

РЕАКТОРНЫЕ УСТАНОВКИ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ ПАРОГЕНЕРАТОРАМИ

**А. В. Безносков, О. О. Новожилова, А. А. Молодцов, М. В. Ярмонов,
П. А. Боков, А. В. Назаров**

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексева,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

Рассмотрен анализ применения горизонтальных парогенераторов в реакторных установках со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями.

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, горизонтальный парогенератор, свинцовый теплоноситель, межконтурная неплотность ПГ.

REACTOR PLANT WITH HORIZONTAL STEAM GENERATORS / A. V. BEZNOSOV, O. O. NOVOZHILOVA, A. A. MOLODTCOV, M. V. YARMONOV, P. A. BOKOV, A. V. NAZAROV // The analysis of the application of horizontal steam generators in reactor facilities with lead and lead-bismuth coolant are discussed.

Key words: fast reactor, horizontal steam generators, lead coolant, intercontour leak of a steam generator.

Безусловным преимуществом реакторных установок (РУ) с жидкометаллическими теплоносителями (Pb, Pb-Bi, Na, K и др.), по сравнению с РУ с водяным теплоносителем (реакторами с водой под давлением, корпусными кипящими реакторами), является, наряду с более полным использованием сырьевых ресурсов, высокий КПД энергоустановки за счет более высоких параметров пара, генерируемого РУ. При этом давление в реакторном контуре РУ с жидкометаллическими теплоносителями близко к атмосферному, в отличие от РУ с водяным теплоносителем, в которых давление в реакторном контуре составляет 6–16 МПа (60–160 кгс/см²) и более. РУ с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ), в отличие от РУ с натриевым теплоносителем, выполняются двухконтурными, а не трехконтурными.

Одна из наиболее потенциально опасных аварийных ситуаций в РУ с ТЖМТ – «межконтурная неплотность парогенератора»; вода, пар из контура рабочего тела с давлением 6–16 МПа и более поступают в реакторный контур с давлением в парогенераторе (ПГ) от ~0,01 МПа (0,1 кгс/см²) до 0,6–0,7 МПа (6–7 кгс/см²), определяемым высотой столба ТЖМТ в ПГ и давлением, создаваемым

ПГ. Конструкция РУ должна исключать поступление воды в активную зону, что в реакторах на быстрых нейтронах может привести и к его «разгону», и к переопрессовке и разрушению реакторного контура, не рассчитанного на давление воды, пара в контуре рабочего тела.

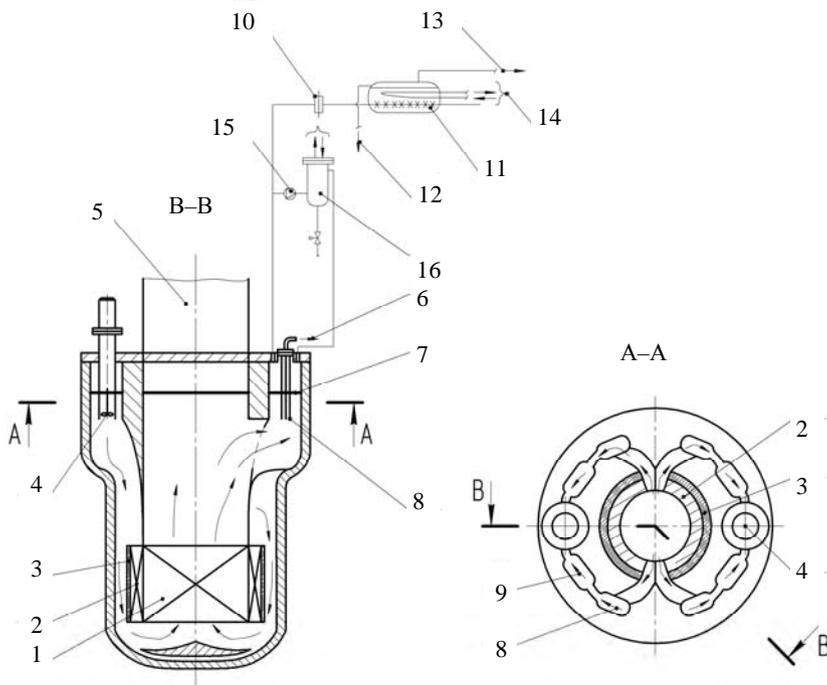
В отличие от реакторных контуров АПЛ с ТЖМТ, контуры с реакторами на быстрых нейтронах энергоблоков с ТЖМТ из экономических соображений не могут быть спроектированы на давление, равное или превышающее давление рабочего тела в парогенераторах. Это в свою очередь накладывает требование использовать технические решения, не допускающие существенного повышения давления в реакторном контуре при рассматриваемой аварии. Очевидно, что реализация таких решений однозначно определяется принимаемым проектом РУ, максимальным расходом воды, пара, поступающих в контур ТЖМТ при такой аварии, и, соответственно, площадью неплотности в трубной системе парогенератора. Проектант может в проекте принять допущение о возможности разрыва (разрушения) с истечением рабочего тела из двух поперечных сечений одной трубы ПГ. В проекте может быть принято

допущение о разрушении с меньшей площадью истечения, допущение о проектной возможности разрушения нескольких трубок или одной секции парогенератора. Максимальной безопасностью будет обладать та РУ, проект которой предусматривает возможность локализации аварии с максимально разумным расходом воды, пара, поступающих в реакторный контур, при такой аварии исключается переопрессовка реакторного контура и ограничивается поступление воды, пара в активную зону до величины, гарантированно исключающей «разгон» реактора.

