

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ АВАРИЮ «МЕЖКОНТУРНАЯ НЕПЛОТНОСТЬ ПГ» В РУ С ТЯЖЕЛЫМИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

**А.В. Безносков, Т.А. Бокова, О.О. Новожилова, А.К. Матюнин,
В.Л. Химич, С.Н. Пичков**

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород*



Представлены результаты анализа экспериментов и расчетно-теоретических исследований процессов, сопровождающих потенциально опасную аварийную ситуацию «межконтурная неплотность парогенератора (ПГ)» в реакторных установках со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. Приведены результаты исследований процессов при возникновении микротечей, эксплуатационно-допустимой и большой течи рабочего тела в реакторный контур, рекомендации по действиям эксплуатационного персонала при подобных авариях. Представлен обзор экспериментальных исследований, выполненных в НГТУ, по структуре и характеристикам двухкомпонентных потоков при различных расходах рабочего тела в поток свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей при их температуре до 600°C, скоростях потока от 0,1 до 5,0 м/с, содержании «легкой» фазы от 1–3 до 50% объемных.

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, парогенератор, межконтурная неплотность ПГ, течь, отверстие истечения, струйное истечение, пузырьковое истечение, экспериментальные исследования.

Key words: fast reactor, steam generator, intercontour leak of a steam generator, leak, holes outflow, jet flow, bubble flow, experimental studies.

ВВЕДЕНИЕ

В реакторных контурах со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителем авария «межконтурная неплотность парогенератора» является одной из наиболее потенциально опасных. По мнению специалистов, последствия такой аварии привели к разрушению активной зоны одного из реакторов отечественной АПЛ проекта 645 и вывода ее из эксплуатации. Подобная авария произошла на одной из отечественных серийных АПЛ проекта 705.

© **А.В. Безносков, Т.А. Бокова, О.О. Новожилова, А.К. Матюнин, В.Л. Химич, С.Н. Пичков, 2012**

При возникновении такой аварии должно быть исключено поступление воды и ограничено поступление водяного пара с потоком свинцового или свинцово-висмутного теплоносителя в активную зону реактора на быстрых нейтронах во избежание неуправляемого увеличения реактивности и мощности реактора. В проектах установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) в парогенераторах контура рабочего тела рабочее давление составляет от 40 до 160 – 240 кгс/см² при давлении в реакторном контуре, незначительно превышающем 1,0 кгс/см² (ата). При аварийном поступлении воды и (или) пара в реакторный контур должна быть исключена его переопрессовка во избежание разрушения его элементов, либо реакторный контур должен выдерживать давление рабочего тела, что технически сложно и дорого.

Менее опасно потенциальное влияние других процессов, сопровождающих рассматриваемую аварию, на потребительские качества реакторного контура (рис. 1).

Признаками аварии «межконтурная неплотность ПГ» в зависимости от схемных и конструктивных решений реакторного контура могут быть появление и накопление в конденсаторах пара, другом оборудовании и трубопроводах системы газа; колебание и возрастание свободного уровня ТЖМТ в оборудовании контура (в реакторном блоке); увеличение радиоактивности (гамма-активности и др.) в системе газа за счет выхода радиоактивных примесей из теплоносителя и с поверхностей контура в паровые пузыри, которые затем сепарируются на свободных поверхностях теплоносителя и выходят в объем системы газа; пульсация реактивности и потока нейтронов в активной зоне реактора (по показаниям ионизационных камер), особенно при изменении давления в активной зоне (при изменении числа оборотов главных циркуляционных насосов или давления газа в системе).

С точки зрения контроля за наступлением рассматриваемой аварии и алгоритма действий персонала и систем автоматики целесообразно выделить следующие ситуации.

- Микротечь ПГ, при которой отсутствует заметное возрастание давления в системе газа и возрастание свободного уровня в соответствующем оборудовании контура. В этом случае возможны возрастание и последующая стабилизация влагосодержания в газе системы газа, а также длительный, малозаметный процесс накопления конденсата воды в конденсаторах пара или другом оборудовании системы газа. Особенностью такой аварии является практическая невозможность обнаружения течи и глушения места неплотности, т.к. при осушении соответствующей секции ПГ и снижении в ней температуры возможно «закрытие» отверстия истечения. При данной аварии будет происходить увеличение окислительного потенциала теплоносителя, что способствует доформированию защитных оксидных покрытий на поверхностях конструкционных материалов контура. Каких-либо оперативных действий по уменьшению мощности реакторной установки или ее вывода из действий не требуется.

