

фигурации рабочих поверхностей трения, исключившая процессы образования следов эрозионного размыва рабочих поверхностей трения. Дальнейшие испытания в течение 2070 ч при номинальном давлении и температуре перекачиваемой среды каких-либо дефектов в конструкции подшипника не выявили.

После изготовления опытного агрегата ГЦН-1391, предназначенного для установки в составе ВВЭР-1000, испытания конструкции радиально-осевого подшипника на водяной смазке были продолжены в составе этого насоса в течение более 1000 ч. По ходу испытаний проведены пуски и остановки при номинальных параметрах перекачиваемой среды, проверена работа в переходных режимах, при регламентированных перерывах в подаче охлаждающей воды в течение 3 мин согласно требованиям технических условий. После достижения ресурса ~ 1000 ч испытания были приостановлены.

Для экономии средств дальнейшие испытания проводили в течение 4500 ч без рабочего колеса и маховика с имитацией номинального уровня осевой нагрузки на подшипник давлением уплотняемого контура перекачиваемой среды. После первых 1500 ч испытаний электродвигатель, подшипники которого работали на масляной смазке, заменили на электродвигатель с подшипниками на водяной смазке, причем конструкция осевого подшипника аналогична конструкции подшипника насоса. Таким образом, в течение последних 3000 ч испытывали электронасосный агрегат без использования масла в качестве смазочной жидкости. В процессе ресурсных испытаний проведены плановые ревизии. Замечаний о состоянии рабочих поверхностей подшипников, работающих на водяной смазке, не зафиксировано. Износов по рабочим поверхностям трения не обнаружено.

Из сравнения состояния рабочих поверхностей подшипника после наработки 5500 ч с состоянием рабочих поверхностей пары трения уплотнений после аналогичных периодов наработки с учетом многолетней работы в составе блоков уплотнения серийных электронасосных агрегатов следует прогнозировать надежную работу элементов пары трения высоконагруженных осевых подшипников в течение не менее 30 тыс. ч. Это свидетельствует о создании и возможности установки в составе ВВЭР-1000 электронасосных агрегатов на водяной смазке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чехович В.С., Федоров Г.П., Снетков В.Г. и др. Упорный подшипниковый узел скольжения. А.с. № 1745004 от 1 марта 1992 г.
2. Chekhovich V.S., Mukhailov A.D., Pautov Y.M. Operating reliability evaluation of the reactor coolant pumps and a course of updating as a constituent in improving the NPP reliability and safety as a whole. — In: The 3 RD JSME/ASME Joint Intern. Conf. on Nuclear Engineering, April 23—27, 1995, Kyoto.

Поступило 28.04.99

В окончательной редакции 16.11.2000

УДК 621.039.534.25

ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛИ ДЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТВЭЛОВ

*Смолин В.Н., Шишов В.П., Емельянов А.И., Саввин С.Ю. (НИКИЭТ),
Балашов С.М. (Центр ЭЛНАТР)*

Трубчатые электронагреватели широко применяют как для научных исследований в области реакторной теплофизики, так и в оборудовании АЭС. Твэл часто моделируют имитатором — электронагревателем, оснащенным термопарами и имеющим близкие к твэлу характеристики: температуру оболочки, мощность, распределение теплового потока и др. В отличие от трубок прямого нагрева имитатор не имеет потенциала на оболочке, что дает возможность его использования в токопроводящих средах. Такие имитаторы используют в исследованиях с жидкометаллическими теплоносителями, материаловедческих опытах, при изучении тяжелых аварий и также на стендах при изучении теплогидравлики и аварийных режимов реакторов с водяным теплоносителем. На больших стендах их число может достигать до 2000. Известны эксперименты, когда электронагреватели работают в канале исследовательского реактора при номинальных параметрах, моделируя тепловыделение ядерного топлива в твэльных трубках из сплава циркония.

