

СТАТЬИ

УДК 621.039.5

ТВС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ НА КРУПНОМАСШТАБНЫХ СТЕНДАХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ВВЭР-1000

*Болтенко Э.А., Григорян В.С., Кирич Н.Н., Сергеев С.И., Тимофеев И.Л.
(ЭНИЦ ВНИИАЭС)*

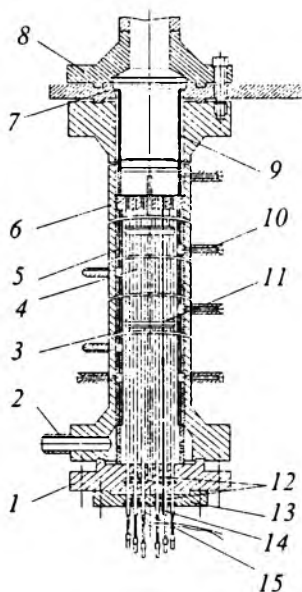
Развитие ядерной энергетики возможно при выполнении основного условия — безопасность АЭС должна отвечать жестким современным требованиям. Характеристикой этого уровня служит расчетное доказательство безопасности АЭС с помощью теплогидравлических системных кодов улучшенной оценки, верифицированных на экспериментальных данных. Данные для верификации кодов могут быть получены как на действующих АЭС, так и на специальных экспериментальных установках. Данные, полученные на действующих АЭС, как правило, относятся к стационарному режиму, не выходящему за рамки регламента, и не дают информацию, обеспечивающую полноценную верификацию кодов. В связи с этим для получения данных, пригодных для верификации кодов, используют экспериментальные установки двух типов — фрагментные и интегральные. Первые моделируют компоненты циркуляционного контура АЭС или их узлы и предназначены для верификации отдельных модулей кода и построения физически обоснованных методов расчета отдельных явлений, вторые — циркуляционный контур АЭС с основными узлами и предназначены для исследования поведения контура в переходных и аварийных режимах.

ЭНИЦ располагает двумя интегральными установками, позволяющими получать данные для верификации кодов применительно к ВВЭР [1]: ИСБ и ПСБ с объемно-мощностным масштабом 1:3000, 1:300 и высотным масштабом 1:1 соответственно.

При исследовании аварийных режимов на интегральных стендах одной из основных задач является определение температурных режимов ТВС при различных режимах работы реактора. Эта задача решается с помощью ТВС, в которых твэлы моделируются с помощью электрообогреваемых имитаторов.

Модели ТВС. Активная зона ВВЭР-1000 состоит из 163 бесчехловых ТВС. В поперечном сечении сборка имеет форму шестигранника и состоит из 312 твэлов и 19 цилиндрических элементов, используемых для размещения регулируемых стержней и других целей. По высоте твэлы фиксируются с помощью 15 унифицированных дистанционирующих решеток.

На рис. 1 показан вертикальный разрез рабочего участка, представляющего собой модель активной зоны с ТВС с объемно-мощностным масштабом 1:300. ТВС имеет 168 обогреваемых стержней, в качестве которых используются имитаторы



Р и с. 1. Вертикальный разрез ТВС: 1, 8 — нижний и верхний фланец соответственно; 2 — патрубок подвода теплоносителя; 3 — корпус ТВС; 4 — пучок имитаторов твэлов; 5 — вытеснитель; 6 — промежуточная токоподводящая решетка; 7 — верхний токоподвод; 9 — соединительные токоподводы; 10 — штуцер отбора давления; 11 — дистанционирующая решетка; 12 — резиновые уплотнения; 13 — крышка охлаждения уплотнений; 14, 15 — нетермометрированный и термометрированный имитатор твэлов соответственно

твэлов с косвенным нагревом. Мощность ТВС 1,5 МВт, мощность имитатора соответствует мощности твэла на уровне остаточного тепловыделения.

