

3. Болтенков В.А., Вертепа В.И., Маслов О.В., Максимов М.В. Тенденции, проблемы и перспективы развития систем мониторинга протечек верхнего блока РУ АЭС. — Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы, 1999, № 1, с. 139—146.
4. Бредихин В.Я., Змитродан А.А. Контроль межконтурной плотности транспортной ЯЭУ с водным теплоносителем под давлением. — Атомная энергия, 2005, т. 98, вып. 3, с. 170—175.
5. Бадяев В.В., Егоров Ю.А., Складов В.П., Стегачев Г.Ф. Тритий на атомных электростанциях. — В сб.: Радиационная безопасность и защита АЭС. Вып. 5. М.: Атомиздат, 1981, с. 64—77.
6. Ленский Л.А. Физика и химия трития. М.: Энергоиздат, 1981. 113 с.
7. Беловодский Л.Ф., Гаевой В.К., Гришмановский В.И. Тритий. М.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.

Поступило в Редакцию 23.06.06

УДК 621.039.534

ОСОБЕННОСТИ АВАРИЙНОГО ТЕПЛОТВОДА В РЕАКТОРАХ СО СВИНЦОВО-ВИСМУТОВЫМ И СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

Безносков А.В., Бокова Т.А., Молодцов А.А. (Нижегородский гос. техн. ун-т)

Задача систем аварийного теплоотвода реакторов — передача тепла от поверхности оболочек твэлов активной зоны первичному теплоносителю и далее к окружающей среде (воздуху, воде). Свойства эвтектики свинец—висмут и свинца отличаются от свойств как водяного и газовых теплоносителей, так и натрия и других щелочных металлов. Температура кипения свинца—висмута (~1700 °С) и свинца (1745 °С) превышает температуру разрушения оболочек твэлов. Поэтому ухудшение теплообмена в активной зоне, охлаждаемой водой и натрием, для свинца и свинца—висмута невозможно.

Теплопроводность свинца—висмута (~15,6 Вт/(м·К) при 450 °С) и свинца (~17,1 Вт/(м·К) при 450 °С) в 10 раз и более превышает теплопроводность воды и газов при аналогичных условиях. Это способствует отводу тепла от активной зоны за счет теплопроводности. В аварийных ситуациях с ухудшением конвективного теплообмена вплоть до забивания проходных сечений активной зоны оксидами свинца и висмута, пропитанными теплоносителем, разрушения активной зоны не происходит. Это подтверждается опытом эксплуатации стенда 27/ВТ-5.

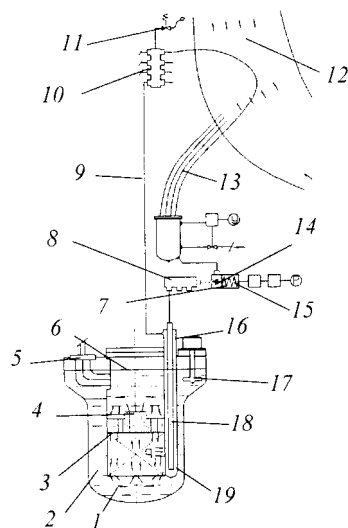
Проведены экспериментальные исследования естественной циркуляции и газлифта со свинцовым теплоносителем. В контуре с подъемным («горячим») и опускным («холодным») участками, разделенными стальной стенкой, естественная циркуляция развивается медленно и неустойчиво или не развивается совсем. Причиной этого являются теплообмен (через стенку) между зонами, стратификация теплоносителя, появление нагретых слоев в холодных зонах. При разделении зон теплоизолирующей перегородкой характеристики естественной циркуляции и процесс ее развития существенно улучшились.

Прямой контакт с водой свинцово-висмутowego и свинцового теплоносителей в отличие от щелочных металлов не является взрывопожароопасным. Это свойство позволяет использовать воду в теплообменниках расхолаживания. Особенностью таких теплообменников является возможность замерзания в них жидкого металла при снижении давления в полости охлаждаемой воды. Температура застывания эвтектики 125 °С соответствует давлению насыщения воды 0,23 МПа, температура замерзания свинца 327 °С — давлению воды около 12,4 МПа.