Учитывая в проекте возможность возникновения аварии «межконтурная неплотность парогенератора» в РУ с ТЖМТ, как показали экспериментальные и расчетно-теоретические исследования, большим преимуществом будет обладать конструктивная схема установки с горизонтальными парогенераторами [1–3], вариант которой представлен на рисунке. Активная зона 1, пароперегреватель 8 и испаритель 9, главный циркуляционный насос 4 размещены под свободным уровнем теплоносителя 7.

Трубная система парогенератора выполнена горизонтальной с целью уменьшения высоты слоя ТЖМТ над трубками трубной системы парогенератора и образования в случае значительного ава-

рийного разрушения элементов трубной системы сплошного парового (пароводяного) канала между местом разрушения и объемом над свободным уровнем 7 теплоносителя. Трубная система пароперегревателя 8 и испарителя 9 выполнена в виде плоских змеевиковых горизонтальных труб, концы которых заделаны в трубные доски камер пароперегревательных и испарительных секций, имеющих съемные крышки для установки, при необходимости, дросселей и глушения аварийных трубок при их разгерметизации. Для перемешивания (исключения стратификации) теплоносителя в трубной системе установлены гребенки (или другие устройства), зубцы которых находятся между трубами горизонтального парогенератора. Газовый объем над свободным уровнем 7 теплоносителя в секциях ПГ больше или равен объему теплоносителя в них и сообщен через разрывную мембрану 10 с барботажным баком, газовый объем которого сообщен с атмосферой через систему газоочистки. Водяной объем барботажного бака охлаждается технической водой и через линию перелива 12 сообщен с дренажными цистернами или другими объемами для приема и очистки конденсата, поступающего в них при аварии «межконтурная неплотность ПГ».



Конструктивная схема реакторного блока РУ с ТЖМТ с горизонтальным парогенератором:

- 1 – активная зона; 2 – отражатель нейтронов; 3 – биологическая защита; 4 – главный циркуляционный насос; 5 – стойки СУЗ; 6 – трубопровод перегретого пара на турбину; 7 – свободный уровень ТЖМТ; 8 – пароперегреватель ПГ; 9 – испаритель ПГ; 10 – мембрана разрывная; 11 – бак барботажный; 12 – конденсат в систему спецводоочистки; 13 – газ в систему газоочистки; 14 – вода охлаждающая; 15 – газодувка; 16 – конденсатор аварийный

Газовый объем каждой секции парогенератора сообщен трубопроводами с аварийными конденсаторами пара и газодувкой 15.

С целью уменьшения протяженности циркуляционных трасс реакторного контура с ТЖМТ и уменьшения объема теплоносителя в нем, а также уменьшения массогабаритных характеристик реакторного контура, выше активной зоны 1 размещен кольцевой канал, внутренний диаметр которого больше наружного диаметра активной зоны 1. В кольцевом канале (в его участках) установлены пароперегревательная 8 и испарительная 9 секции горизонтального парогенератора [4].

Входной участок пароперегревателя 8 сообщен с объемом теплоносителя над активной зоной 1, а выходной участок испарителя 9 – с входной камерой главного циркуляционного насоса 4 (осевого). Напорная камера насоса сообщена через опускной канал с активной зоной 1 реактора [2].

Такая компоновка реакторного контура позволяет уменьшить его гидравлическое сопротивление, увеличить процент естественной циркуляции в контуре, повысить безопасность реакторной установки при аварийном разрушении элементов трубной системы парогенератора.

Работа ядерной энергетической установки в потенциально опасном аварийном режиме «межконтурная неплотность парогенератора» осуществляется следующим образом. В зависимости от размера межконтурной неплотности и, соответственно, расхода воды, пара в контур ТЖМТ можно выделить два состояния установки при этой аварии. В случае «малого расхода» – при пузырьковом или струйном поступлении пара, воды – признаком аварии является повышение уровня конденсата в конденсаторе 16, некоторое повышение давления в газовой системе, а также повышение свободного уровня теплоносителя в реакторном контуре, прежде всего, в районе неплотности трубной системы горизонтального парогенератора. В этом режиме в работу вводится газодувка, пар конденсируется в аварийном конденсаторе 16. Из него конденсат удаляется при открытии дренажного клапана по сигналам от верхнего сигнализатора уровня в цистерну «грязных вод». По сигналу от нижнего сигнализатора уровня дренажный клапан закрывается. В случае возникновения такой аварии возможна работа реакторной установки с последующим поиском и глушением аварийной трубки (трубок) или места их заделки в трубную доску. При длительной работе РУ в этом аварийном режиме происходит окисление теплоносителя в контуре вследствие того, что пар,

вода содержат примесь кислорода, который окисляет ТЖМТ. Молекулы воды, поступающие в объем теплоносителя частично диссоциируют с образованием кислорода и водорода, как в результате обычных химических реакций, так и под действием ионизирующего излучения. Образующийся кислород практически мгновенно вступает в реакцию с жидкометаллическим теплоносителем, окисляя его в расплаве или образуя (при насыщении) твердую, дисперсную фазу оксидов. Водород, образующийся из молекул воды, вследствие гравитации и других эффектов выводится в газовую систему, лишь незначительно раскисляя теплоноситель в контуре и восстанавливая его оксиды, находящиеся в составе шлаков на его свободной поверхности.

