

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ МЕЖКОНТУРНУЮ НЕПЛОТНОСТЬ ПАРОГЕНЕРАТОРА В ЭКСПЛУАТАЦИОННО-БЕЗОПАСНЫХ ПРЕДЕЛАХ В РУ С ТЖМТ

А.В. Безносков*, Т.А. Бокова*, О.О. Новожилова*, А.Г. Мелузов*,
Р.А. Метринский*, Э.Г. Новинский**

* *Нижегородский государственный университет им. Р.Е. Алексеева
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24*

** *АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И.Африкантова»
603074, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15*



Представлены результаты процессов, сопровождающих аварийную ситуацию «межконтурная неплотность парогенератора (ПГ)» в эксплуатационно-безопасных пределах в реакторных установках со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями (ТЖМТ). Расход воды (пара), поступающих через неплотность в теплоноситель, соответствовал пузырьковому и, частично, факельному режимам истечения с моделированием условий работы парогенератора. Варьировались режимы поступления воды (пара) через отверстия истечения различной геометрии в трубной системе ПГ, через боковое отверстие в суженную часть эжектора, в рабочий зазор лабиринтно-винтового насоса с моделированием различной степени диспергации пузырьков «легкой» фазы в теплоносителе. Температура расплава свинца составляла 400 – 550°С, давление – 0,1 – 4,0 кгс²/см, температура воды на входе в экспериментальный участок – 20°С, давление воды – 0,2 – 8,0 кгс²/см, расход воды, вводимой в жидкометаллический теплоноситель, – 0,5 – 200 кг/ч, длительная паровая нагрузка на свободную поверхность свинцового теплоносителя до 10,0 .

Варьировалась геометрия каналов течения двухкомпонентных потоков: ТЖМТ-вода, пар, а также элементов конструкции, обтекаемых двухкомпонентным потоком.

Ключевые слова: межконтурная неплотность парогенератора, ТЖМТ, РУ, теплоноситель, теплообмен.

ВВЕДЕНИЕ

Межконтурная неплотность парогенератора является одной из наиболее потенциально опасных аварийных ситуаций в энергетических контурах со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. При этой аварии вода (пар) из контура рабочего тела

© *А.В. Безносков, Т.А. Бокова, О.О. Новожилова,
А.Г. Мелузов, Р.А. Метринский, Э.Г. Новинский, 2016*

с давлением 40 – 240 кгс/см² через неплотность в трубной системе поступает в реакторный контур с давлением в районе истечения 0,1 – 10 кгс/см² (меньшие значения относятся к варианту РУ типа СВБР, а большие значения к варианту РУ типа БРЕСТ) и температурой ТЖМТ 400 – 540°С [6]. Расход истечения воды (пара) определяется местом неплотности, конструкцией парогенератора, режимом его работы. Начиная с расходов воды (пара), поступающих в ТЖМТ, ориентировочно, до десятков килограммов в сутки продолжение эксплуатации реакторной установки на энергетических уровнях мощности недопустимо. Необходимо срабатывание аварийной защиты реактора и его расхолаживание по специальной программе, исключающей или существенно ограничивающей поступление теплоносителя реакторного контура в полости оборудования и трубопроводов пароводяного контура.

При существенно малых расходах поступление воды (пара) в реакторный контур (ориентировочно, до десятков граммов в сутки и менее) возможна ситуация, при которой место течи является технически неопределимым. Неплотность (трещина или др.) может «закрываться» при переходе парогенератора в ремонтное состояние и при последующих попытках обнаружить (определить) локальное место истечения вследствие уменьшения перепада давления между контурами, уменьшения температуры конструкции в районе поиска, «забивания» отверстия истечения теплоносителем и его оксидами. Операции по поиску и глушению отверстия истечения могут стать существенно продолжительными, дорогостоящими (так как требуют вывода из работы энергоблока) с достаточно неопределенным результатом.