- Эксплуатационно-допустимая течь ПГ, при которой фиксируются эксплуатационно-допустимые возрастания давления в системе газа и свободного уровня ТЖМТ в соответствующем оборудовании контура. Основным признаком такой аварии является постоянная конденсация пара в конденсаторах пара и другом оборудовании системы газа. За счет диссоциации молекул воды в ТЖМТ будет происходить увеличение окислительного потенциала теплоносителя, что способствует доформированию защитных оксидных покрытий на конструкционных материалах контура. При увеличении окислительного потенциала теплоносителя в «холодных» зонах контура возможно образование твердой фазы оксидов теплоносителя, по-

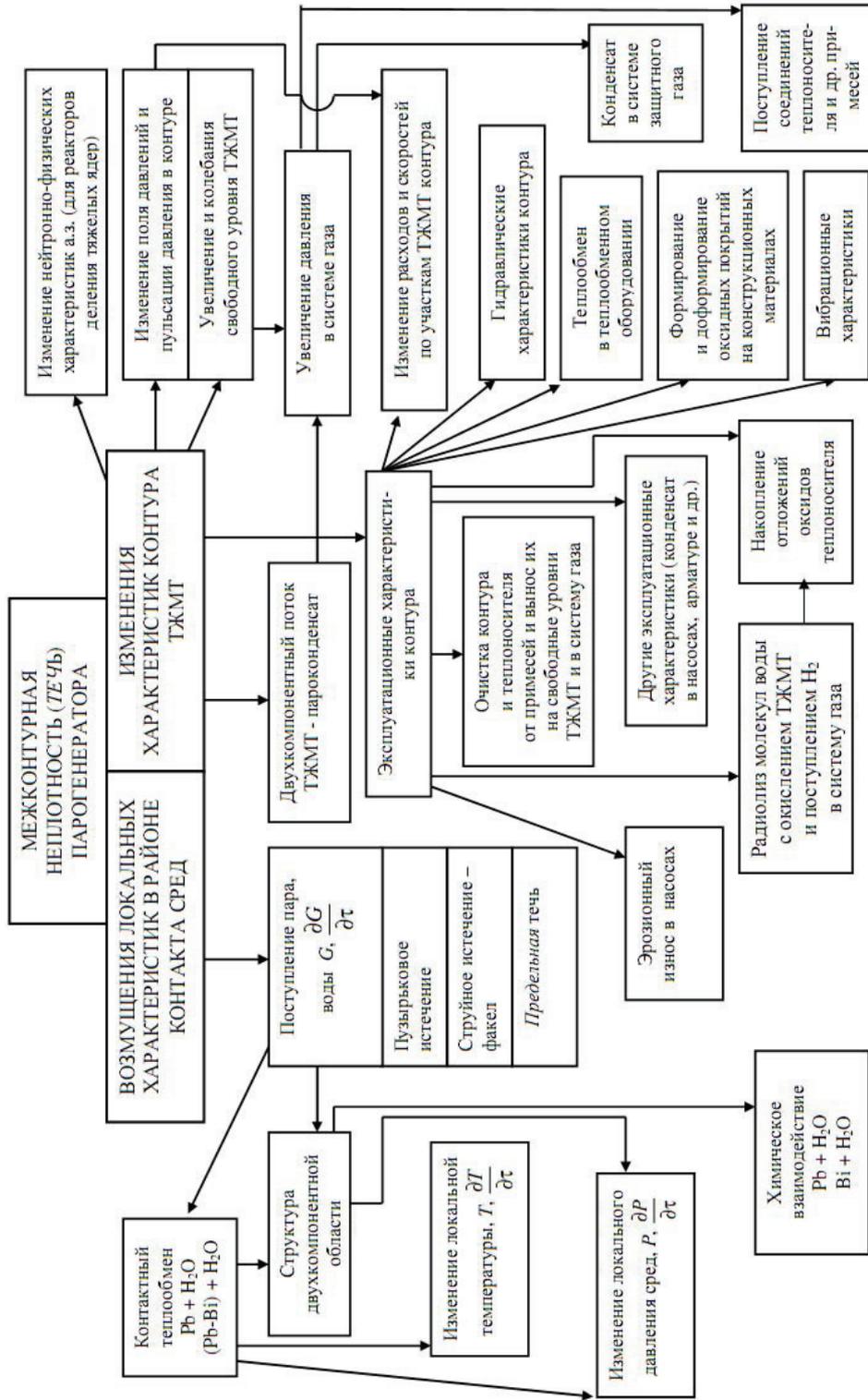


Рис. 1. Блок-схема процессов при течи ПГ

тому в последующем потребуется проведение очистки контура путем обработки его двухкомпонентными восстановительными газовыми смесями. При этом нет необходимости в немедленном прекращении работы контура, т.к. для ПГ с ТЖМТ не характерно самопроизвольное развитие течи парогенератора в отличие от ПГ с натриевым теплоносителем.