Незначительная теплота плавления свинца—висмута (38,8 кДж/кг) и свинца (24,7 кДж/кг) способствует намораживанию металла на поверхность теплообмена при соответствующем понижении ее температуры. При неправильных действиях персонала или аварийном разуплотнении полости теплообменника с водой при температуре насыщения будут происходить вскипание воды и интенсификация теплоотвода от жидкого металла. Экспериментальные исследования показали, что при намораживании жидкого металла на поверхность теплоотвода и последующем увеличении толщины застывшего слоя ухудшается теплообмен, уменьшается тепловой поток. При этом сохраняется расход жидкого металла через кольцевую периферийную часть поперечного сечения экспериментального участка. При больших тепловых потоках и меньшей доле теплоносителя в ячейке возможно его застывание с пол-

ным перекрытием расхода. Это произошло в парогенераторе МП-7 транспортной установки со свинцово-висмутовым теплоносителем.

Предложены три варианта схемно-конструктивных решений систем аварийного теплоотвода в реакторных контурах со свинцово-висмутовым и свинцовым теплоносителями, учитывающих специфику их свойств. Вариант I системы представлен на рис. 1. Корпус блока ядерного реактора 2 заполнен свинцово-висмутовым или свинцовым теплоносителем со свободным уровнем 6. В объеме теплоносителя находятся активная зона 1, парогенераторы 5 и насосы 17. По периметру активной зоны установлены трубки Фильда 16. Центральные каналы 18 этих трубок подключены через запорно-регулирующий клапан 7 к водяному коллектору 8, расположенному выше реактора. Теплообменные трубы 13, расположенные в воздушной шахте (трубе) 12 и охлаждаемые воздухом, соединяют водяной коллектор с верхним паровым коллектором 10, на котором установлен предохранительный клапан 11. К паровому коллектору через трубопроводы 9 подключены объемы внешних кольцевых каналов 19 трубок Фильда 6. На выходе теплоносителя из активной зоны может быть установлен блок тяговых труб с высотой центральных труб 4 равной или больше высоты периферийных труб 3.



Р и с. 1. Вариант I системы аварийного расхолаживания

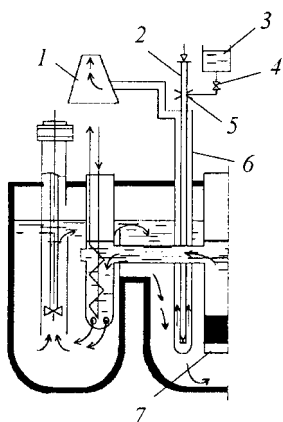
Запорно-регулирующий клапан пропускает расход воды в трубки Фильда, обеспечивающий поддержание температуры их внешней поверхности выше температуры застывания теплоносителя. Золотник 14 этого клапана сообщен с механизмом перемещения 15, полость после золотника соединена с полостью водяного коллектора.

Описанная система отводит тепло от активной зоны реактора при неработающих парогенераторах и средствах циркуляции теплоносителя. Единственным условием сохранения работоспособности такой системы со стороны реакторного контура является наличие уровня теплоносителя в реакторе выше активной зоны. Система вводится в действие переводом запорно-регулирующего клапана из состояния «закрыто» в состояние «регулятор», например, сигналами от выходных термпар реактора. Других управляющих сигналов или каких-либо управляющих воздействий на работу системы не требуется.

При переключении запорно-регулирующего клапана в режим регулятора вода из водяного коллектора поступает во внутренние каналы трубок Фильда, установленные по периметру на уровне и над активной зоной. Вода подогревается во внутренних каналах и поступает во внешние кольцевые каналы трубок Фильда. Отводя тепло от жидкометаллического теплоносителя, она испаряется и поступает в верхний паровой коллектор, откуда пар поступает в теплообменные трубы, охлаждаемые воздухом, конденсируется и стекает в нижний коллектор. Если мощность остаточного тепловыделения существенно превышает отводимую в воздушной шахте теплообменными трубами, срабатывают предохранительные клапаны. По мере уменьшения тепловыделения расход воды, поступающей в трубки Фильда, уменьшается. Изменением этого расхода поддерживается постоянное заданное давление в нижнем коллекторе и соответственно температура насыщения, превышающая температуру застывания жидкометаллического теплоносителя. При последующем выводе реактора на энергетический уровень мощности запорно-регулирующий клапан переводится в положение «закрыто».

Недостатком такой схемы является некоторое увеличение массогабаритных показателей реактора за счет введения в его объем каналов расхолаживания.