В отличие от контуров с щелочными жидкометаллическими теплоносителями (натрий, литий и др.) в контурах со свинцом и расплавом на его основе исключена возможность развития аварии с последующим лавинным разрушением элементов реакторного контура под воздействием струи воды (пара), поступающих в жидкометаллический теплоноситель. В последних аварийная ситуация может развиваться под действием «внешних» воздействий по отношению к процессу поступления воды (пара). Подобная аварийная ситуация имела место в ПГ МП-7 транспортной РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем при аварийном истирании трубок парогенератора вследствие разрушения дистанционирующих планок трубной системы ПГ [6]. Очевидно, что в случае развития аварийной ситуации «межконтурная неплотность ПГ» под воздействием «внешних» причин процесс ее развития определяется этими причинами, которые и должны рассматриваться в качестве определяющих аварийную ситуацию в целом.

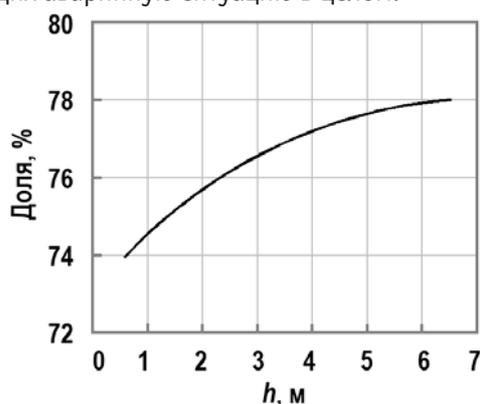


Рис. 1. Зависимость доли нескипевшей воды от заглубления места течи под уровень свинцового теплоносителя. Температура воды – 355°С, давление – 30 МПа

Согласно концепции «течь перед разрушением», которая вполне применима к условиям трубной системы в ПГ с ТЖМТ (перлитные, ферритно-мартенситные стали и др.), первоначальное истечение воды (пара) в процессе аварийной ситуации будет прохо-

дуть через отверстие (трещину и др.) малого размера. Проходя через такие отверстия, вода дросселируется и частично испаряется вследствие уменьшения ее давления до давления в реакторном контуре в месте течи, как показано на рис. 1 [8, 9].

Экспериментально и теоретически подтверждено [1 – 5, 9], что поступающая в ТЖМТ масса воды разбивается на пузыри за счет объемного вскипания, гидродинамического и теплового взаимодействия с жидкометаллическим теплоносителем. Температура капель воды в пузырях соответствует температуре насыщения при давлении в локальном участке контура жидкометаллического теплоносителя.

В диапазоне расходов от минимального расхода, при котором может быть обнаружено место истечения и устранена неплотность, до максимального расхода, при котором невозможна безопасная эксплуатация реакторной установки, в случае необходимости возможно ограниченное продолжение эксплуатации энергоблока на энергетических уровнях мощности. Особое значение эта возможность приобретает для установок малой и средней мощности, работающих на индивидуального или группу потребителей, например, энергоблоки для Заполярья, транспортабельных и транспортных установок, для которых требования к живучести РУ становятся более жесткими [14, 15].

Аспекты аварийной ситуации «межконтурная неплотность ПГ» в РУ с ТЖМТ отражены в публикациях [1 – 4]; результат этих работ обобщен в [5, 6, 11].

Целью работ, выполненных в НГТУ, является уточнение характеристик процессов, сопровождающих межконтурную неплотность ПГ при ограниченных расходах поступления воды (пара) в ТЖМТ в зависимости от геометрии узла ввода «легкой» фазы, режимных характеристик формируемого двухкомпонентного потока и его характеристик, полученных при проведении сопутствующих экспериментов на стендах с ТЖМТ.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК И МЕТОДИК ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводились со следующими вариантами узлов ввода воды (пара) в ТЖМТ.

1. Сопловые насадки с вводом и диспергацией воды (пара) за счет энергии давления, подаваемой в экспериментальную установку, для сопел истечения в виде

- круглых отверстий диаметром от 0,5 до 1,5 мм;
- горизонтально ориентированных щелей 1,4×15,0 и 0,8×10,0 мм;
- искусственно сформированной трещины протяженностью 10,0 мм с переменной толщиной зазора 10 – 200 мкм.

2. Ввод воды (пара) через боковое отверстие в рабочий зазор между вращающимся винтом и неподвижной втулкой лабиринтно-винтового насоса, перекачивающего свинцовый теплоноситель.

