

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ОХЛАЖДЕНИЯ РБМК (РЕАКТОР БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ, КАНАЛЬНЫЙ), ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РЕМОНТНЫХ РАБОТ

АННОТАЦИЯ

В докладе излагаются результаты исследования ремонтных режимов охлаждения активной зоны РБМК на стенде-модели. На основании этих исследований сформулированы технологические требования обеспечения безопасности в процессе эксплуатации при прекращении циркуляции теплоносителя и опорожнения частей КМПЦ, которые вошли в «Технологический регламент по эксплуатации блоков с реактором РБМК».

1. ВВЕДЕНИЕ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Мощность остаточного тепловыделения активной зоны РБМК после остановки реактора довольно значительна. Спустя сутки она составляет 0,4 % номинальной мощности, т.е. 12,8 МВт. Через 30 суток это значение снижается до $0,12N_{\text{ном}}$ и остается практически постоянным в течение длительного времени.

Отсюда понятно требование о недопустимости опорожнения от теплоносителя активной зоны реактора даже после его остановки. Поэтому при проведении ремонтных работ на оборудовании и трубопроводах контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) требуется организация охлаждения активной зоны реактора. Одно из основных требований, предъявляемых к системе отвода тепла в таких условиях, — обеспечение надежного охлаждения реактора и безопасного доступа к оборудованию и трубопроводам КМПЦ с целью их осмотра и ремонта.

Для обеспечения основных требований при проектировании штатных систем охлаждения реактора во время ремонтных работ необходимо было провести стендовые исследования процесса теплообмена в условиях, моделирующих состояние остановленного реактора.

2. ПРОЕКТНЫЕ РЕЖИМЫ РЕМОНТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

В процессе проектирования РБМК для обеспечения ремонтнопригодности были приняты три режима ремонтного охлаждения активной зоны (соответствующие схемы расхолаживания приведены на рис. 1):

- режим естественной циркуляции при наличии номинальных уровней воды в сепараторах и открытой арматуре КМПЦ;

- режим «разорванной» естественной циркуляции при опорожненных сепараторах и открытой арматуре КМПЦ;
- барботажный режим при наличии номинальных уровней воды в сепараторах и закрытых запорно-регулирующих клапанах (ЗРК) на входе в ТК.

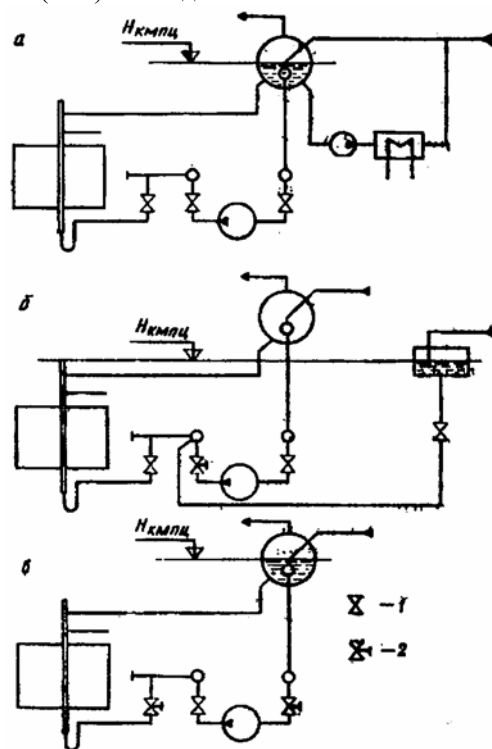


Рис. 1. Схемы расхолаживания активной зоны при ремонте КМПЦ: а – режим естественной циркуляции; б – режим разорванной естественной циркуляции; в – барботажный режим; 1 – арматура открыта; 2 – арматура закрыта; $H_{\text{КМПЦ}}$ – уровень воды в КМПЦ

Режим естественной циркуляции теплоносителя в КМПЦ организуется за счет охлаждения воды в опускном тракте контура, для чего используется штатная система продувки и расхолаживания реактора. Нагретый в активной зоне теплоноситель подается насосами расхолаживания из водяных перемычек сепараторов в доохладитель продувки, где его температура снижается за счет теплоотдачи к воде промежуточного контура. Охлажденный теплоноситель поступает в питательные трубопроводы и далее в смесители, установленные на входе в опускные трубопроводы, тем самым охлаждая опуск-

ной тракт контура. Данный режим используется для обычного расхолаживания реактора, при ремонте главных циркуляционных насосов (ГЦН), их напорных и всасывающих трубопроводов, а также для предварительного охлаждения реактора и КМПЦ перед началом ремонтных работ.