В случае «большого расхода» пара, воды через аварийную неплотность – разрыв одной, нескольких или всех трубок секции парогенератора – оперативным признаком такой аварии является резкое увеличение давления в газовой системе вследствие поступления значительного количества пара, воды в объем системы защитного газа и возрастания свободного уровня ТЖМТ в аварийной секции ПГ.

Вследствие незначительного заглубления (~1000 мм и менее) горизонтальных трубок под уровень теплоносителя в секции ПГ происходит кризис барботажа «легкой» фазы через слой ТЖМТ без ударных динамических эффектов, характерных для компоновок РУ других типов. Между местом истечения, поступления рабочего тела в объем ТЖМТ и развитой в горизонтальном ПГ свободной поверхностью ТЖМТ образуется паровой (пароводяной) канал. Со стенок этого канала мелкодисперсная фаза ТЖМТ может захватываться паром в паровой объем над свободным уровнем теплоносителя. Гребенки или другие устройства организации потока ТЖМТ между плоскими змеевиками трубной системы ПГ ограничивают область барботажа и ускоряют процесс возникновения кризиса барботажа в объеме ТЖМТ в секции ПГ. Уровень теплоносителя в аварийной секции, как и в других секциях ПГ, увеличивается незначительно – на величину объема парового канала.

При такой компоновке в момент возникновения межконтурной неплотности с максимальным разрешением элементов трубной системы и до разрыва мембраны 10 переопрессовка реакторного контура и гидравлический удар происходить не будут. Давление в реакторном контуре увеличивается до давления разрыва мембраны 10 в сумме с незначительной величиной статического давле-

ния (до ~ 1 кгс/см²) над аварийными горизонтальными трубами. После разрыва мембраны давление в контуре увеличивается на величину гидравлического сопротивления потока парогазовой смеси от газового объема горизонтального парогенератора до давления в барботажном баке, сообщенном с атмосферой. После определения и отключения по воде и пару горизонтального парогенератора производится глушение аварийных труб ПГ.

Возросшее при такой аварии давление в аварийной секции ПГ «запирает» подачу в нее теплоносителя, способствует прекращению циркуляции ТЖМТ через аварийную секцию и частичному подреннированию теплоносителя в аварийной секции.

Компоновка РУ с горизонтальными парогенераторами позволяет:

- исключить поступление воды в активную зону реактора на быстрых нейтронах и его «разгон» при потенциально опасной аварийной ситуации «большая межконтурная неплотность парогенератора», при практически любом расходе рабочего тела в реакторный контур;

- исключить переопрессовку контура и гидравлические удары при практически любом расходе рабочего тела в реакторный контур при аварии «межконтурная неплотность парогенератора»;

- увеличить движущий напор естественной циркуляции (ЕЦ) и, соответственно, расход ЕЦ за счет сосредоточения участка отвода тепла (в ПГ) в верхнем участке контура, минимизации протяженности реакторного контура и исключения из него дополнительных подъемно-опускных участков, увеличивающих гидравлическое сопротивление контура и создающих движущий напор ЕЦ;

- обеспечить достаточно простое обнаружение и глушение аварийных трубок парогенератора;

- обеспечить компактность и минимизировать массогабаритные характеристики реакторной установки.

Список литературы

1. Пат. № 2320035 РФ, МПК (51) G21C9/00. Ядерная энергетическая установка / Безносов А. В., Молодцов А. А., Бокова Т. А. и др. // Изобретения. Полезные модели. 2008. № 8.

2. Пат. № 2313143 РФ, МПК (51) G21C9/00, G21C15/00. Ядерная энергетическая установка / Безносов А. В., Молодцов А. А., Бокова Т. А. и др. // Там же. 2007. № 35.

3. Безносов А. В., Бокова Т. А., Молодцов А. А. Экспериментальные исследования процессов, сопровождающих межконтурную неплотность парогенератора со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителем и оптимизация его конструкции // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2006. № 4. С. 3–18.

4. Безносов А. В., Бокова Т. А. Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике: Учебное пособие. – Н.Новгород: Литера, 2012.

Контактная информация –

Безносов Александр Викторович – доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры «АТСиМИ» НГТУ, тел.: 8-831-436-80-23; e-mail.

besnosov@ntu.nnov.ru,

Новожилова Ольга Олеговна – канд. техн. наук, доцент кафедры «АТСиМИ» НГТУ, 8-831-436-80-23; e-mail rojoelf@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 17.06.2013.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2013, вып. 3, с. 131–134.