Для надежной работы в условиях высокого давления и температуры ($P_{ном} = 16$ МПа и температура теплоносителя на входе в корпус $t_{вх} = 290$ °С) конструкция ТВС и имитаторы твэлов должны удовлетворять следующим требованиям:

имитатор твэла должен обеспечивать требуемую по условиям опыта плотность теплового потока;

имитатор твэла должен обеспечивать надежную электроизоляцию между наружной оболочкой и нагревательным элементом;

внутреннее пространство ТВС должно быть герметичным;

нижняя часть имитаторов и токоподводов, выходящих из фланцевого соединения, должны быть охлаждаемыми;

имитаторы должны иметь термокомпенсацию.

Для выполнения этих требований ТВС содержит следующие основные элементы: корпус и внутрикорпусные устройства, узлы компенсации термических расширений имитаторов и охлаждения имитаторов, выходящих из фланцевого соединения.

Корпус и внутрикорпусные устройства. Корпус служит для размещения имитаторов твэлов и поддержания требуемых режимных параметров (давления, температуры). Так как при проведении экспериментов давление теплоносителя относительно высокое, он выполнен прочным и герметичным. Теплоноситель подается в корпус через патрубок подвода. Корпус герметизируется с помощью фланцевых соединений. Имитаторы твэлов размещены в корпусе и закреплены в промежуточной токоподводящей решетке, которая, в свою очередь, с помощью гибких соединительных токоподводов фиксирована в верхнем токоподводе. Промежуточный токоподвод и имитаторы твэлов соединены гибкими электропроводными связями. Нижние части имитаторов выведены через нижний фланец и подсоединены к источнику питания (на рисунке не показан). Имитаторы фиксируются с помощью дистанционирующих решеток. Верхний токоподвод через передающие шины подключен к источнику питания. Использованы имитаторы твэлов с косвенным нагревом, разработанные и изготовленные ОАО «Машиностроительный завод» [2].

Герметичность внутреннего пространства ТВС и перемещение имитаторов за счет их нагрева в конструкции ТВС с имитаторами твэлов на уровне остаточного тепловыделения достигаются с помощью резиновых уплотнений.

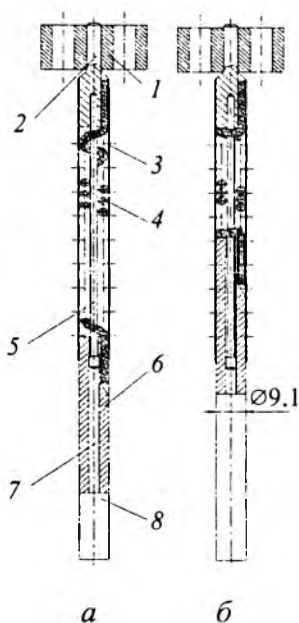
Узел компенсации термических расширений. В процессе проведения исследований температура имитаторов твэлов может изменяться в течение короткого

промежутка времени в широких пределах (50—900 °С). Для компенсации термических расширений имитаторов необходимо обеспечить их перемещение. В конструкции ТВС, показанной на рис. 1, имитаторы при их нагреве и (или) охлаждении перемещаются через резиновые уплотнения. В этом случае при превышении их температуры относительно корпуса они движутся вниз (в реакторе движение твэлов при нагреве происходит вверх). В верхней части имитаторы твэлов жестко закреплены с помощью сварки в промежуточной токоподводящей решетке. При движении имитаторов через резиновые уплотнения возможно заклинивание, обусловленное как изменением наружного диаметра имитаторов и диаметра канавок, в которые установлены резиновые кольца, в процессе работы, так и неточным изготовлением канавок. Заклинивание имитаторов может привести к разгерметизации и выходу из строя ТВС. Ресурс ТВС мощностью 1,5 МВт составил более 1300 ч работы [3], которая включала как номинальные режимы ($P = 16$ МПа, $N = 1,5$ МВт, $t_{вх} = 290$ °С), так и режимы сброса нагрузки и частичного (полного) запаривания сборки без и с последующим разогревом. При проведении исследований максимальная температура имитаторов твэлов достигала 960 °С. Выход из строя ТВС произошел из-за разрушения отдельных имитаторов. Основная причина, приведшая к разрушению отдельных имитаторов и выходу из строя ТВС, — потеря устойчивости оболочек имитаторов твэлов.