Выпускаемые нагреватели общепромышленного назначения с электроизолятором в виде порошка периклаза (MgO) при большом ресурсе имеют невысокие характеристики ($T_{\text{max}}^{\text{об}} = 700^\circ\text{C}$, $q_{\text{max}} = 0,15 \text{ МВт/м}^2$). Применение новой технологии и материалов, таких, как нитрид бора, позволило достичь высоких результатов, например, тепловых потоков $\sim 3\text{—}5 \text{ МВт/м}^2$. Улучшить характеристики нагревателей можно и посредством применения наряду с традиционной спиралью в качестве нагревательных элементов стержней, трубок, параллельных прутков и др.

Многолетний опыт таких разработок подтвердил эффективность их применения и хорошие характеристики в исследованиях ухудшенного теплообмена, повторного залива, теплогидравлической устойчивости в параллельных каналах, кризиса теплообмена. В экспериментах использовали имитаторы твэлов РБМК с оболочкой из нержавеющей стали и сплава $Zr-1\%Nb$ длиной до 7 м [1].

Накоплен большой опыт изготовления и монтажа моделей ТВС и технологических каналов, подтверждена работоспособность имитаторов. При верхнем заливе от системы аварийного расхолаживания реактора показаны необходимость соблюдения на модели геометрии не только самой ТВС, но и элементов подвески, а также влияние на характер распределения теплоносителя по сечению технологического канала теплового потока от графитовой кладки [2].

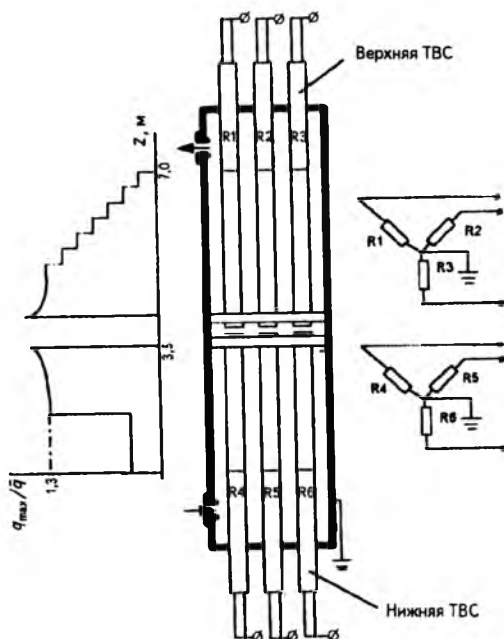
Как показали результаты опытов, патронные трубчатые электронагреватели удобны в экспериментах. Они представляют собой трубку, внутри которой расположен нагревательный элемент, оба токоподвода расположены с одной стороны, на другой стороне торец трубки имеет герметично заваренное доньшко. Применительно к ВВЭР-1000 разработаны патронные имитаторы диаметром 9,1 мм, длиной 3,53 м, $T_{\max}^{0.6} = 1000^\circ\text{C}$ для исследований при остаточном энерговыделении 2,3 кВт/м, а также при номинальной нагрузке 16 кВт/м. К электронагревателям патронного типа относится и имитатор поглощающего элемента СУЗ диаметром 9,6 мм [3]. Опыт применения этих конструкций полезен для экспериментов применительно к реакторам следующего поколения, например, ВК-300, имеющего твэл диаметром 9,1 мм и максимальную мощность 45 кВт.

В связи с совершенствованием ТВС РБМК [4] в НИКИЭТе создана трехстержневая модель из имитаторов твэлов с трехфазными источниками электропитания (рис. 1). Такая компоновка позволила провести исследования влияния всплеска теплового потока, наблюдаемого в месте стыковки нижней и верхней частей ТВС РБМК, на кризис теплообмена. Опыты при номинальных нагрузках показали, что локальные всплески мощности не влияют на место возникновения кризиса теплообмена. Такая схема удобна для изучения влияния формы профилей энерговыделения, которые можно изменять в ходе эксперимента при переходных процессах.

