

УДК 621.039.587

О применении предохранительного клапана в первом контуре ЯЭУ с ВВЭР

МИТЕНКОВ Ф. М., ЗВЕРЕВА Л. А., МОТОРОВ Б. И., МЕЛЬНИКОВ Э. М., САМОЙЛОВ О. Б.

Правилами отечественных (Госгортехнадзор, Регистр СССР) и иностранных (английский Ллойд и др.) органов надзора предусматривается обязательно устанавливать предохранительный клапан на сосуды и системы высокого давления. Это требование автоматически переносится и на работающие под давлением системы первого контура ядерных энергетических установок (ЯЭУ), в том числе транспортных, атомных станций теплоснабжения и др. Однако необходимость такого клапана в системах первого контура ЯЭУ с ВВЭР не столь очевидна, как для большинства сосудов и систем высокого давления неядерного назначения в связи с особенностями ядерного реактора, заключающимися, во-первых, в том, что для приема сбрасываемого теплоносителя необходима специальная дренажная система с биологической защитой и своими предохранительными устройствами (для защиты сбросной цистерны от разрыва при неспадке предохранительного клапана первого контура), поскольку непосредственный выброс радиоактивности в окружающую среду недопустим. В противном случае отказ клапана, т. е. если он остается открытым, мало чем отличается от разрыва контура. Во-вторых, при сбросе теплоносителя через предохранительный клапан появляется опасность частичного и полного «оголения» активной зоны и повреждения твэлов. Это резко увеличивает активность теплоносителя и усугубляет последствия аварийной ситуации. В-третьих, при неспадке клапана необходима немедленная аварийная подпитка контура.

Таким образом, предохранительный клапан как средство безопасности ЯЭУ выполняет свои функции лишь при высоконадежных системах отвода тепла от активной зоны. А в этом случае предотвратить рост давления можно и без него. Кроме того, его применение увеличивает протяженность трубопроводов, число разъемных соединений, работающих под высоким давлением, и количество жидких радиоактивных отходов. Требования к надежности самого клапана также достаточно высокие. Отметим, что в практике известны случаи его отказа. Так, на АЭС «Дэвис Бесс» (США) в системе первого контура открылся электро-

пневматический клапан. Вместо того чтобы снизить давление и закрыться, он совершил девять циклов «открыто-закрыто», после чего остался в открытом положении [1]. Одной из причин, приведшей к утечке из системы первого контура АЭС «Три-Майл-Айленд-2» (США) ~ 120 м³ теплоносителя (более 1/3 объема), явилась неполадка предохранительного клапана. В конечном итоге развитие аварии привело к частичному оголению активной зоны, повреждению твэлов и выходу большого количества радиоактивных веществ под защитную оболочку. И на других аналогичных установках фирмы «Бабкок—Уилкокс» многократно отказывал предохранительный клапан [2, 3].

Предотвращение утечки радиоактивности в окружающую среду при ложном срабатывании и тем более неспадке предохранительного клапана осложняется в условиях транспортных ЯЭУ затесненностью, на атомных станциях теплоснабжения — близостью населенного пункта. Как уже отмечалось, при установке предохранительного клапана для безопасности ЯЭУ необходимо создавать специальные устройства, являющиеся самостоятельными или в совокупности с ним не столько системами снижения избыточного давления (оно зависит от накопления избыточного тепла), сколько системами отвода тепла от активной зоны с достаточной продолжительностью действия во времени, независимостью от внешних источников энергии и управляющих воздействий. Те же проблемы стоят и при разработке основных систем теплоотвода, и следовательно, они могут быть решены теми же средствами. (Причиной повышенного давления может быть и внешняя, например пожар. Но и в этом случае вопрос сводится к созданию систем теплоотвода как при наличии предохранительного клапана, так и без него).

Именно таким образом решалась задача предотвращения роста давления при проектировании отечественных судовых ЯЭУ. Далее рассматриваются способы надежной защиты первого контура ЯЭУ от превышения давления выше допустимого. Описание целесообразно начать с возможных (и гипотетических) аварийных ситуаций.