3. Ввод воды (пара) через боковое отверстие диаметром 3,0 мм в поток свинцового теплоносителя в суженной части эжектора диаметром 6,0 мм.

Температура свинцового теплоносителя в процессе испытания варьировалась в диапазоне 400 – 550°С. Циркуляция двухкомпонентного потока в контуре с ТЖМТ осуществляется за счет движущего напора создаваемого

- газлифтом при вводе воды (пара) на барботаж в «свободную» и «затесненную» емкости;
- центробежным насосом с подачей свинцового теплоносителя до 6,0 м³/ч;
- лабиринтно-винтовым насосом с подачей свинца до 2,5 м³/ч.

Температура воды, подаваемой на вход в экспериментальную установку, составляла 20°С, ее подача в ТЖМТ – от 0,5 до 200 м³/ч.

Контроль размеров пузырей «легкой» фазы в ТЖМТ, скорости их движения, серий пузырей и числа пузырей в серии осуществлялся с использованием времяпролетных

сигнализаторов конструкции НГТУ, заглубляемых под свободный уровень свинца от 2700 до 150 мм. Минимальный контролируемый размер пузырей «легкой» фазы составлял около 1,0 мм. Контроль локальной температуры в ТЖМТ и двухкомпонентном потоке осуществлялся микротермопарами, заглубленными под уровень свинца от 2700 до 130 – 140 мм и с установкой в паровом (парогазовом) объеме над свободным уровнем ТЖМТ. Сигналы от датчиков обрабатывались по соответствующим программам компьютеризированной системы сбора и обработки информации стенда.

При обсуждении результатов использовалась информация, полученная при испытаниях погружного осевого насоса НСО-01НГТУ с лопастными системами, моделирующими систему главного циркуляционного насоса (ГЦН) РУ БРЕСТ-ОД-300 [13]. Использовалась также информация, полученная при экспериментальном определении характеристик теплообмена при поперечном обтекании двухкомпонентным потоком «свинец – легкая» фаза» трубок, моделирующих трубки трубной системы парогенератора [10, 12].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Устройство диспергации воды (пара) в виде рабочего зазора лабиринтно-винтового насоса (рис. 2) генерирует пузыри с размерами заведомо менее 1,0 мм, которые не фиксировались электроконтактными сигнализаторами в составе двухкомпонентного потока с одновременным заметным подъемом свободного уровня в емкости контура. Время дегазации (с опусканием свободного уровня ТЖМТ до исходного) объема теплоносителя после остановки насоса, прекращения циркуляции и ввода воды (пара) составило два – четыре часа. Разность температур пара над свободным уровнем свинца и его расплавом по сравнению с другими устройствами ввода рабочего тела в теплоноситель составила 30 – 50°C. Не зафиксированы частицы (мелкие капли) воды в виде белого тумана в выходящем паровом потоке и изменение гидравлического сопротивления трассы циркуляции ТЖМТ.