В режиме разорванной естественной циркуляции сепараторы опорожняются и сообщаются с атмосферой. Подпитка активной зоны проводится самотеком из ремонтного бака, подключенного к напорным коллекторам КМПЦ с помощью специальных трубопроводов. Напорные задвижки ГЦН могут быть закрыты, т.е. допускается опорожнение и опускного тракта КМПЦ. В режиме разорванной естественной циркуляции можно проводить ремонт сепараторов опускных трубопроводов, всасывающих коллекторов и трубопроводов ГЦН с арматурой. При этом для безопасности ремонта всасывающих коллекторов и трубопроводов ГЦН в опускные трубопроводы устанавливают специальные разжимные резинометаллические заглушки.

В барботажном режиме запорно-регулирующие клапаны на входе в ТК закрыты, уровень в сепараторах номинальный. В этом режиме возможен ремонт оборудования и трубопроводов КМПЦ на уча-

стке от всасывающей задвижки ГЦН до ЗРК. Барботажный режим охлаждения активной зоны реактора широко применяется при общей замене отработавших датчиков расходомеров и ЗРК. В последнем случае в трубопроводах водяных коммуникаций предварительно с помощью специальной системы замораживания создаются ледяные пробки.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ РЕЖИМОВ ОХЛАЖДЕНИЯ НА СТЕНДЕ-МОДЕЛИ РУ РБМК

Перед реализацией на РБМК режимы охлаждения активной зоны исследовали на стенде-модели в НИКИЭТе.

Стенд, принципиальная схема которого представлена на рис.2, моделирует КМПЦ реактора. Длина и проходные сечения трубопроводов водяных коммуникаций, зоны тепловыделения, выходной части канала, трубопроводов пароводяных коммуникаций (ПВК) стенда выбраны такими, чтобы гидравлическое сопротивление, время циркуляции и объем различных участков в пересчете на один твэл соответствовали КМПЦ реактора (рис.3).

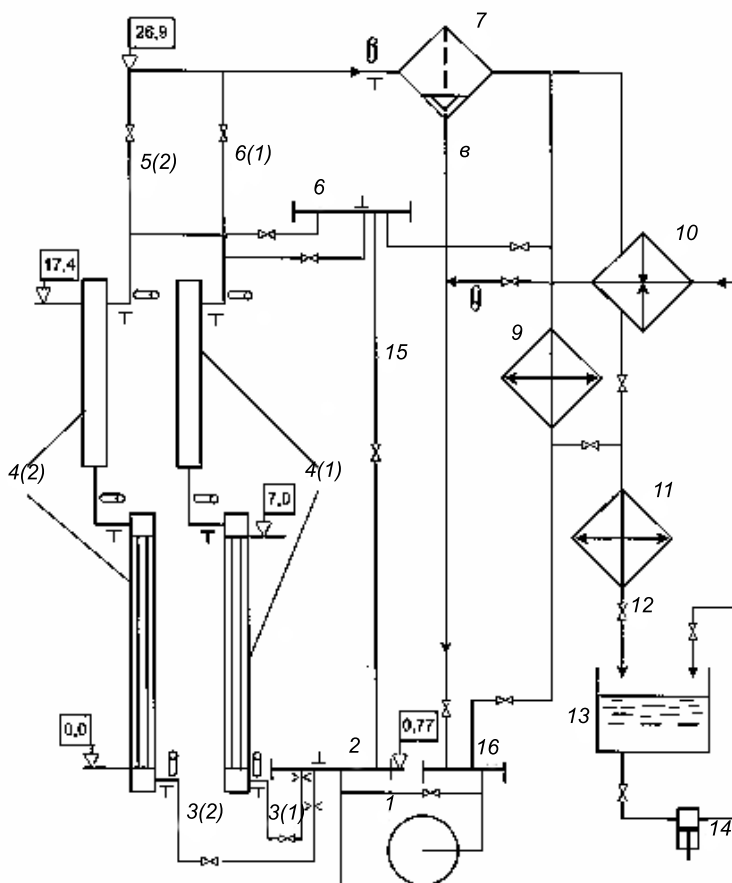


Рис. 2. Принципиальная схема стенда: 1 – циркуляционный насос; 2 – раздающий коллектор; 3 – подводящие коммуникации; 4 – экспериментальные каналы; 5 – отводящие коммуникации; 6 – сборный коллектор; 7 – сепаратор; 8 – опускная коммуникация; 9 – конденсатор; 10 – подогреватель питательной воды; 11 – холодильник; 12 – дросселирующий вентиль; 13 – бак питательной воды; 14 – питательный насос; 15 – байпасирующая коммуникация; 16 – насосный коллектор

Взаимное расположение раздающего коллектора, зоны тепловыделения, выхода канала и сепаратора стенда также были идентичны КМПЦ реактора. Зона тепловыделения экспериментального канала представляла собой пучок из семи стержней – имитаторов твэлов длиной 7 м и наружным диаметром 13,5 мм, расположенных по треугольной решетке с шагом 16 мм. Тепловыделение осуществлялось путем пропускания через стержни-имитаторы постоянного электрического тока. Принципы моделирования, использованные при сооружении стенда, позволяли надеяться на то, что будет обеспечена идентичность гидродинамических и теплофизических процессов, происходящих в гидравлических трактах экспериментального и топливного каналов.

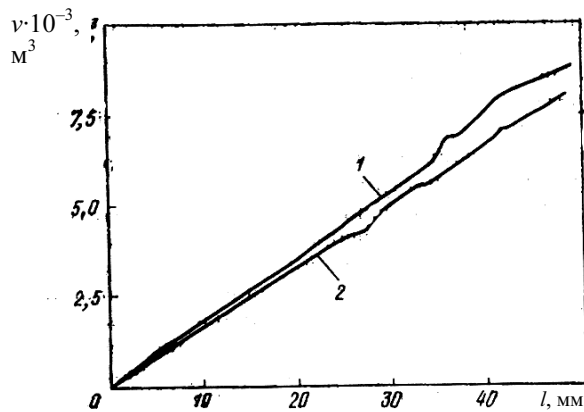


Рис. 3. Объемы гидравлических трактов в зависимости от их длины для экспериментального (1) и топливного (2) каналов, приведенные к одному твэлу

Исследования на стенде-модели показали, что в КМПЦ с сепараторами, заполненными водой до отметки номинального уровня, и открытыми ЗРК происходит обычный процесс естественной циркуляции воды, обеспечивающий надежное охлаждение зоны тепловыделения при любом давлении.

Когда при атмосферном давлении в сепараторе уровень воды опускается ниже врезки штуцеров ПВК с открытыми ЗРК, наблюдается так называемый режим разорванной естественной циркуляции, при котором не происходит барботажа образующегося в зоне выделения пара через слой воды в ПВК. В этом режиме вода периодически выбрасывается паром из верхней части канала и трубы ПВК в сепаратор и сливается в опускной тракт. Из-за возникающей разницы гидростатических напоров происходит такое же периодическое поступление воды из опускного тракта в зону тепловыделения. В этом режиме также обеспечивается надежное охлаждение каналов при компенсации сбросов пара из сепаратора подпиткой контура водой и уровне воды в КМПЦ выше горизонтального участка ПВК (рис. 4).

При снижении уровня воды в КМПЦ ниже горизонтальной части ПВК (при открытых ЗРК) картина резко менялась. В этом случае образующийся пар вытеснял воду из объемов над зоной тепловыделения в верхнюю часть канала, а затем в трубопровод ПВК. Здесь также происходил залив зоны тепловыделения водой из опускного тракта. Однако этот

процесс продолжался до тех пор, пока не заполнялся водой горизонтальный и часть вертикального трубопровода ПВК до выравнивания гидростатических напоров в опускном тракте и тракте канала. После этого пополнение зоны тепловыделения прекратилось, она запаривалась, и происходило резкое повышение температуры стержней-имитаторов (рис. 5). Это свидетельствовало о недопустимости снижения уровня воды в КМПЦ ниже горизонтального участка ПВК даже при открытом клапане на входе в канал.

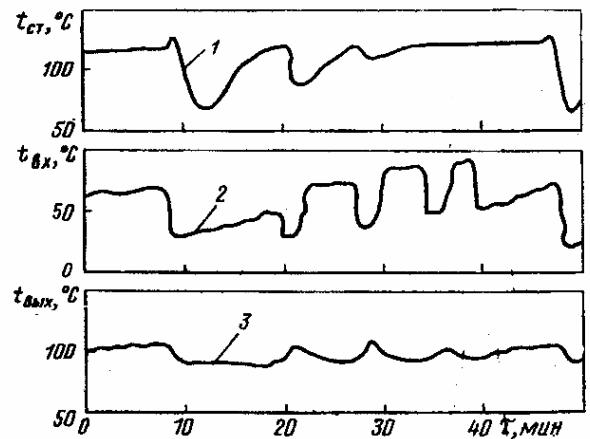


Рис. 4. Изменение во времени температуры имитатора твэла (1), теплоносителя на входе в канал (2) и на выходе из него (3) при уровне воды в КМПЦ выше горизонтального участка ПВК

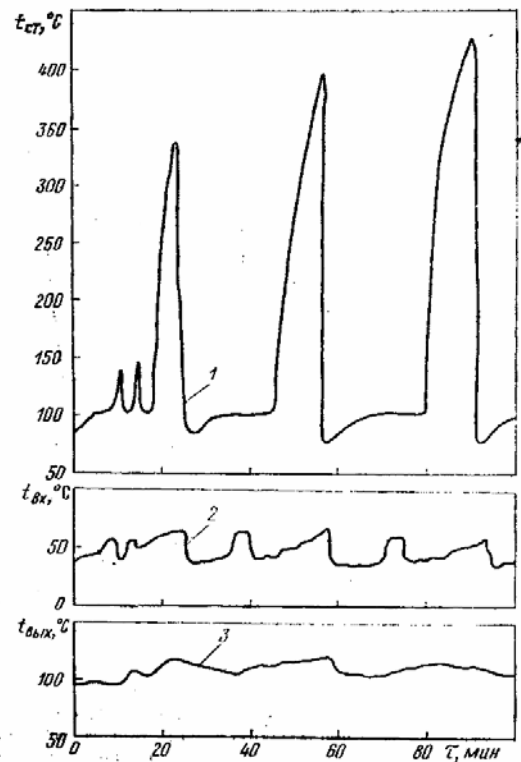


Рис. 5. Изменение во времени температуры имитатора твэла (1), теплоносителя на входе в канал (2) и на выходе из него (3) при уровне воды в КМПЦ ниже горизонтального участка ПВК

Исследование ремонтного охлаждения ТК с закрытым клапаном на входе проводилось при атмосферном давлении в сепараторе, мощности экспериментального канала, соответствующей 0,8-1,7 % мощности максимально нагруженного ТК (рис. 6). Сепаратор сообщался с атмосферой.

В результате этого исследования установлено, что надежное охлаждение твэлов осуществляется путем периодического заполнения гидравлического тракта из сепаратора. Уровень предельно допустимой мощности, установленный в результате исследования оказался равным 25 кВт в пересчете на реальный ТК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании экспериментальных исследований на стенде-модели ремонтных режимов охлаждения активной зоны РБМК были сформулированы технологические требования обеспечения безопасности в процессе эксплуатации реактора при прекращении циркуляции и опорожнении частей КМПЦ, которые вошли в «Технологический регламент по эксплуатации блоков АЭС с реактором РБМК».

1. Перевод ТК в барботажный режим, т.е. закрытие клапанов на входе, разрешается не ранее, чем через 72 часа после остановки реактора для снижения остаточной мощности до допустимого значения при выполнении следующих условий:

- наличие уровня воды в сепараторах выше врезки верхнего ряда патрубков ПВК;
- температура воды в сепараторах для исключения гидроударов в ПВК не ниже 80-90 °С;
- давление в сепараторе – атмосферное.

2. Запрещается снижение уровня воды в сепараторах ниже врезки трубопровода ПВК при наличии ТК с закрытыми клапанами на входе.

3. Во всех случаях опорожнения частей КМПЦ уровень воды не должен опускаться более, чем на 1 м ниже головок ТК, при этом необходимо обеспечить постоянную подпитку активной зоны холод-

ной водой. Кроме того, результаты исследования ремонтных режимов со снижением уровня воды в контуре позволило уточнить предельно допустимое положение верхнего и нижнего уровней воды в ремонтном баке, который подключается к КМПЦ для подпитки активной зоны при опорожнении опускного тракта во время ремонта.

4.

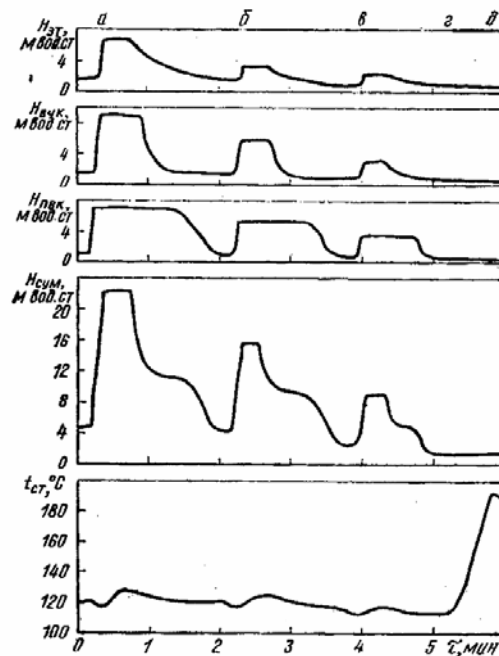


Рис. 6. Изменение во времени параметров в гидравлическом тракте экспериментального канала при атмосферном давлении в сепараторе и мощности канала больше допустимой

Результаты исследования режима разорванной естественной циркуляции позволило сформулировать требования к ремонтной системе принудительного охлаждения реактора в некипящем режиме.