Аварийные ситуации, которые могут привести к росту давления. Повышение давления в контуре как следствие накопления избыточного тепла возможно в аварийных режимах из-за прекращения циркуляции теплоносителя в первом контуре и подачи питательной воды в парогенераторы, увеличения мощности реактора выше разрешенного уровня, пожара, а также неисправной работы системы подпитки контура. В свою очередь первопричинами прекращения подачи питательной воды могут быть обесточивание ЯЭУ, неисправность насоса, обрыв трубопровода питательной воды, самопроизвольное закрытие регулирующего клапана и т. п. Рост мощности реактора вызывается перемещением управляющих стержней, «забросом» холодного теплоносителя при пуске насоса ранее отсеченной петли, самопроизвольным увеличением расхода питательной воды или расхода первого контура (эффекты саморегулирования). Очевидно, что в основе и этих «первичных» аварий могут лежать внешние причины как общего характера (затопление, посадка на мель или опрокидывание судна), так и отказ конкретного элемента конструкции или автоматики, ошибка оператора и т. д.

В проекте кодекса безопасности атомных торговых судов, разработанного ИМКО (Межправительственной морской консультативной организацией), нет четко регламентированного числа и перечня подлежащего рассмотрению (наложения) числа независимых отказов. Согласно отечественным «Правилам ядерной безопасности атомных электростанций» [4] рассмотрение проводилось применительно к следующим условиям:

исходная авария (первичный отказ) сопровождается сопутствующей неисправностью (ранее не обнаруживаемой в течение длительного времени) в оборудовании, косвенно выполняющем защитные или локализирующие функции;

дополнительно выходят из строя или отказывают одно из независимых активных защитных устройств и одно из независимых активных локализирующих устройств.

Способы предотвращения развития аварий. Отказ в системе подпитки первого контура легко устраняется установкой встроенного в подпиточный насос предохранительного клапана, который гарантирует превышение давления подпиточного насоса сверх допустимого. Естественно, в этой системе предохранительный клапан свободен от опасностей, присущих радиоактивной среде первого контура.

Предотвращение накопления избыточного тепла в первом контуре обеспечивается следующим:

резервированием систем аварийной защиты, управления и сигнализации по степени важности защитного барьера (ограничение, запрещение, предупреждение, медленная и оперативная защита);

резервированием как обеспечением защитных действий по отклонению некоторых зависимых, независимых и связанных причинно-следственной связью параметров (обороты циркуляционных насосов, уровень циркуляции, расход питательной воды, мощность, температура, давление, исчезновение электропитания, неисправности в автоматике и т. п.);

многоканальностью цепей измерения; независимыми щитами, трассами и источниками электроснабжения с территориальным разнесением;

вспомогательными трубопроводами подачи питательной воды в системы охлаждения;

наличием нескольких каналов расхолаживания, цистерн запаса воды и др.

Таким образом, основополагающим принципом построения высокоэффективной системы аварийной защиты, в частности аварийной защиты реактора, является создание нескольких защитных барьеров путем их последовательного дублирования, например по прекращению подачи питательной воды, повышению температуры, давления, в дополнение к саморегулирующим эффектам реактора. Предупредительная защита автоматически снижает мощность до момента компенсации отклонения параметра сверхзаданного значения.

Особые меры предусматриваются на случай обесточивания ЯЭУ:

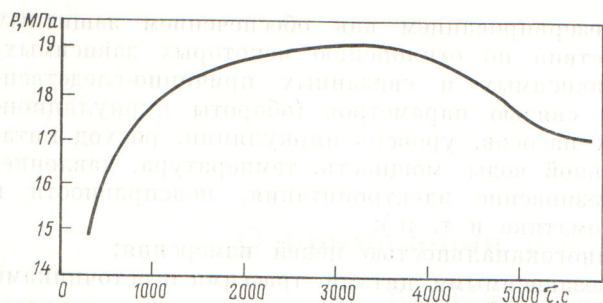
пассивность аварийной защиты как независимость от источников электроснабжения (ввод под действием пружин);

обеспечение уровня естественной циркуляции первого контура, достаточного для снятия остаточного тепловыделения;

подача воды в системы охлаждения первого контура гидропневмоаккумулятором.

Выброс регулирующих органов из активной зоны при любом положении судна в пространстве исключается конструктивным исполнением привода.