Одна из причин, приведших к потере устойчивости оболочек имитаторов, — отсутствие свободного перемещения имитаторов относительно резиновых уплотнений. Для устранения этого недостатка во вновь создаваемой ТВС мощностью 10 МВт с имитаторами твэлов мощностью, равной номинальной мощности твэла, конструкция узла термоперемещения имитаторов изменена. В модернизированном узле термоперемещения имитаторов твэлов решены две задачи. Во-первых, облегчена работа узла герметизации (резиновые уплотнения) — устранено перемещение имитаторов в резиновых уплотнениях, во-вторых, термоперемещение имитаторов стало аналогичным тому, которое имеет место в реакторе.

Известны конструкции ТВС, обеспечивающие термоперемещение имитаторов вверх. При этом имитаторы твэлов подключены к токоподводу с помощью гибких электропроводных связей [4, 5].

Основной недостаток известной конструкции [4] заключается в том, что при работе ТВС в условиях термоциклирования имитаторов гибкая электропроводная связь нарушает условия их обтекания. Это связано с тем, что при перемещении имитаторов гибкая связь хаотично сжимается, занимает произвольное положение и нарушается условие идентичности обтекания имитаторов потоком теплоносителя в верхней части сборки. В ТВС [5] для сохранения условий обтекания имитаторов при термоперемещении гибкие электропроводные связи помещены в защитную оболочку. В этом случае при перемещении имитаторов гибкая связь сжимается хаотично, но не выходит за пределы оболочки. Основной недостаток такой конструкции заключается в том, что наружный диаметр оболочки ограничен. В связи с этим поперечное сечение гибких связей также ограничено и определяется условиями свободного хода гибкой связи при термоперемещении имитаторов. Поперечное сечение гибкой связи определяет максимальный ток (при известных условиях



Р и с. 2. Элементы ТВС с верхней разгрузкой в разжатом (а) и сжатом состоянии (б): 1 — верхний токоподвод; 2, 6 — верхний и нижний переходник соответственно; 3 — защитная оболочка; 4 — гибкие электропроводные связи; 5 — установочный штырь; 7 — глухое отверстие; 8 — имитатор

охлаждения), который можно пропустить через гибкую связь, и соответственно мощность имитатора. Следовательно, при такой конструкции гибкой связи мощность ТВС ограничена.

На рис. 2 представлена конструкция узла перемещения, в котором термоперемещение имитаторов осуществляется вверх [6]. В этой конструкции исключается перемещение имитаторов в кольцевых резиновых уплотнениях при их тепловом расширении и не нарушается геометрическая форма пучка в его верхней части. Повышение мощности ТВС при сохранении условий обтекания обеспечивается тем, что гибкие электропроводные связи жестко закреплены с помощью пайки в верхних переходниках, которые, в свою очередь, жестко закреплены в промежуточном токоподводе с помощью сварки. В верхних переходниках также жестко закреплены установочные штыри. На установочные штыри навиты гибкие электропроводные связи. С нижней и верхней сторон они жестко закреплены в нижнем и верхнем переходниках. Верхний переходник жестко закреплен в промежуточном токоподводе, нижний жестко подсоединен к имитатору и является его неотъемлемой частью.

Имитаторы твэлов в верхней части снабжены глухими отверстиями (в данном случае отверстия выполнены в переходниках), которые служат для подвижного соединения имитаторов с промежуточным токоподводом.

При повышении температуры имитатор перемещается вверх относительно корпуса (низ жестко закреплен),

при этом уменьшая расстояние между витками. В начальном положении имитаторы установлены таким образом, чтобы расстояние между витками было максимально. Для увеличения тока, пропускаемого через гибкую электропроводную связь, навивка гибких электропроводных связей на установочные штыри может быть выполнена многозаходной.

Узел охлаждения имитаторов твэлов. Как видно из рис. 1, нижняя часть имитаторов находится вне корпуса, где и подсоединяется к источнику питания. Несмотря на то, что нагревательный элемент имитатора в нижней части выполнен из меди, в нем за счет прохождения тока выделяется тепло, которое необходимо отводить. В ТВС небольшой мощности тепло от нижней части имитаторов отводится путем подачи охлаждающего вещества на нижнюю часть имитаторов и токоподводов. В качестве охлаждающего вещества, как правило, используется воздух, подаваемый от вентилятора. Такой метод использован при охлаждении нижних токоподводов ТВС мощностью 1,5 МВт.