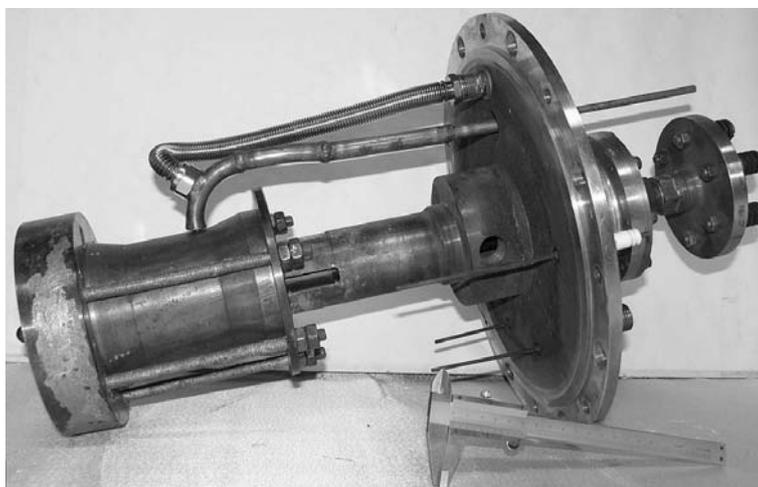


Рис. 2. Лабиринтно-винтовой насос с патрубком подвода воды в рабочий зазор

При вводе воды (пара) в поток в суженной части эжектора через 0,5 – 1,0 ч работы свободный уровень свинца поднимался, а ток электродвигателя насоса ТЖМТ уменьшался с 5,5 до 4,5 А (за счет перекачки менее плотной смеси ТЖМТ и «легкой» фазы) и восстанавливался до исходного после прекращения ввода воды (пара) в поток ТЖМТ. Зафиксирована интенсивная агломерация пузырей. При увеличении скорости вращения вала насоса с 1000 до 1500 об/мин заметного изменения числа фиксируемых пузырей не отмечается. Распределения числа крупных (2,0 – 20,0 мм) агломерированных пузырей консервативно к изменению расхода воды (пара), вводимых в ТЖМТ. Скорость

подъемного движения пузырей «легкой» фазы в трубопроводах и сепарирующей емкости составляла 0,3 – 1,4 м/с.

Анализ результатов с вводом воды (пара) через круглое отверстие диаметром 1,0 мм, через горизонтально ориентированные щели и искусственную трещину, на барботаж через слой свинца в режиме газлифта показывает, что размеры пузырей и скорость их всплытия практически не зависели от величины расхода воды (пара) (в диапазоне исследований) для всех испытанных вариантов узлов ввода рабочего тела (рис. 3, 4). Наименьший размер пузырей и, соответственно, наименьшая скорость всплытия пузырей зафиксированы у насадок с искусственными трещинами; наиболее вероятный размер пузырей составил около 1,0 мм и скорость всплытия – около 0,1 м/с. При такой насадке фиксируется значительная разница между размерами пузырей, контролируемых сигнализаторами при заглублениях 1740 и 830 мм под уровнем свинца, что свидетельствует об их дроблении в процессе всплытия.

Согласно расчетным оценкам [4, 5], длительность испарения капли воды размером 1,0 мм составляет примерно 30 с, а радиусом 0,1 мм – 1,5 с.

В экспериментах с подачей воды (пара) на барботаж через слой свинца при температуре 450 – 500°C полного испарения капель за время всплытия (30 с и более) не происходило. Над свободным уровнем ТЖМТ фиксировались мелкодисперсные капли конденсата воды в виде «белого» тумана, что качественно совпадает с расчетами. Экспериментально определенный коэффициент теплопередачи при испарении капли воды при контактом теплообмене – 0,145 кВт/м²°С почти в 1,5 раза меньше коэффициента теплопередачи через стальную стенку в аналогичных условиях. Такое соотношение определяется высоким термическим сопротивлением паровой прослойки, окружающей каплю воды.

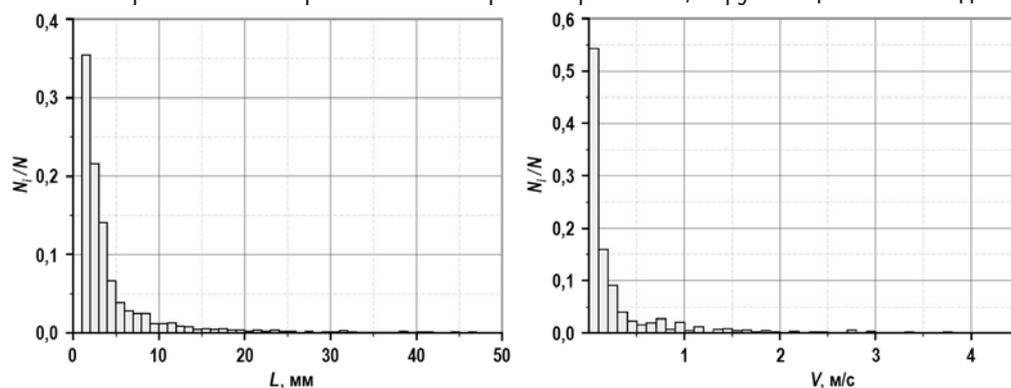


Рис. 3. Гистограммы распределения размеров и скорости всплытия паровых пузырей: расход воды через насадку 2,35, ЭКД2, заглубление под уровень свинца 1740 мм