Примеры наиболее существенных аварийных ситуаций с учетом наложения отказов. 1. Исчезновение подачи электропитания от турбогенераторов ЯЭУ сопровождается неисправностью одного аварийного дизель-генератора и отключением второго из-за перегрузки. Предусмотрен быстрый надежный пуск резервного менее мощного дизель-генератора с уменьшенным числом потребителей. 2. Прекращение подачи питательной воды от основного питательного насоса при одновременном невключении канала расхолаживания через холодильник фильтра или неисправности систем обеспечения «малой скорости» у трех циркуляционных насосов. Предусмотрена подача питательной воды от аварийного питательного насоса по автономному трубопроводу, минуя конденсатопитательную систему. 3. Самопроизвольное открытие питательного клапана при



Зависимость давления в первом контуре ЯЭУ от времени при затоплении выгородки на 1000-й с

одновременном непрохождении сигналов предупредительной и аварийной защиты по превышению мощности. Безопасное прохождение режима обеспечено каналами предупредительной и аварийной защиты по температуре и давлению первого контура. 4. Заброс холодной воды из парогенератора в активную зону при пуске отключенной петли вследствие неплотности его отсечных клапанов. Сопутствующие неисправности — несрабатывание предупредительной и аварийной защиты по мощности и выход из строя подогревателя питательной воды. Режим обеспечивается аварийной и предупредительной защитой по температуре и давлению. Дополнительная организационная мера — запрещение прямого пуска насосов на большую скорость. Во всех режимах такого типа давление в первом контуре ЯЭУ ледокола «Ленин» не превышало допустимого. На рисунке

приведено изменение давления при условии, что расход питательной воды уменьшается линейно за 10 с от номинального до 0; в течение 1000 с теплоотдача осуществляется в окружающую среду через воздушные зазоры; после 1000 с все заполняется водой и начинается теплоотдача непосредственно к холодной воде.

Как показал длительный успешный опыт эксплуатации ледоколов, отказ от предохранительного кланана в первом контуре не ухудшает, а повышает безопасность ЯЭУ.

Выводы. Перенос требований органов надзора по защите обычных сосудов и систем высокого давления от его превышения выше допустимого на атомные установки в условиях радиоактивности первого контура ЯЭУ, особенно судовых, с такой не допускающей оголения и длительно выделяющей тепло системой, как активная зона, нецелесообразен. Защита от повышения давления может быть более эффективно обеспечена надежными системами останова реактора, теплоотвода и др., о чем свидетельствует сравнительный опыт эксплуатации атомных ледоколов и некоторых зарубежных АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Verna B.— Nucl. News, 1979, v. 22, N 7, p. 34.
2. Personal Reflections on the Kemeny Report.— Nucl. Eng., 1980, v. 21, N 3, p. 75.
3. Not one, but two LOCAs at Three Mile Island.— Nucl. Engng Intern., 1979, v. 24, N 285, p. 10.
4. Правила ядерной безопасности атомных электростанций. ПБЯ-04-74. Атомиздат, 1977.

УДК 621.039.516.4:519.853.6

Оптимизация развития топливной промышленности ядерной энергетики

ШВЕЛЕВ Я. В., ЛОКШИН В. Л., КЛИМЕНКО А. В.

Предприятия по изотопному обогащению и химической переработке облученного топлива — важные элементы инфраструктуры ядерной энергетики. Экономически оправданные единичные мощности этих предприятий столь велики, что побуждают некоторые страны к кооперации [1]. Выбор сроков строительства и размеров, согласование этих параметров с развитием ядерной энергетики и других звеньев ее топливной базы (изготовление твэлов, добыча урана) — сложная технико-экономическая задача. Качество ее решения может оказать влияние на конкурентоспособность ядерной энергетики. Некоторые формальные приемы решения этой задачи намечены в работах [2—5]. Ниже приведены примеры применения методов оптимизации, изложенных в работах [2—4].

Модель оптимизируемой системы изображена на рис. 1. Из рудников I природный уран посту-

пает с интенсивностью $q^{(12)}$ на заводы по изотопному обогащению 2. Сюда же с интенсивностью $q^{(42)}$ можно подавать со склада $4T$ уран, полученный в результате химической переработки топлива, облученного в тепловых реакторах. Суммарная установленная мощность предприятий 2 равна $q_y^{(2)}(t)$ и выражается в работе разделения за единицу времени. Реальная загрузка предприятий раздельной работой $q^{(2)}(t)$ не может превышать $q_y^{(2)}(t)$. Установленная мощность наращивается в моменты $t_j^{(2)}$ ступенями $Q_j^{(2)}$, так что $Q_j^{(2)}$ — установленная мощность завода *, пущенного в момент $t_j^{(2)}$.

Обогащенный уран может накапливаться на складе $2'$ в количестве $m^{(2)}(t)$. Со склада он посту-

* Увеличение $q_y^{(2)}$ на $Q_j^{(2)}$ может быть и результатом расширения или модернизации ранее построенного завода. Однако в данном расчете не учитывалось, что расширение действующего завода иногда выгоднее строительства нового.