Недостаток такого способа охлаждения заключается в его малой эффективности. Последнее обусловлено низким коэффициентом теплоотдачи от имитатора к воздуху и соответственно малым количеством тепла, отводимого от имитаторов.

Расчеты показывают, что в ТВС мощностью 10 МВт воздушное охлаждение не отводит тепло, выделяемое в нижней части имитаторов.

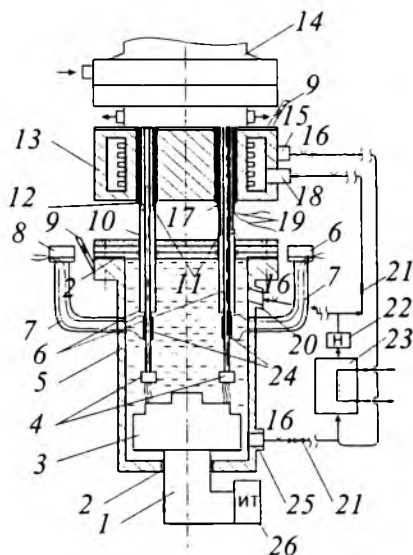
Известен способ охлаждения имитаторов твэлов, при котором для отвода тепла от имитатора охлаждающую жидкость подают в герметичную полость, выполненную в нижней части токоподводов имитаторов [7]. При подаче воды в полость имитатора возможно ее взаимодействие с электроизолятором (периклазом). Попадание жидкости в имитатор и взаимодействие с электроизолятором приводят к уменьшению электросопротивления, замыканию на оболочку и выходу имитатора из строя. Кроме того, отвод и подвод воды в каждый имитатор конструктивно сложен. В нашем случае, когда число имитаторов в ТВС велико (168 шт.), шаг между ними мал (12,75 мм), такой способ охлаждения не реализуем.

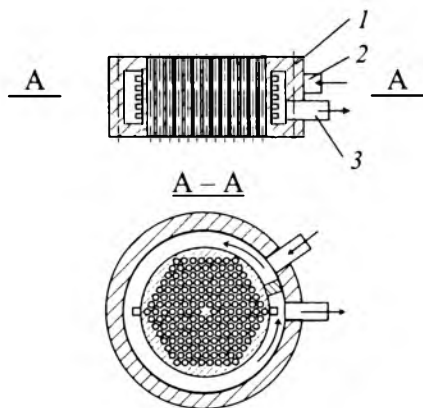
Для отвода выделяемого тепла в имитаторах, находящихся на воздухе (нижняя часть имитаторов, см. рис. 1) в ТВС мощностью 10 МВт, предложенная система охлаждения показана на рис. 3 [8]. В систему охлаждения входит устройство для отвода тепла, выделяемого на участке от выхода имитаторов из фланцевого соединения до торца имитаторов (выход термопар и сечения имитатора, где заканчивается электроизоляция). На этом участке ТВС тепло отводится путем его передачи теплопроводностью от имитаторов твэлов к высокотеплопроводному блоку, от него путем подачи охлаждающего вещества в полость, размещенную по периметру высокотеплопроводного блока. Устройство для охлаждения нижней части имитаторов включает блок из высокотеплопроводного материала (медь, алюминий), в котором выполнены отверстия для прохода 168 имитаторов (рис. 4). По периферии блока выполнена герметичная кольцевая щель высотой 60 мм, по которой циркулирует охлаждающая вода. Максимальная температура на поверхности высокотеплопроводного блока $T_{\text{макс}}$ определяется соотношением

$$T_{\text{макс}} = T_{\text{охл}} + \Delta T_{\text{в}} + \Delta T_{\text{ст}},$$

где $T_{\text{охл}}$ — температура охлаждающей воды; $\Delta T_{\text{в}}$ — перепад температуры в воздушном зазоре (наружная выпуклая поверхность имитатора и внутренняя вогнутая поверхность отверстия для прохода имитатора); $\Delta T_{\text{ст}}$ — перепад температуры между