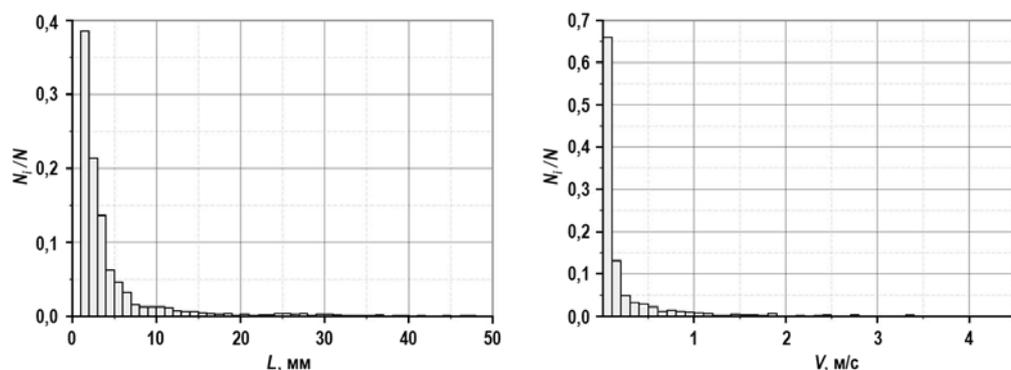


Рис. 4. Гистограммы распределения размеров и скорости всплытия паровых пузырей: расход воды через насадку 3,25, ЭКД2, заглубление под уровень свинца 1740 мм

Пульсации температуры в двухкомпонентном потоке, определенные термодинамическим зондом, перестают фиксироваться на подъемном участке потока выше заглублиения насадки ввода «легкой» фазы на 0,4 – 0,5 м. Это объясняется диспергацией капель воды до размера 0,5 мм и менее, при котором их перестают фиксировать микротермопары термозонда.

Самопроизвольное возрастание свободного уровня свинцового теплоносителя в контуре стенда ФТ-4 НГТУ (расход свинца до 2000 т/ч, температура 440 – 500°C, масса ТЖМТ около 10 тонн) фиксировалось при проведении испытаний моделей главного циркуляционного насоса (ГЦН) РУ БРЕСТ-ОД-300. В конструкции этого насоса участок отвода выполнен в виде «трубы постоянного напора», переливаясь из которой струи свинца падают на свободную поверхность теплоносителя и захватывают газовую фазу, транспортируя ее далее с потоком свинца. Через 1 – 1,5 ч работы стенда устанавливается динамическое равновесие между захватываемым и сепарирующимся из ТЖМТ газом.

«Набухание» свободного уровня составляло 150 – 200 мм, что соответствует 0,15 – 0,2 м³ расплава свинца. Расходомер стенда фиксировал увеличение объемного расхода теплоносителя при неизменном крутящем моменте, мощности и скорости вращения вала электродвигателя насоса. Время снижения свободного уровня теплоносителя в контуре до исходного после остановки электронасоса составило около двух часов.

При проведении в НГТУ экспериментов по определению характеристик теплообмена при поперечном обтекании труб 17×3,0 мм свинцовым теплоносителем были проведены исследования с вводом газа и пара в поток ТЖМТ перед экспериментальным участком [6], показавшие резкое изменение характеристик теплообмена в этом режиме. При введении в поток «легкой» фазы с расходом от 11,4 до 186 происходит резкое снижение температур наружной и внутренней стенок поверхностей теплообмена. Затем эти температуры резко возрастают, после чего циклический процесс повторяется. Фиксируются пульсации этих температур с постоянным периодом колебаний. Средняя амплитуда колебаний внешней (нагреваемой) поверхности трубок ($A_{нар} = 5^\circ\text{C}$) больше, чем внутренней (теплоотводящей) поверхности. При прекращении подачи газа амплитуда колебаний температуры снижается, после чего фиксируется ее стабилизация. При увеличении расхода «легкой» фазы до 250 первоначально возникают пульсации температур, описанные выше, затем при продолжении подачи с этим же расходом «легкой» фазы температуры внутренней и наружной стенок выравниваются, температурный напор становится равным нулю, что соответствует прекращению теплопередачи через поверхности трубки. При прекращении подачи «легкой» фазы в поток ТЖМТ в стенках появляются и возрастают пульсации температур амплитудой $A_{нар} = 8^\circ\text{C}$, $A_{вн} = 6^\circ\text{C}$ с периодом колебаний – 14,8 с. Длительные циклические колебания температур стенки теплообменных трубок могут привести к ее усталостному разрушению, что необходимо учитывать при проектировании трубной системы парогенератора в части его ресурсной работоспособности и надежности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ и результаты экспериментов подтверждают принципиальную возможность продолжения эксплуатации РУ с ТЖМТ при возникновении аварийной ситуации «межконтурная неплотность парогенератора» с расходом поступающих в реакторный контур воды (пара) в эксплуатационно-безопасных пределах. Максимально допустимая величина определяется типом, мощностью установки и типом парогенератора.