Вариант II аналогичен схеме на рис. 1, отличается тем, что тепло отводится в теплообменниках, расположенных в зоне парогенераторов. Тепло от активной зоны реактора передается жидкометаллическому теплоносителю при естественной циркуляции по основному циркуляционному контуру. Жидкий металл отдает тепло трубкам теплообменника, расположенного в верхней части блока. Теплообменник может быть выполнен с горизонтальными трубками или другой конструкции. Трубки закрепляются в трубных досках водяной и паровой камер секций теплообменника расхолаживания. Водяные камеры подключаются к запорно-регулирующему клапану, паровые камеры — к паровому коллектору системы отвода тепла, описанной в варианте I. Преимущество такой системы теплоотвода — меньшие массогабаритные характеристики реакторного блока вблизи активной зоны. Для улучшения характеристик естественной циркуляции целесообразно введение теплоизолирующего слоя между подъемным и опускным участком тракта циркуляции теплоносителя.



Р и с. 2. Вариант III системы аварийного расхолаживания

Вариант III системы представлен на рис. 2. С точки зрения требований безопасности желательно, чтобы система аварийного теплоотвода сохраняла работоспособность при возможных авариях в ней самой. Опасными в этой системе являются два возможных отказа: разуплотнение контура и снижение давления в нем до атмосферного и отказ запорно-регулирующего клапана с потерей функции поддержания давления. Температура застывания свинцово-висмутового теплоносителя позволяет иметь в пароводяном объеме рассмотренных систем расхолаживания давление 1 МПа. При снижении давления до атмосферного возможна работа системы при намораживании слоя эвтектики на поверхность теплообмена. Для свинцового теплоносителя давление в пароводяном объеме рассматриваемой системы должно превышать 10 МПа. Сложно обеспечить работоспособность такой системы в контуре со свинцовым теплоносителем при снижении давления до атмосферного в пароводяной части системы. С учетом возможных аварий в системе расхолаживания может оказаться оптимальной схема аварийного теплоотвода, представленная на рис. 2. В варианте III центральные каналы 2 трубок Фильда 6 непосредственно или через нагнетатель воздуха сообщены с атмосферой.

Трубки Фильда установлены по периметру активной зоны 7. Подъемный (выходной) канал трубки Фильда подключен к вытяжной трубе 1 непосредственно или через конденсатор и фильтр. На входе в центральный канал установлено устройство ввода капель воды в поток воздуха 5, соединенное запорно-регулирующим клапаном 4 с водяной емкостью 3. Водяная емкость может быть соединена трубопроводом с конденсатором, расположенным выше нее и установленным на линии между трубкой Фильда 6 и вытяжной трубой 1. При необходимости ввода в действие системы запорно-регулирующий клапан 4 переводится в режим регулятора, поддерживая расход воды в устройство ввода капель 5 в соответствии с мощностью остаточного тепловыделения. В качестве управляющих сигналов на этот регулятор могут использоваться сигналы от термодпар, установленных в активной зоне реактора. Тепло, выделяющееся в активной зоне, передается трубкам Фильда теплоносителем за счет естественной конвекции и теплопроводности.

Применение рассмотренных систем аварийного теплоотвода повышает безопасность реакторных установок со свинцово-висмутовым и свинцовым теплоносителями.

Поступило в Редакцию 17.07.06

УДК 621.039.531

ОЦЕНКА ТЕКСТУРЫ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИРКОНИЕВЫХ ТРУБ

Косенков В.М., Поленок В.С., Силантьев П.П. (ГНЦ РФ — НИИАР)

Повышение эксплуатационного ресурса и выгорания топлива энергетических ВВЭР и РБМК при высокой надежности по-прежнему является приоритетной задачей. Внедрение конструкторских и технологических мер в процессе совершенствования элементов активной зоны требует всесторонней проверки в отношении их целесообразности и эффективности. Сплавы на основе циркония Э110, Э125, Э635 являются основным конструкционным материалом для ТВС легководных реакторов. Из них изготавливают оболочки твэлов, направляющие каналы, центральную трубу, чехлы, уголки, дистанционирующие решетки. Анизотропия циркониевых сплавов приводит к текстурированию в процессе производства указанных изделий.

Можно выделить несколько важных эффектов в изменении геометрических параметров конструктивных элементов, поскольку радиационный рост и радиационно-термическая ползучесть существенно зависят от текстуры [1]. Иногда наблюдается большой разброс в изменении диаметра и длины твэлов, работавших даже в одной ТВС. Анализ экспериментальных данных о зависимости этого эффекта от разнообразных параметров (технологических, конструктивных, эксплуатационных) не дает подчас удовлетворительного объяснения. Имеется большая потребность в этих случаях исследовать текстуру штатных изделий после облучения. Однако до сих пор текстурные исследования оболочек облученных твэлов не проводили. Отмечаемое различие в изменении длины направляющих каналов и