- Большая течь ПГ, при которой происходит возрастание свободного уровня теплоносителя до эксплуатационно-недопустимых пределов. При достаточно большом количестве рабочего тела, поступающего в реакторный контур, происходит образование сплошного парового канала от места течи до свободного уровня теплоносителя [1]. Такая авария требует немедленного срабатывания аварийной защиты реактора.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЗЫРЬКОВОГО И СТРУЙНОГО (ФАКЕЛЬНОГО) ИСТЕЧЕНИЯ ВОДЫ И ПАРА В ТЖМТ

В случае пузырькового истечения поступление рабочего тела в объем ТЖМТ осуществляется отдельными пузырьками больших или меньших размеров с тем или иным агрегатным состоянием или сериями пузырей. Проведенные авторами эксперименты показывают, что струйное (факельное) истечение может реализовываться с размерами истечения от сотен микрон до размера, эквивалентного внутреннему диаметру трубки ПГ. В общем случае, в процессе истечения под воздействием возникающих возмущений (бесконечно малых на границе раздела со стороны паровой оболочки и конечных со стороны ТЖМТ) на поверхности струи формируются короткие и длинные (по сравнению с радиусом струи) волны. Амплитуда волн быстро возрастает во времени. Происходит отрыв мелких пузырьков и «распыл» струи за счет возрастания амплитуды коротких волн. Возможен «срыв» и захват капель теплоносителя в паровой объем. При увеличении размера истечения и, соответственно, масштаба струй определяющее влияние на процесс дробления будет оказывать взаимодействие динамического напора струи и рабочего тела с элементами конструкций канала ПГ в районе истечения. Как показывают результаты экспериментов и расчетно-теоретического анализа [1], длина сплошной струи рабочего тела относительно невелика и не превышает средний размер отверстия истечения более чем на два порядка. Образующиеся в результате «распыла» пузыри «легкой» фазы захватываются потоком теплоносителя, формируя двухкомпонентный поток, или всплывают в объем ТЖМТ за счет архимедовых сил.

В НГТУ проведен цикл экспериментальных исследований характеристик отрыва пузырьков и их серий от отверстий истечения, характеристик двухкомпонентного потока ТЖМТ-«легкая» фаза и разрыва пузырей на свободной поверхности свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей. В экспериментах в качестве «легкой» фазы использовались водяной пар, пароводяная смесь, конденсат и газы (Ar, N₂, He и их смеси). Диапазон используемых круглых отверстий истечения составлял от 0,5 до 10,0 мм, плоских щелей (1,0–2,0)×(10–20) мм, перепад давлений на отверстиях истечения от 1,0 до 240 кгс/см², при заглублениях отверстий истечения от свободной поверхности жидкометаллических теплоносителей от 200 до 3500 мм при средних скоростях формирующегося двухкомпонентного потока от 0,0 до 3–5 м/с. Температура теплоносителей варьировалась от 350 до 600°C, «легкой» фазы от 20 до 200–300°C. Контроль за размерами пузырей «легкой» фазы, скоростями их движения в составе двухкомпонентного потока и сериями пузырей осуществлялся электроконтактными времяпролетными (трехэлектродными) датчиками с чувствительностью 0,5–1,0 мм и микротермопреобразователями с

диаметрами чувствительных элементов от 0,3 до 3,0 мм с обработкой сигналов от первичных датчиков на ПК. Варьировались заглубления чувствительных элементов датчиков под свободный уровень ТЖМТ, их ориентация относительно отверстий истечения и положение относительно оси и стенок каналов, ограничивающих двухкомпонентный поток. Процессы разрыва пузырей и «легкой» фазы на свободной поверхности ТЖМТ фиксировались видео- и фотосъемкой. Акустическими датчиками фиксировались моменты образования (истечения и отрыва) одиночных пузырей и их серий, а также последующих разрывов пузырей на свободной поверхности свинца или эвтектики свинцово-висмут в процессе барботажа. Контроль положения и вертикального перемещения – «набухания» и опускания участков свободной поверхности ТЖМТ производился электроконтактными датчиками («свечками»), визуально, а также видео- и фотоаппаратурой.

Примеры информации о размерах скорости всплытия пузырей «легкой» фазы в свинцовом теплоносителе при пузырьковом и струйном истечении представлены на рис. 2 и 3, примеры разрыва пузырей на рис. 4 и 5.