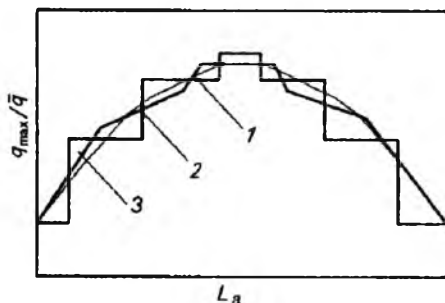
В связи с сооружением в ЭНИЦ (г. Электрогорск) крупномасштабных стенов безопасности РБМК и МКЭР актуальна разработка имитаторов со стержневым нагревательным элементом мощностью 250 кВт, длиной 7 и 6 м. Тепловые потоки составляют 1—1,3 МВт/м². Опыт испытаний имитаторов ВВЭР при 1—1,4 МВт/м², расчеты температурного поля показали, что такая конструкция реализуема. Разработано новое решение: вместо обычного моделирования косинусоидального профиля ступенчатой функции предложено более плавное описание профиля ломаной линейной функцией (рис. 2), при котором распределение электрического сопротивления по длине достигается без изменения диаметра нагревательного элемента, что важно для сохранения приемлемой температуры нагревательного элемента в максимуме нагрузки, поскольку чем выше температура нагревательного элемента, тем меньше срок службы.

Ресурс определяют деформации и термические напряжения, возникающие в результате разницы в термическом расширении оболочки и нагревателя [5]. Термические расширения зависят от теплопроводности электроизолятора, которую можно изменять плотностью материала изоляции. Увеличить теплопроводность электроизолятора можно использованием смесей MgO , BN , BeO , SiO_2 . В конструкции электронагревателя, разработанного для исследования солеотложений из морской воды (рис. 3), при использовании смеси MgO и BN теплопроводность была увеличена до 9 Вт/(м·град), что в 3 раза выше, чем у периклаза [6]. При нагрузке 34 кВт/м и температуре оболочки 150°C температура спирали составила всего 520°C , что примерно на 500°C ниже максимальной рабочей температуры для нихромовой проволоки диаметром 1,6 мм. Нагреватели проработали без отказов в течение нескольких сот часов в условиях γ -излучения. Ресурс имитаторов ниже, чем нагревателей общепромышленного назначения, но для научных исследований такого ресурса достаточно.

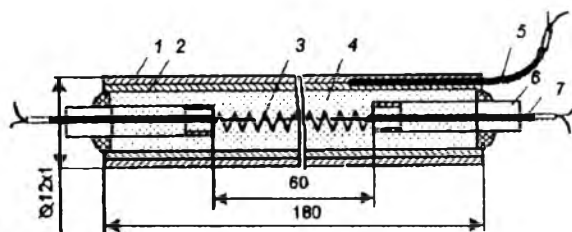
Патронные имитаторы диаметром 13,6 мм, длиной 3,43 м и мощностью 100 кВт удобны в экспериментах на пучке РБМК. При наличии нескольких источников питания можно изменять мощность отдельных нагревателей для изучения межтвэльного перемешивания потока теплоносителя. Помещенные в твэльные трубы с зазором, заполненным инертным газом, они позволяют моделировать тепловые харак-



Р и с. 1. Модель технологического канала РБМК



Р и с. 2. Профиль тепловыделения: 1 — косинусоидальный; 2 — ступенчатая функция; 3 — ломаная линейная функция



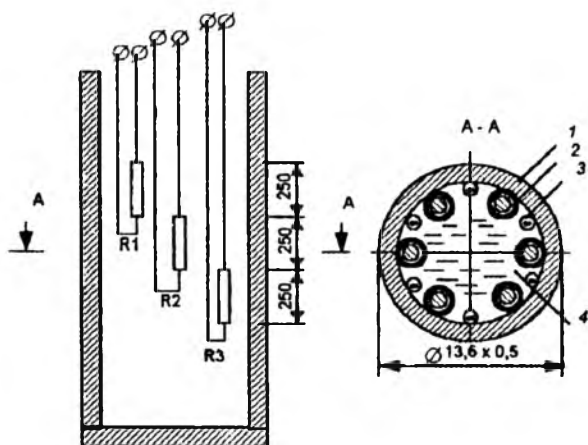
Р и с. 3. Конструкция нагревателя для исследования солеотложений из морской воды: 1 — внешняя титановая оболочка; 2 — внутренняя оболочка из стали 12Х18Н10Т; 3 — спираль из нихрома марки Х20Н80-Н; 4 — смесь MgO и BN; 5, 7 — хромель-алюмелевая термопара КТМС диаметром 0,5 мм (3 шт.) и 1 мм (2 шт.) соответственно; 6 — медный токоподвод

