерной энергетике. Новые повышенные требования обуславливают необходимость введения инновационных решений в конструкцию активной зоны и реакторной установки. Вместе с тем преемственность, т.е. максимально возможное использование апробированных решений при создании активной зоны ВВЭР-1500 снизит затраты и сократит сроки на ее разработку, изготовление, а самое главное, улучшит характеристики надежности и повысит безопасность.

Особенности активной зоны ВВЭР-1500. Повышение мощности АЭС с ВВЭР-1500 и удлинение кампании для обеспечения коэффициента использования установленной мощности не менее 90% достигаются увеличением числа ТВС со 163 до 241 (рис. 1) и загрузки топлива в ТВС (рис. 2). Увеличение загрузки топлива в первую очередь достигнуто путем максимально возможного удлинения топливного столба — на 700 мм относительно прототипа. В дальнейшем могут быть использованы и другие пути — исключение центрального отверстия и повышение наружного диаметра топливной таблетки.

Ограниченные размеры реактора по высоте, требования к высоте столба топлива и сохранению газового компенсационного объема в твэлах привели к необходимости в значительной степени сократить высоту головки ТВС и хвостовика (рис. 3). Поэтому для ускорения выравни-



Р и с. 1. Сечение активной зоны ВВЭР-1500: 1 — номер топливной сборки в 360° симметрии; 2 — номер группы органов регулирования

вания поля скоростей на входе в ТВС опорные ребра в хвостовике выполнены радиальными. Хвостовик с нижней опорной решеткой представляет собой жесткую фермовую конструкцию, способную при максимальных сжимающих и растягивающих нагрузках исключить повреждение крепления твэлов. Такая конструкция хвостовика ТВС позволила реализовать еще одно новое решение — стало возможным продлить циркониевые направляющие каналы за нижнюю опорную решетку и закрепить наконечник в опорных ребрах хвостовика. Таким образом, появилась возможность совместить нижние границы топлива в ТВС и поглотителя.

В проекте ВВЭР-1500 в связи с более высокими требованиями безопасности существенно увеличено число поглощающих стержней — до 118, каждый из них содержит по 24 пэла. Это изменение потребовало увеличить диаметр головки ТВС и гнезда в нижней плите блока защитных труб. Вследствие этого изменилось отношение сечений выхода теплоносителя, и основной поток проходит сквозь головку ТВС, как в PWR. В связи с новой расстановкой пэлов в сечении ТВС ребра головки для их подвески выполнены в виде прямых лучей.

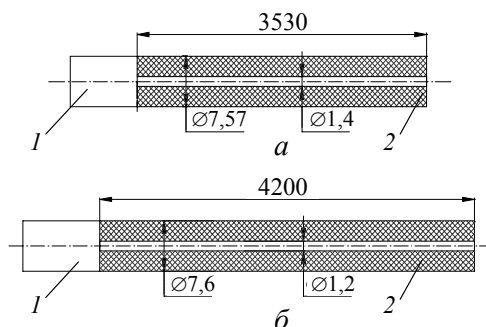
Преимственность конструкции активной зоны ВВЭР-1500. Конструкция активной зоны ВВЭР-1500 имеет принципиальные решения, присущие только российским проектам. Связано это с ориентацией на существующую технологию производства и транспортировку топлива.

Прежде всего принята шестигранная форма ТВС. Такая геометрия позволяет реализовать треугольный шаг размещения твэлов и обеспечить компактность активной зоны, большую равномерность нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик по сечению ТВС. Размер «под ключ» ТВС сохранен таким, как в прототипе. Это существенно экономит средства на подготовку производства ТВС, разработку, обоснование и изготовление транспортно-технологического оборудования, контейнеров. Сохранен и шаг расположения ТВС в активной зоне. Соотношение этих параметров обеспечивает минимальные паразитные протечки теплоносителя и подтверждено многолетним опытом перегрузок и эксплуатации топлива.

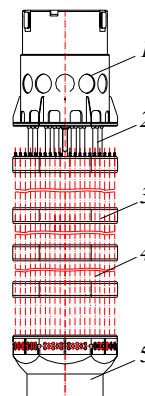
Сохранена основная конфигурация верхнего и нижнего узлов соединения ТВС с внутрикорпусными устройствами. Верхний узел, как и в прототипе, выполнен цилиндрическим (цилиндр — цилиндрическое гнездо) с коническими направляющими поверхностями (рис. 4). Для сохранения принципа защиты пэлов от потока теплоносителя в головку ТВС введена специальная выгородка, которая разделяет потоки, выходящие из направляющих каналов и пучка твэлов. Нижний