Литература

1. Безносков А.В., Чурюмов В.И., Серов В.Е., Леонов В.Н., Смирнов В.П. Межконтурная неплотность парогенератора в контуре охлаждения реактора свинцовым теплоносителем /

/ Ядерная энергия и безопасность человека. Реферат № Е93. IV Ежегодная конференция ядерного общества РФ – Н. Новгород, 1993. С. 552-555.

2. Безносов А.В., Пинаев С.С., Давыдов Д.В., Молодцов А.А., Бокова Т.А., Мартынов П.Н., Рачков В.И. Экспериментальные исследования характеристик контактного теплообмена свинцовый теплоноситель - рабочее тело // Атомная энергия, - 2005. - Т. 98. - Вып. 3. - С. 182-187.

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

4. Безносов А.В., Бокова Т.А., Новожилова О.О., Матюнин А.К., Химич В.Л., Пичков С.Н. Экспериментальные исследования процессов, сопровождающих аварию «Межконтурная неплотность ПГ» в РУ с ТЖМТ // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 2012. - №4. - С. 92-101.

5. Безносов А.В., Бокова Т.А. Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет. - 2012. - 536 с.

6. Безносов А.В., Бокова Т.А., Боков П.А. Технология и основное оборудование контуров реакторных установок, промышленных и исследовательских стендов со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. / Нижегородский государственный технический университет. – Нижний Новгород: Литера. - 2016. - 486 с.

7. Справочник по теплогидравлическим расчетам. / Под ред. Б.С. Петухова. Т. 1. - М.: Энергоатомиздат. - 1987. - 360 с.

8. Кириллов П.Л., Богословская Г.П. Тепломассообмен в ядерных энергетических установках. - М.: Энергоатомиздат. - 2000. – 456 с.

9. Безносов А.В., Новожилова О.О., Молодцов А.А., Савинов С.Ю., Бокова Т.А., Химич В.Л. Характеристики теплообмена моделей поверхностей активной зоны и парогенератора при регулировании содержания примеси в контуре со свинцовым теплоносителем // Атомная энергия. - 2008. - Т. 104, вып. 2. - С. 74-80.

10. Безносов А.В., Ярмонов М.В., Новожилова О.О., Зудин А.Д., Черныш А.С. Экспериментальные исследования теплогидравлических характеристик потока при поперечном обтекании труб парогенератора свинцовым теплоносителем // Атомная энергия. - 2015. - Т. 118. - № 5. - С. 266-271.

11. Безносов А.В., Степанов В. С., Леонов В.Н. Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике. Н. Новгород, 2008. - 690 с.

12. Безносов А.В., Боков П.А., Новожилова О.О., Бокова Т.А., Соловьев А.О. Проблемы регулирования температуры расплава свинца на экспериментальном стенде ФТ-4 НГТУ // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. - 2015. - № 1. - С. 134-138.

13. Безносов А.В., Дроздов Ю.Н., Антоненков М.А., Бокова Т.А., Львов А.В., Лемехов В.В. Экспериментальное исследование проточной части модели осевого главного циркуляционного насоса реакторной установки с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем // Вестник машиностроения. - 2014. - № 2. - С. 53-56.