В случае образования межконтурной неплотности ПГ, соответствующей пузырьковому или струйному (факельному) истечению в районе экономайзерного участка, происходит поступление воды через отверстие истечения в реакторный контур. Температура питательной или котловой воды может находиться в диапазоне

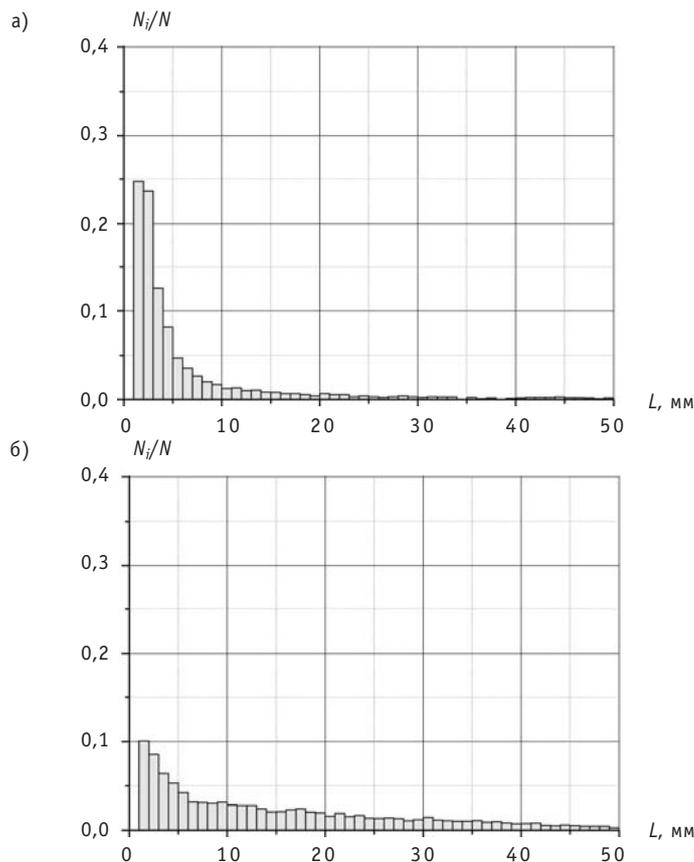


Рис. 2. Гистограмма распределения хорд паровых пузырей, ввод воды, пара через горизонтально ориентированную щель $0,8 \times 10,0$ мм, заглубленную под уровень свинца на 1900 мм, средняя температура свинца 460°C , температура воды – 20°C , средний расход воды – 2 кг/ч: а) – заглубление электроконтактного датчика – 830 мм; б) – заглубление электроконтактного датчика – 1740 мм

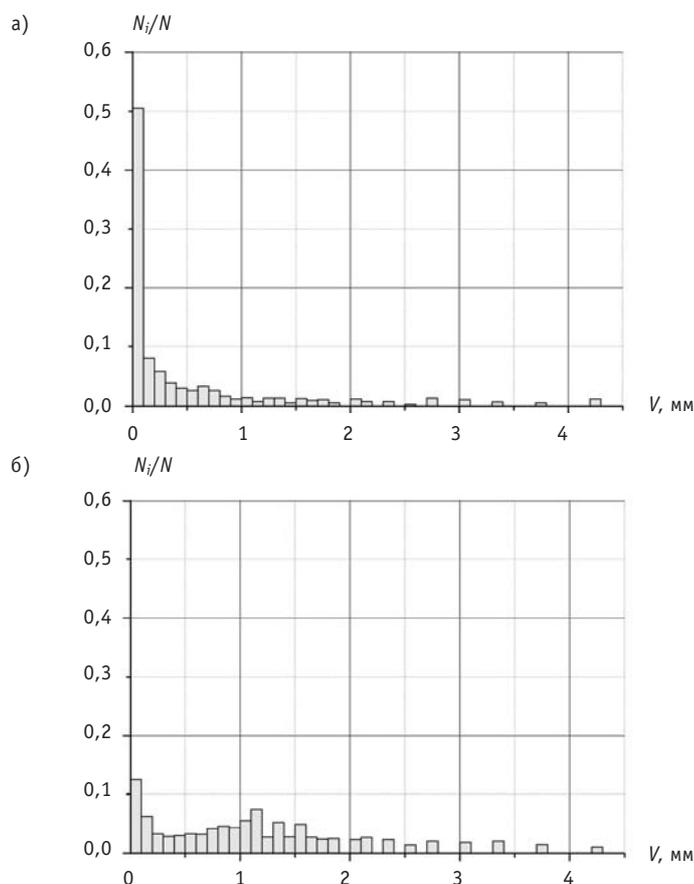


Рис. 3. Гистограмма распределения скорости всплытия паровых (пароводяных) пузырей, ввод воды, пара через горизонтально ориентированную щель $0,8 \times 10,0$ мм, заглубленную под уровень свинца на 1900 мм, средняя температура свинца 460°C , температура воды – 20°C , средний расход воды – 2 кг/ч: а) – заглубление электроконтактного датчика – 830 мм; б) – заглубление электроконтактного датчика – 1740 мм