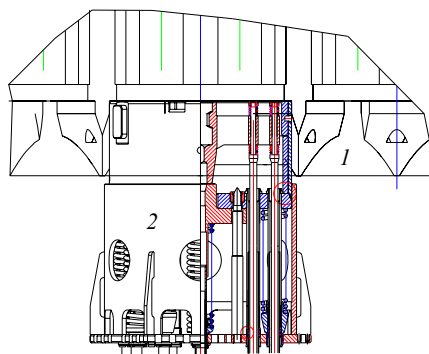
Р и с. 3. Общий вид ТВС ВВЭР-1500: 1 — головка; 2 — направляющие каналы; 3 — дистанционирующая решетка; 4 — пучок твэлов; 5 — хвостовик

узел шар — по конусу в 1990-х годах был подвергнут тщательным



Р и с. 2. Эскиз твэла прототипа (а) и ВВЭР-1500 (б): 1 — газосборник; 2 — топливная часть





Р и с. 4. Верхний узел стыковки ТВС с блоком защитных труб: 1 — головка; 2 — плита блока защитных труб

исследованиям, по результатам которых сформулированы технические требования к нему для безмоментной вертикальной установки ТВС на опору внутрикорпусных устройств, что необходимо для уменьшения деформаций (прогибов) активной зоны. Эти требования сегодня включены во все проекты АЭС с ВВЭР-1000, внедрены в производство, и по ним доработаны ранее изготовленные внутрикорпусные устройства. В частности, впервые эта доработка внедрена на 1-м энергоблоке Волгодонской АЭС. Результаты эксплуатации, измерений прогибов усовершенствованных ТВС и усилий протяжки органов регулирования системы управления и

защиты в активной зоне ВВЭР-1000 Волгодонской и Балаковской АЭС подтвердили существенно лучшую работоспособность усовершенствованного внутрикорпусного устройства Волгодонской АЭС.

Для компенсации избыточной реактивности свежих ТВС применен введенный в топливо гадолиниевый поглотитель (уран-гадолиниевое топливо), который уже с конца 1990-х годов штатно используется в ВВЭР-1000. Твэлы с гадолинием устанавливаются в пучок вместо некоторых твэлов. Тем самым исключена возможность несанкционированного извлечения поглотителя из ТВС и обеспечены преимущества применения выгорающего поглотителя.

Сохранение поперечной геометрии активной зоны дало возможность применить без каких-либо изменений самый трудоемкий и высокотехнологичный элемент — циркониевую дистанционирующую решетку. Получен достаточный положительный опыт ее применения в конструкции ТВС-2 на ВВЭР-1000. Эта конструкция циркониевой дистанционирующей решетки имеет увеличенную до 30 мм высоту, что обеспечивает ей необходимую жесткость и прочность, а также надежное дистанционирование соседних ТВС по ободам дистанционирующих решеток с учетом проектных допусков и изменений размеров при высоком выгорании.

Без принципиальных изменений применяется конструкция направляющего канала — труба размером 13×11 мм с наконечником, содержащим входные отверстия оптимизированного диаметра. В верхней части направляющий канал имеет приваренную втулку для зацепления с цанговым разъемом головки с обеспечением легкого дистанционного ее снятия. Как и в ТВС-2, дистанционирующие решетки привариваются к направляющим каналам контактно-точечной сваркой, в результате чего образуется жесткий каркас, обеспечивающий прямолинейность ТВС в течение всего срока службы.

Шаг размещения дистанционирующих решеток по высоте ТВС принят равным 340 мм по результатам оптимизационных работ, выполненных при создании ТВС-2 для ВВЭР-1000. Такой шаг превышает ранее применявшийся шаг 255 мм и позволяет предотвратить чрезмерное повышение гидравлического сопротивления ТВС в целом. Расчетами, стендовыми испытаниями и опытом эксплуатации подтверждены вибропрочность пучка твэлов и достаточная устойчивость каркаса.

Первая дистанционирующая решетка аналогично ТВС-2М установлена на 100 мм выше нижней опорной решетки. Она усиливает жесткость каркаса в нижней части и гасит вибрации твэлов.

В конструкции головки ТВС ВВЭР-1500 (рис. 5) применены пружинный блок с разделением функций пружин и цанговое разъемное соединение с направляющими каналами, аналогичные по принципу действия с ТВС-2М. Подобные узлы применяются в ТВС ВВЭР-1000 с начала 1990-х годов и имеют высокую надежность, неоднократно подтвержденную послереакторными испытаниями. Цанговые разъемные соединения позволяют демонтировать головку с ТВС при ремонте сборки на стенде инспекции.

Как и в прототипе, пэл ВВЭР-1500 комбинированный (карбид бора + титанат диспрозия), помещен в трубу размером 8,2×0,55 мм. Такая конструкция в ВВЭР-1000 обеспечила высокие характеристики надежности и с 1995 г. работает без замечаний.