14. Безносов А.В., Новожилова О.О., Молодцов А.А., Ярмонов М.В., Боков П.А., Назаров А.В. Реакторные установки с горизонтальными парогенераторами // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. - 2013. - № 3. - С. 131-134.

15. Безносов А.В., Львов А.В., Боков П.А., Лемехов В.В., Ларькина Ю.А. Ядерная энергетическая установка / Патент на полезную модель RUS 123183 25.06.2012.

Поступила в редакцию 11.03.2016 г.

Авторы

Безносов Александр Викторович, профессор

E-mail: beznosov@nntu.nnov.ru

Бокова Татьяна Александровна, доцент

E-mail: beznosov@nntu.nnov.ru

Новожилова Ольга Олеговна, доцент

E-mail: beznosov@nntu.nnov.ru

Мелузов Александр Георгиевич, доцент

E-mail: beznosov@nntu.nnov.ru

Метринский Роман Андреевич, магистрант
E-mail: beznosov@nntu.nnov.ru

Новинский Эрнест Георгиевич, главный специалист
E-mail: novinsky@okbm.nnov.ru

UDC 621.039

EXPERIMENTAL STUDIES INTO THE PROCESSES ACCOMPANYING AN INTERCIRCUIT STEAM GENERATOR BREAK IN THE SAFE OPERATING LIMITS IN HLMC REACTOR FACILITIES

Beznosov A.V. *, Bokova T.A. *, Novozhilova O.O. *, Meluzov A.G. *, Metrinsky R.A. *, Novinsky E.G. **

* NSTU n.a. R.E. Alekseev

24, Minin str., Nizhnij Novgorod, 603950 Russia

** JSC «Africantov OKB Mechanical Engineering»

15, Burnakovskiy proezd, Nizhny Novgorod, 603074 Russia

ABSTRACT

The results of the processes accompanying emergency «leakage of the steam generator (SG) between circuits» in the operating and safety limits in the reactor facilities with lead and lead-bismuth coolant (HLMC). Consumption of water, steam, entering through leaks in the coolant, consistent bubble and, in part, flare regimes expiration with the simulation conditions of the steam generator operation. Varied water flow regimes, the steam through the expiration of the holes of different geometry in the pipe system of SG, through a side opening in the narrowed portion of the ejector in the working gap of the labyrinth-screw pump with simulations varying degrees of dispersion bubbles «easy» phase in the coolant. The temperature of the molten lead was 400 – 550°C, pressure – 0,1 – 4,0 kgf²/cm, the water temperature at the inlet to the experimental plot 20°C, water pressure – 0,2 – 8,0 kgf²/cm, the water flow introduced into the liquid metal coolant – 0,5 – 200 kg/hr continuous steam pressure on the free surface of the coolant lead to 10.0 m³/m²·hr.

To vary the geometry of the flow channels of two-component streams: HLMC -water, steam, as well as design elements, streamlined two-component stream.

The results of analysis of investigation confirms the continuing ability exploitation the reactor plant with HLMC when the «leak the steam generator between circuits» crash occurs, with water and steam flow in exploitation-safety limits.

During such reactor circuit crash the pipes of steam generator system are exposed by strong temperature cycle vibrations. These vibrations could lead to fatigue damage of the pipes. It should be considered in designing of the steam generator system pipes in part of its resource and safety.

Key words: steam leak between circuits, HLMC RP, coolant, heat exchange.

REFERENCES

1. Beznosov A.V., Churyumov V.I., Serov V.E., Leonov V.N., Smirnov V.P. Steam leak in the cooling circuit of the torus-reactions coolant lead. *Nuclear energy and human security*. Abstract number E93. *The 4th Annual Conference of the nuclear Society RF*. Nizhny Novgorod. 1993, pp. 552-555 (in Russian).
2. Beznosov A.V., Pinaev S.S., Davydov D.V., Molodtsov A.A., Bokova T.A., Martynov P.N., Rachkov V.I. Experimental studies of the characteristics of the contact heat exchange lead coolant - working body. *Atomnaya Energiya*. 2005, v. 98, no. 3, pp. 182 – 187 (in Russian).