Р и с. 3. Схема охлаждения нижней части ТВС с имитаторами твэлов: 1 — токоподвод; 2 — изолирующие прокладки; 3 — общий токоподвод; 4 — узел для подсоединения гибких токоподводов; 5 — устройство для охлаждения нижней части токоподводов; 6 — медные втулки; 7 — потенциальные выводы; 8 — герметичный разъем для потенциальных выводов; 9 — «воздушник»; 10, 17 — токоподводы бестермопарных (138 шт.) и термопарных имитаторов (30 шт.) соответственно; 11 — керамические втулки; 12 — разрезная втулка; 13 — устройство для охлаждения нижней части имитаторов (высокотеплопроводный блок); 14 — корпус рабочего участка; 15, 18 — выходной и входной патрубков устройства для охлаждения нижней части имитаторов соответственно; 16 — термопары; 19 — термопары имитаторов; 20, 25 — входной и выходной патрубков устройства для охлаждения нижней части токоподводов соответственно; 21 — регулирующий вентиль; 22 — циркуляционный насос; 23 — теплообменник; 24 — изолирующие втулки; 26 — источник тока





Р и с. 4. Высокотеплопроводный блок системы охлаждения: 1 — корпус; 2, 3 — входной и выходной патрубков соответственно

предусмотрена также электроизоляция и герметизация общего токоподвода. Корпус устройства обеспечивает циркуляцию воды по внутреннему объему. Входные элементы сформированы таким образом, чтобы струи воды достигали нижней поверхности фланца, через который проходят имитаторы, отражались от него и шли вниз.

Участок ТВС от выхода имитаторов из высокотеплопроводного блока до входа токоподводов в герметичный корпус (см. рис. 3) охлаждается за счет передачи тепла теплопроводностью по внутренним электродам и оболочкам имитаторов к нижней и верхней частям системы охлаждения.

В настоящее время ТВС мощностью 10 МВт с имитаторами на уровне номинальной мощности твэлов готовится к вводу в эксплуатацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елкин И.В., Липатов И.А., Дремин Г.И. и др. Интегральная установка ПСБ-ВВЭР: Обзор экспериментальных исследований. Годовой отчет ЭНИЦ, 1998, с. 15—18.
2. Бабенко Ю.Н., Болтенко Э.А., Зевалкин С.В. и др. Разработка имитаторов твэл для ТВС интегральной установки ПСБ-ВВЭР. Годовой отчет ЭНИЦ, 2000, с. 43—45.
3. Гашенко М.П., Липатов И.А., Елкин И.В. и др. Экспериментальные исследования на интегральных стендах (ИСБ-ВВЭР и ПСБ-ВВЭР), обеспечивающие верификацию теплогидравлических кодов. — Теплоэнергетика, 2002, № 11, с. 49—55.
4. Болтенко Э.А., Пометько Р.С., Песков О.Л. Кризис теплоотдачи в стержневой сборке при отсутствии циркуляции воды: Препринт ФЭИ-1464, 1983. 12 с.
5. Болтенко Э.А., Зевалкин С.В., Романов Н.А. и др. Тепловыделяющая сборка. В 20011220931/06 RU 7 G21 C 17/06. Заявл. 09.08.2001. — Изобретения. Полезные модели, 2003, № 11, с. 23.
6. Majed M., Norback G., Wiman P. Experience using Individually Supplied Heater Rods in Critical Power Testing of Advanced BWR Fuel. NURETH-7, 1995, p. 155—160.
7. Болтенко Э.А., Зевалкин С.В. Способ охлаждения тепловыделяющей сборки с имитаторами твэл и устройство для его осуществления. Патент России 2193244 МКИ³G 21C15/00, 15/06. Заявка № 2001114397 от 30.05.2001. — Открытия. Изобретения, 2002, № 32, с. 35.
8. Болтенко Э.А., Пометько Р.С. Исследование кризиса теплообмена на модели альтернативного топлива для ВВЭР-1000: Препринт ФЭИ-2774, 1999. 42 с.