теристики твэла толщиной оболочки, профилем тепловыделения по высоте, аккумулированным теплом и постоянной времени твэла в таких процессах, как повторный залив. При заполнении зазора между нагревателем и твэльной трубой жидким металлом можно повысить мощность до номинальных значений.

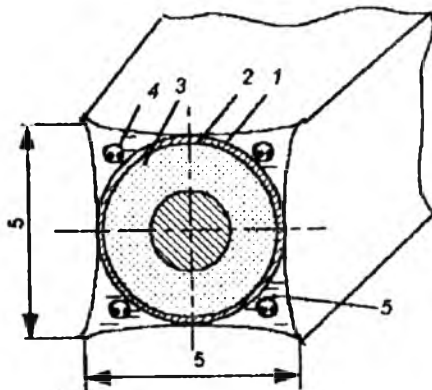
Одна из задач, требующая экспериментальной проверки, возникает при загрузке свежей ТВС в реактор МКЭР, когда есть опасность возникновения запаривания твэлов при слабой естественной циркуляции в технологическом канале. Для моделирования загрузки нужно обеспечить постепенный ввод мощности в модель технологического канала. Для этой цели разработана конструкция нагревателя, в котором размещены три секции нагрева с подключением каждой из них к своему источнику питания (рис. 4). Последовательным включением секций моделируется загрузка ТВС в активную зону. На рис. 5 показано поперечное сечение имитатора в форме квадрата размером 5×5 мм, имеющего винтовую закрутку оболочки вдоль оси. В качестве нагревателя в зависимости от источника питания используется нихромовая проволока или нихромовая и танталовая лента.

Использование на разных стендах нагревателей в виде стержня (трубки) подтвердило их высокие характеристики и ресурс. Так, нагреватели диаметром 13,2 мм, длиной 4 и 6 м проработали на стенде ВТИ в жидком олове при 660 °С и тепловом потоке 250 кВт/м² в течение нескольких лет, что позволило провести несколько экспериментов по исследованию кризиса теплоотдачи при неравномерном нагреве по периметру трубок [7]. Другой пример — применение U-образных нагревателей диаметром 13,2 мм, длиной 6 м в 7-стержневом пучке мощностью 680 кВт при давлении теплоносителя 16 МПа и температуре 300 °С для моделирования тепловыделения в активной зоне в первой серии опытов на полномасштабном стенде безопасности ВВЭР [8]. Один такой нагреватель мощностью 90 кВт способен заменить блок из девяти, предназначенный для компенсатора давления ВВЭР-1000.

Таким образом, можно прогнозировать дальнейшее совершенствование подобных нагревателей.



Р и с. 4. Имитатор твэла с тремя секциями нагрева и его поперечное сечение: 1 — оболочка; 2 — нагреватель; 3 — термопара; 4 — жидкий металл



Р и с. 5. Поперечное сечение имитатора с винтовой закруткой оболочки: 1 — оболочка из нержавеющей стали; 2 — оболочка нагревателя из нержавеющей стали; 3 — изолятор — MgO или BN; 4 — термопара; 5 — жидкий металл