Для сохранения отработанных решений по транспортно-технологическому оборудованию и принципа совместного выполнения операций ТВС с установленным в нее поглощающим стержнем его головка выполнена аналогично головке поглощающего стержня ВВЭР-1000 с возможностью полного входа в головку ТВС.

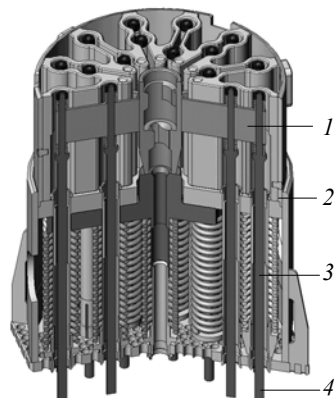
Таким образом, большое число примененных принципиальных решений прототипа в конструкции активной зоны ВВЭР-1500 вселяет уверенность в таком же надежном выполнении ею своих функций.

Опыт экспериментального обоснования ТВС ВВЭР-1000. Использование апробированных конструкторских решений сводит задачу их экспериментального обоснования к анализу изменения нагрузок. Анализ конструкторских решений и условий эксплуатации ТВС ВВЭР-1500 выявил необходимость следующих испытаний:

на полномасштабных макетах — определение гидравлических характеристик ТВС и ее участков, ресурсные испытания с пульсатором давления, ресурсные испытания на сброс органов регулирования, вибрационные испытания на воздухе и в воде (определение параметров собственных и вынужденных колебаний), статические испытания (жесткость на поперечный и продольный изгиб), аварийные динамические испытания;

на фрагментах и моделях — определение работоспособности и вибропрочности узла крепления твэлов в нижней опорной решетке, исследование взаимодействия пучка твэлов с элементами каркаса, включая определение сил трения (для обеспечения исходными данными расчетных обоснований).

Возможности улучшения. Несмотря на то, что ТВС ВВЭР-1500 вобрала в себя лучшие на сегодня решения по конструкции, уже сегодня просматриваются возможности ее дальнейшего усовершенствования. Наиболее значимыми являются увеличение загрузки топлива и улучшение теплотехнических качеств. Возможности повышения загрузки топлива очевидны, и в этом направлении уже ведутся работы



Р и с. 5. Головка ТВС с поглощающим стержнем: 1, 2 — головка поглощающего стержня и ТВС соответственно; 3 — пэл; 4 — направляющий канал

на ВВЭР-1000. Улучшение теплотехнических качеств ТВС связывается с применением интенсификаторов теплообмена и максимально возможным снижением гидравлического сопротивления дистанционирующих решеток.

Заключение. Преемственность конструкторских решений позволила в короткие сроки создать для ВВЭР-1500 конструкцию ТВС и поглощающего стержня, отвечающую требованиям проекта реакторной установки. Принцип преемственности вселяет уверенность в достижение положительного результата разработки, но не отменяет необходимости всестороннего и полного обоснования новой конструкции. Для успешной реализации новой разработки необходимо определить оптимальное соотношение апробированных и новых решений. Сбалансированная таким образом конструкция ТВС ВВЭР-1500 имеет перспективу дальнейшего развития.

УДК 621.186.6

ПАРОГЕНЕРАТОР ПГВ-1500. НОВЫЕ ЗАДАЧИ И РЕШЕНИЯ

Драгунов Ю.Г., Лукасевич Б.И., Трунов Н.Б., Харченко С.А., Сотсков В.В.

Важной задачей настоящего времени является создание АЭС большой мощности, конкурентоспособной на мировом рынке энергетической продукции. Создание надежного, безотказно работающего парогенератора — одно из главных направлений при решении этой задачи.

Основные требования, предъявляемые к проектированию нового парогенератора, таковы:

- при разработке должен быть использован эволюционный принцип развития с максимальным использованием положительного опыта;

- схема парогенератора и конструкция его элементов должны обеспечивать необходимую производительность и параметры пара при всех режимах работы АЭС;

- все элементы парогенератора должны обладать надежностью и безопасностью в эксплуатации;

- возможность возникновения коррозионных процессов должна быть исключена или существенно снижена;

- конструкция должна быть проста, удобна в монтаже и эксплуатации, время и дозозатраты на обслуживание и ремонт должны быть минимизированы;

- габариты должны обеспечивать возможность размещения в защитной оболочке заданных размеров;

- должны быть решены вопросы транспортировки при изготовлении и к месту монтажа на АЭС;

- должны быть устранены или нейтрализованы недостатки, имевшиеся в парогенераторах АЭС с ВВЭР-440, -1000.

Вопрос, который необходимо было решить на первом этапе проектирования ВВЭР-1500, состоял в выборе типа парогенератора — вертикального или горизонтального. Вертикальные, применяемые на АЭС с PWR, безусловно, имеют свои достоинства и недостатки [1]. Не останавливаясь на подробном сравнении двух типов парогенераторов, напомним основные преимущества горизонтальных: