

Аварийное расхолаживание установки БОР-60

О. Д. КАЗАЧКОВСКИЙ, Г. К. АНТИПИН, В. А. АФАНАСЬЕВ, В. Ф. БАЙ, В. А. БОРИСЮК,
Е. В. БОРИСЮК, В. М. ГРЯЗЕВ, В. Н. ЕФИМОВ, В. П. КЕВРОЛЕВ, В. И. КОНДРАТЬЕВ,
Н. В. КРАСНОЯРОВ, А. М. СМЕРНОВ

УДК 621.039.526

Одним из условий безопасной эксплуатации быстрых реакторов при большом подогреве в них натриевого теплоносителя является уменьшение термических напряжений в элементах конструкций корпуса и оборудования контуров в режимах аварийной остановки и расхолаживания. Величина термических напряжений определяется величиной изменения скорости и абсолютного перепада температуры и достигает максимальных значений в массивных узлах оборудования. Идеальные условия аварийной остановки обеспечиваются в тех случаях, когда в наиболее опасных и труднозаменяемых элементах контуров реактора практически сохраняется уровень температуры предшествующего стационарного режима, а затем с допустимой (по термическим напряжениям) скоростью идет расхолаживание установки. В реальных условиях необходимо обеспечить согласование скорости и времени изменения мощности установки и расхода теплоносителя в контурах. В период пуска и наладки на установке БОР-60 был выполнен комплекс расчетов и экспериментальных работ по определению оптимальных условий аварийной остановки и расхолаживания.

Установка БОР-60 — трехконтурная двухпетлевая с быстрым реактором [1]. Два центробежных циркуляционных насоса обеспечивают расход натрия через реактор до $1200 \text{ м}^3/\text{час}$ (рис. 1). Производительность насосов плавно регулируется изменением числа оборотов в пределах 15—100% от номинала.

В реакторе натрий проходит параллельно через пакеты активной зоны и бокового экрана, через зазоры между обечайками стальной защиты

корпуса и поступает в верхнюю камеру смешения. Из камеры смешения нагретый натрий выходит через два патрубка и поступает в промежуточные теплообменники, где проходит по межтрубному пространству сверху вниз и отдает тепло натрию второго контура. Из промежуточных теплообменников натрий поступает в насосы и далее в тройник, объединяющий напорные трубопроводы параллельных петель, откуда через патрубок входит в напорный коллектор реактора.

Каждая из двух петель второго контура представляет собой блок тепловой мощностью 30 Мвт , включающий в себя промежуточный теплообменник, циркуляционный насос и парогенератор. Имеется также воздушный теплообменник, рассчитанный на отвод тепловой мощности 30 Мвт , который может быть подключен к любой петле вместо соответствующего парогенератора или одновременно на две петли. Воздух, нагретый в воздушном теплообменнике, выбрасывается вентиляторами в специальную вытяжную трубу, обеспечивающую также и естественную тягу воздуха при аварийном расхолаживании.

Аварийная остановка реактора производится введением стержней СУЗ в активную зону как в режиме быстрой аварийной защиты (БАЗ), так и в режиме медленной аварийной

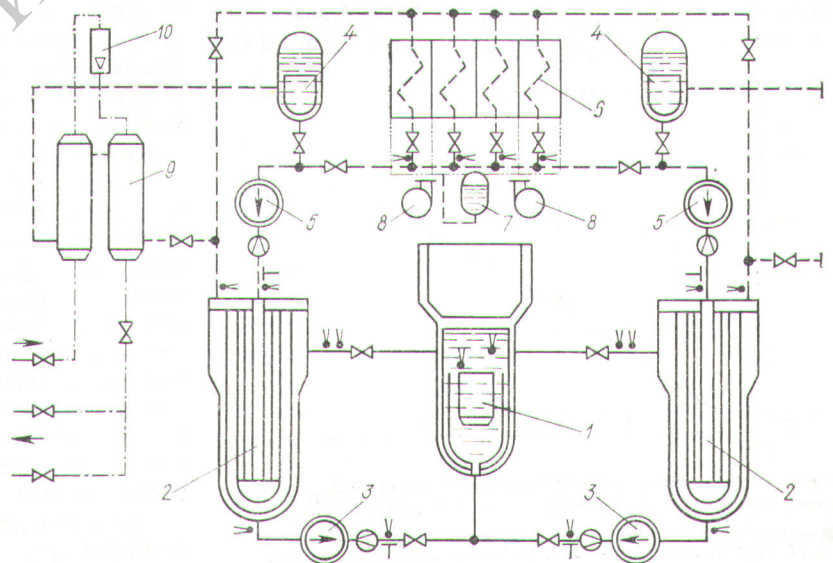
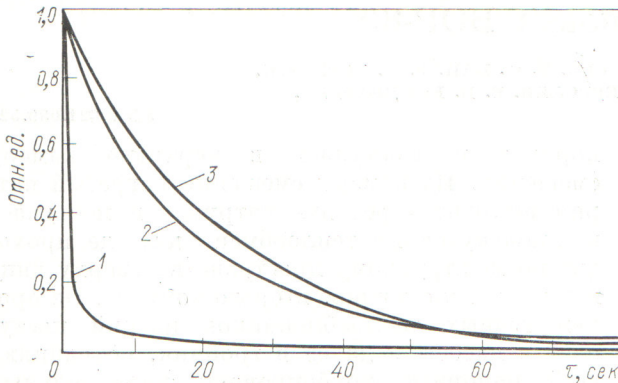


Рис. 1. Схема установки БОР-60:

1 — активная зона; 2 — промежуточные теплообменники; 3 — циркуляционные насосы первого контура; 4 — буферные емкости парогенератора; 5 — циркуляционные насосы второго контура; 6 — воздушный теплообменник; 7 — буферная емкость воздушного теплообменника; 8 — вентиляторы; 9 — парогенераторы; 10 — сепаратор.



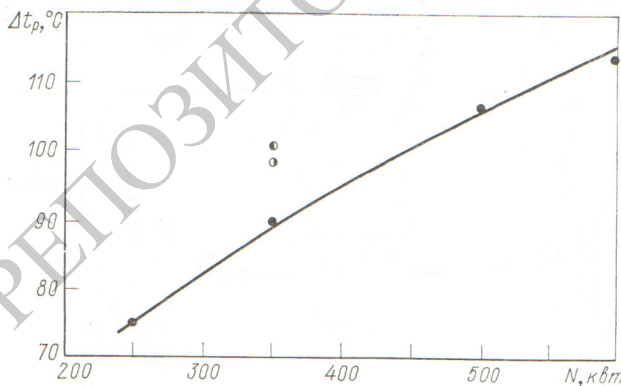
Р и с. 2. Изменение мощности и расхода теплоносителя через активную зону реактора BOR-60 при срабатывании аварийной защиты:

1 — мощность при БАЗ; 2 — мощность при МАЗ; 3 — расход теплоносителя при отключении насосов.

защиты (МАЗ). При срабатывании БАЗ поглотители стержней аварийной защиты и периферийный компенсирующий стержень вводятся в активную зону за ~ 1 сек, регулирующие стержни за 40 сек, центральный компенсирующий стержень остается на месте. При срабатывании МАЗ центральный компенсирующий стержень остается в прежнем положении, все другие стержни СУЗ вводятся в активную зону за 40 сек.

Изменение относительной мощности реактора при срабатывании БАЗ и МАЗ представлено на рис. 2.

В проектной схеме [2] при срабатывании БАЗ и МАЗ предусмотрен автоматический перевод циркуляционных насосов на пониженные обороты с расходом через реактор $300 \text{ м}^3/\text{час}$. При экспериментах по срабатыванию БАЗ и МАЗ



Р и с. 3. Зависимость подогрева теплоносителя — Δt_p от мощности реактора N в режиме естественной циркуляции:

● — при параллельной работе обеих петель; ⊙ — при работе одной первой петли; ⊚ — при работе одной второй петли.

на мощностях 10 и 20 Мвт с переходом циркуляционных насосов на пониженные обороты наблюдались «холодные» удары в «горячих» частях петель. Скорости изменения температур натрия на выходе из реактора достигали значений 1 град/сек. В верхней части промежуточного теплообменника тензометрическими измерениями были зафиксированы кратковременные напряжения, равные $36 \text{ кг}/\text{мм}^2$. Очевидно, что при такой схеме срабатывания аварийной защиты с большого уровня мощности температурные скачки и напряжения в конструкциях будут еще более значительными.

Для уменьшения термических напряжений после срабатывания аварийной защиты была исследована возможность отключения насосов и использования инерции потока и вращающихся частей для сжигания остаточного энерговыделения в процессе спада мощности с последующим переходом в режим естественной циркуляции.

Исследованиями изменения расхода при отключении двух насосов первого контура было установлено, что в первые 90 сек с момента срабатывания МАЗ (рис. 2) уменьшение расхода близко к уменьшению мощности реактора.

При исследовании режимов естественной циркуляции в диапазоне мощностей 250—600 кВт было показано, что значения подогревов теплоносителя в реакторе в этих режимах близки к подогревам в режимах работы остановки на мощностях 20—40 Мвт с расходом через реактор $1000 \text{ м}^3/\text{час}$ (рис. 3).

Расход теплоносителя в петлях второго контура, подключенных к воздушному теплообменнику, в режимах естественной циркуляции почти в три раза больше, чем в первом контуре. Это обусловлено тем, что геометрический центр воздушного теплообменника на 6 м выше геометрического центра промежуточного.

На мощности 350 кВт производилась проверка режимов естественной циркуляции каждой петли первого контура отдельно и вместе. Характеристики обеих петлей в режиме естественной циркуляции (рис. 3) оказались практически одинаковыми ($\Delta t_p = 100^\circ \text{C}$) и мало отличающимися от характеристик при их параллельном соединении ($\Delta t_p = 90^\circ \text{C}$). Отсюда можно заключить, что основной вклад в сопротивление при естественной циркуляции в первом контуре вносит реактор. Доля сопротивления петли незначительна, поэтому возможно вести расхолаживание реактора одной петлей.

Экспериментальные данные по естественной циркуляции, а также изменение мощности

и расхода в реакторе при срабатывании защиты были использованы в расчетах различных вариантов аварийной остановки и расхолаживания в режимах МАЗ и БАЗ с отключением циркуляционных насосов первого и второго контуров и вентиляторов воздушного теплообменника. Результаты расчетов показали, что на выходных патрубках и в контурах температурные скачки при срабатывании МАЗ и БАЗ отсутствуют. На выходе из активной зоны в момент полной остановки насосов имело место повышение температуры на $100\text{--}200^\circ\text{C}$ от стационарного значения. При этом при срабатывании БАЗ пик температуры получается больше и круче, чем при срабатывании МАЗ. Было исследовано влияние отношения расходов теплоносителя на величину пика температур во втором контуре к расходам в первом, стационарном состоянии. При увеличении отношения расходов величина пика температуры уменьшается. Это можно объяснить тем, что с увеличением отношения расходов в промежуточном теплообменнике центр теплосъема смещается вверх, и тогда создаются лучшие условия для формирования движущегося напора при естественной циркуляции после остановки насосов.

При работе реактора на мощности 20 Мвт с подключенными петлями второго контура к воздушному теплообменнику был проведен эксперимент по срабатыванию МАЗ с одновременным отключением насосов обоих контуров и вентиляторов. Наряду с измерением расходов теплоносителя и мощности производились измерения температур теплоносителя на входе в реактор, на выходе из активной зоны (с помощью термопар, установленных над пакетами, и термопар термометрического пакета), у выходных патрубков, на входе и выходе промежуточных теплообменников со стороны первого и второго контуров, а также температур в воздушном теплообменнике. Наиболее характерные изменения температур в реакторе и первом контуре во времени представлены на графиках рис. 4. Температуры в промежуточных теплообменниках и теплоносителя второго контура при срабатывании защиты остались такими же, как и на мощности 20 Мвт , а затем равномерно вместе с температурами в первом контуре и реакторе снижались со скоростью 6 град/час .

Максимальный прирост температуры теплоносителя на выходе из пакетов активной зоны по отношению к стационарному значению составил $\sim 60^\circ\text{C}$, максимальная скорость изменения

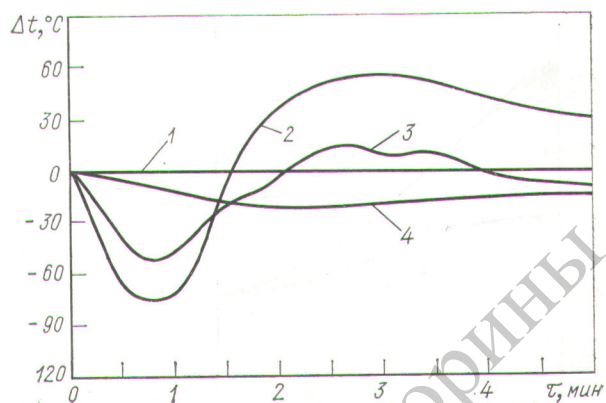


Рис. 4. Отклонение температуры (Δt) от стационарных значений при срабатывании МАЗ при мощности 20 Мвт :

1 — температура на входе в реактор; 2 — температура на выходе из активной зоны (в термопакете); 3 — температура над пакетами активной зоны; 4 — температура на выходе из реактора.

температуры на оболочке твэлов — около 2 град/сек , что значительно меньше по сравнению с вариантом срабатывания защиты без отключения насосов.

В целях дальнейшей проверки безопасности аварийной остановки и расхолаживания была выполнена большая серия экспериментов. Варьировались мощность реактора, расходы теплоносителя по контурам, законы спада мощности и расхода.

Для исключения температурных скачков на трубных досках парогенераторов (когда установка работала в режиме выработки электроэнергии) подбирались режим уменьшения расхода питательной воды. Сохранение расхода питательной воды приводит к быстрому охлаждению парогенератора. Отключение подачи питательной воды одновременно со срабатыванием аварийной защиты вызывает резкое возрастание температуры натрия на выходе из испарителя. Наиболее спокойным для парогенератора является режим со снижением расхода питательной воды за 60 сек при поддержании уровня в сепараторе. Удовлетворительным оказался также режим с задержкой отключения питательного насоса в течение 30 сек с сохранением полного расхода питательной воды через парогенератор.

На рис. 5 приведено изменение температур по контурам установки во времени после срабатывания МАЗ с отключением циркуляционных насосов и вентиляторов на мощности 40 Мвт со съемом тепла с помощью воздушного теплообменника и парогенератора (основной режим работы установки). Отключение питательного

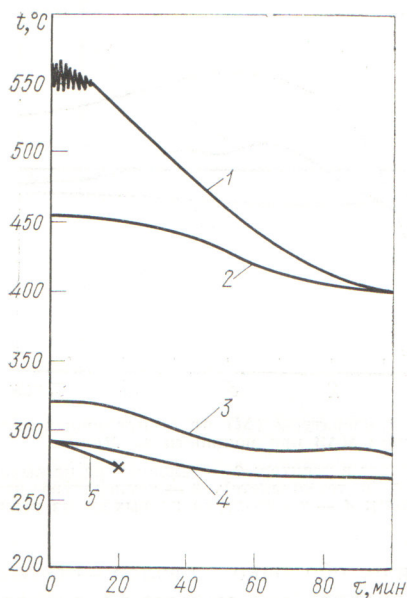


Рис. 5. Изменение во времени температур после срабатывания МАЗ на мощности 40 Мвт:

1 — температура над пакетами активной зоны; 2 — температура на выходе из реактора; 3 — температура на входе в реактор; 4 — температура натрия на выходе из воздушного теплообменника; 5 — температура натрия на выходе из парогенератора; x — момент отключения парогенератора.

насоса производилось с задержкой на 30 сек. Из графиков видно, что резкие изменения температур во всех элементах конструкции отсутствуют.

При работе установки с воздушным теплообменником и парогенератором после срабатывания защиты и отключения насосов петель и парогенератора дальнейшее расхолаживание установки (в целях простоты и исключения температурных перекосов) производится через воздушный теплообменник.

На основании проведенных исследований для аварийной остановки и расхолаживания были составлены следующие безопасные и простые в исполнении схемы:

1. Срабатывание БАЗ с отключением циркуляционных насосов происходит от сигналов: превышение мощности на 20%; уменьшение времени удвоения (периода) до 20 сек; полное обесточение установки.

2. Срабатывание МАЗ с отключением циркуляционных насосов происходит от сигналов: превышение температуры на выходе из реактора; снижение расхода натрия в одной из петель; снижение расхода питательной воды; отключение одного из циркуляционных насосов; отключение питательного насоса; отключение одного из вентиляторов воздушного теплообменника; повышение давления в буферной емкости парогенератора.

Поступила в Редакцию 18/IX 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Лейпунский и др. «Атомная энергия», 21, 450 (1966).
2. Ю. С. Багдасаров и др. Технические проблемы реакторов на быстрых нейтронах. М., Атомиздат, 1969.