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балашов С.М., Павлов А.М., Емельянов А.И., Назаров В.С. Разработка имитаторов твэлов РБМК и АСТ. — Атомная энергия, 1993, т. 74, вып. 2, с. 104—108.
2. Смолин В.Н., Балашов С.М. Опыт разработки и применения имитаторов твэлов при проведении теплофизических исследований. — В кн: Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР, Обнинск, 1995, т. 1, с. 372—380.
3. Балашов С.М., Виденев Е.Н., Емельянов А.И. и др. Разработка имитаторов твэлов ядерных реакторов с водяным теплоносителем. — Теплоэнергетика, 1995, № 1, с. 52—55.
4. Межуев В.А., Бек Е.Г., Иванов А.В., Колосовский В.Г. Некоторые аспекты конструирования и технологии изготовления ТВС энергетических реакторов с увеличенным ресурсом и повышенной надежностью. — Атомная энергия, 1998, т. 84, вып. 2, с. 123—125.
5. Тахакаси Е. Срок службы нагревателей предварительного подогрева для быстрых реакторов-размножителей. — ВЦП, пер. 2241/80, № Б-9199, с. 40.
6. Альтгаузен А.П., Гутман М.Б., Малышев С.А. и др. Низкотемпературный электронагрев. М.: Энергия, 1978, с. 208.
7. Коньков А.С., Шварц А.Л., Берсенев А.П. Экспериментальное определение границ ухудшенного теплообмена в экранных трубах с односторонним обогревом. — Теплоэнергетика, 1997, № 9, с. 24—28.
8. Липатов И.А. Исследование теплогидравлических процессов в первом контуре АЭС с реактором ВВЭР-1000 при аварии с течью теплоносителя на интегральном стенде ПСБ-ВВЭР. Автореф. дис. на соискание уч. степени к.т.н. М., МЭИ, 2000.

Поступило в Редакцию 26.05.2000

УДК 614.876

ЭКСПЕРТНО-РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ОБСТАНОВКИ ПРИ РАДИАЦИОННОЙ АВАРИИ И ЗАЩИТНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ НА ЗАГРЯЗНЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ

*Берчик В.П., Панишин А.А. (СКЦ Минатома России),
Евтерев Л.С., Игнатъев А.Л., Косяков С.И. (ЦФТИ МО РФ)*

В соответствии с подходом МАГАТЭ к ограничению дозовых нагрузок считается, что при аварии на ядерном и радиационно опасном объекте радиоактивный источник выходит из-под контроля и облучение населения может быть ограничено только с помощью некоторой деятельности, нарушающей его нормальный образ жизни. Эта деятельность определяется как вмешательство и предусматривает введение соответствующих защитных мер для ограничения облучения людей (укрытие, эвакуация, введение стабильного изотопа йода, отселение и др.). Практика реагирования на радиационные аварии свидетельствует, что эффективность вмешательства, особенно на ранних стадиях развития и протекания аварийных процессов, во многом зависит от точности оценки обстановки, правильности выбора защитных мер и своевременности их введения. В то же время опыт ликвидации последствий аварий показывает, что именно на начальных фазах отсутствуют исходные данные, необходимые для прогноза дозовых нагрузок и установления производных уровней вмешательства. Для обоснованной оперативной оценки ожидаемых медико-биологических последствий необходима обширная информация о типе аварии, особенностях ее протекания, количестве, дисперсном, химическом и радионуклидном составе радиоактивных веществ, выброшенных в окружающую среду, характеристиках выброса (скорость истечения, расход продуктов выброса, длительность и др.), характеристиках атмосферных условий и т.д. В момент аварии и последующего за ней короткого периода времени, критичного для принятия решений, необходимая информация может поступить только от персонала аварийного объекта. Несмотря на согласованность протоколов передачи данных, поступающая с объекта информация об аварийной ситуации зачастую носит качественный характер и ее, как правило, оказывается недостаточно для расчетов, получения надежных оценок и принятия оперативных решений на введение мер защиты. Это связано как со сложностью идентификации и регистрации параметров протекающих аварийных процессов (формирующихся физических полей), так и с трудностью обработки, анализа и интерпретации персоналом данных об обстановке. Для совершенствования системы управления безопасностью ядерных и радиационно опасных объектов в Минатоме России создан Ситуационно-кризисный центр, в задачи которого входят контроль и оперативная оценка обстановки на объектах, аварийное оповещение в системе реагирования, информационная поддержка органов управления отраслевой системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Задачей исследований по управлению в кризисных ситуациях, проводимых специалистами Минатома и Минобороны России, являлась разработка современных методов и средств информационного обеспечения процедур реагирования на радиационные аварии.