3. Beznosov A.V., Bokova T.A., Molodcov A.A. Experimental investigations of processes accompanying intercontinental-temperature-leak steam generator with a lead and lead-bismuth-coolant. Teleconference and optimization of its design. *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2006, no. 4, pp. 3 – 18 (in Russian).
4. Beznosov A.V., Bokova T.A., Novozhilova O.O., Matyuhin A.K., Himich V.L., Pichkov S.N. Experimental studies of the processes accompanying the accident «SG leakage between circuits» in the RP with HLMC. *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2012. no. 4, pp. 92 – 101 (in Russian).
5. Beznosov A.V., Bokova T.A. The power circuit equipment with heavy liquid metal coolant in the nuclear industry. Nizhny Novgorod. Nizhny Novgorod State Technical University Publ., 2012. 536 p. (in Russian).
6. Beznosov A.V., Bokova T.A., Bokov P.A. Technology and outlines the basic equipment of reactor plants, industrial and research stands with lead and lead-bismuth coolant. Nizhny Novgorod. Litera Publ., 2016. 486 p. (in Russian).
7. Petukhov B.S. Handbook of thermal-hydraulic calculations. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1987. 360 p. (in Russian).
8. Kirillov P.L. Bogoslovskaya G.P. Heat and mass transfer in nuclear power plant. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2000. 456 p. (in Russian).
9. Beznosov A.V., Novozhilova O. O., Molodtsov A. A., Savinov S. Yu., T. A. Bokova, Khimich V. L. Characteristics of heat transfer of surface models of the active zone and the steam generator at the regulation of the NII of content of impurities in circuit with lead coolant. *Atomnaya Energiya*. 2008, v. 104, no. 2, pp. 74-80 (in Russian).
10. Beznosov A.V., Aronov M. V., Novozhilova O.O., Zudin A.D., Chernysh A.S. Experimental study of thermal-hydraulic characteristics of flow at a cross flow tubes steam-generator lead coolant. *Atomnaya Energiya*. 2015, v. 118, no. 5, pp. 266-271 (in Russian).
11. Beznosov A.V., Stepanov V.S., Leonov V.N. Equipment power circuits with heavy liquid metal coolants in nuclear power. Nizhny Novgorod, 2008. 690 p. (in Russian).
12. Beznosov A.V., Bokov P.A., Novozhilova O.O., Bokova T.A., Soloviev O.A. Problems highway control-of the temperature of the melt of lead at the test bench FT-4 NSTU. *Proceedings of NSTU n.a. R. E. Alekseev*. 2015, no. 1, pp. 134-138 (in Russian).
13. Beznosov A.V., Drozdov Yu. N., Antonenkov M. A., Bokova T. A., Lvov A.V., Lemekhov V.V. Experimental study of the flow part of axial pumps main circulation-sa reactor installations with heavy liquid metal coolant. *Vestnik mashinostroeniya*. 2014, no. 2, pp. 53-56 (in Russian).
14. Beznosov A.V., Novozhilova O.O., Molodtsov A.A., Aronov M.V., Bokov P.A., Nazarov A.V. Reactor plant with horizontal steam generators. *VANT. Ser. Fizika Yadernykh Reaktorov*. 2013, no. 3, pp. 131-134 (in Russian).
15. Beznosov A.V., Lvov V.A., Bokov P.A., Lemehov V.V., Lar'kina Y.A. Nuclear power plant. Patent for useful model RUS 123183 25.06.2012 (in Russian).

Authors

Beznosov Alexander Viktorovich, Professor

E-mail: beznosov@nntu.nnov.ru

Bokova Tatiana Alexandrovna, Assistant Professor

E-mail: tatabo@bk.ru

Novozhilova Olga Olegovna, Assistant Professor

E-mail: oo.novozhilova@gmail.com

Meluzov Alexander Georgievich., Assistant Professor

E-mail: meluzov@mail.ru

Metriskiy Roman Andreyevich, Undergraduate

E-mail: rmetriskiy@mail.ru

Novinsky Ernest Georgievich., Chief Specialist

E-mail: novinskiy@okbm.nnov.ru