от 100°C до температуры насыщения при давлении в водяной полости вблизи отверстия истечения ($250\text{--}300^\circ\text{C}$). В потоке воды в канале отверстия истечения и непосредственно за ним вследствие резкого увеличения скорости и на два порядка меньшего давления в реакторном контуре давление в истекающей струе будет уменьшаться. Часть воды в объеме этой струи будет испаряться, деформируя и разбивая струю на капли конденсата, окруженные паровой оболочкой переменной толщины. Температура конденсата в капле уменьшается до значения температуры насыщения при давлении в локальном прилежащем объеме ТЖМТ (если она была выше этой величины). В более вероятном случае размер формирующегося пузыря превышает 0,5 мм, и силами поверхностного натяжения, увеличивающими давление внутри пузыря, можно пренебречь. Объемное вскипание капель конденсата будет стремиться дробить капли конденсата и, соответственно, уменьшать размер пузыря. Чем больше перепад давления на отверстии истечения при «факельном» (струйном) истечении, тем мельче будут пузыри в объеме жидкометаллического теплоносителя (при прочих равных условиях).

В результате этих процессов и процесса теплообмена между ТЖМТ и средами (вода, пар) в пузыре в потоке теплоносителя в реакторном контуре вблизи отверстия истечения формируются пузыри с каплей конденсата, окруженной паровой

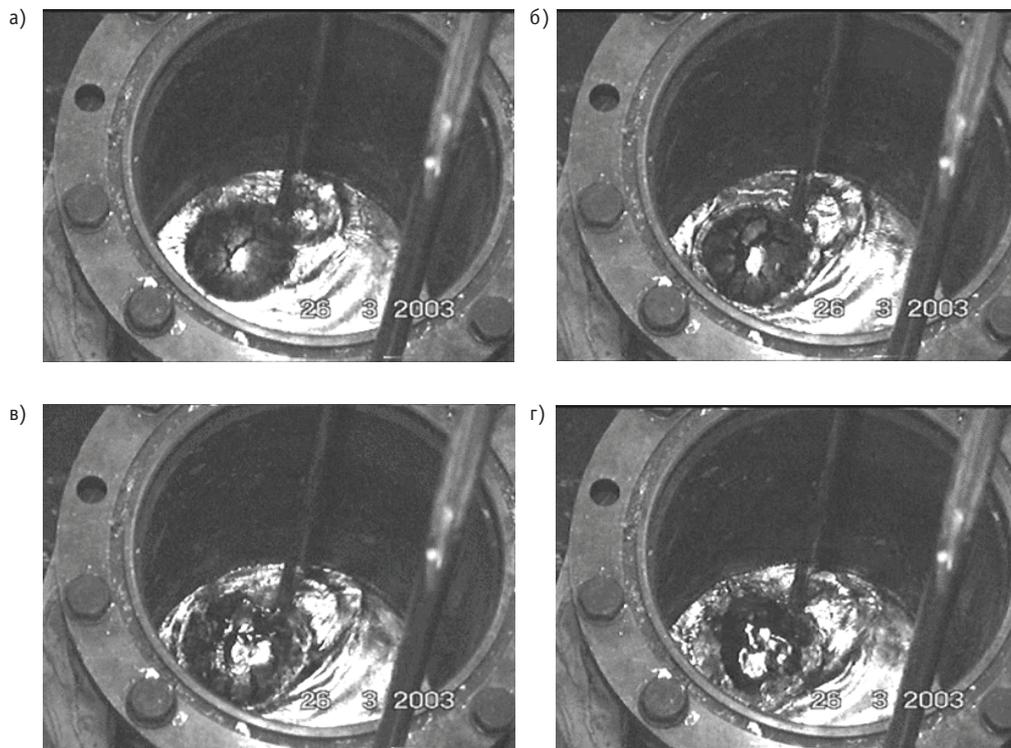


Рис. 4. Последовательные кадры вида свободной поверхности свинца при начале барботаж аргона. Разрыв первого большого пузыря

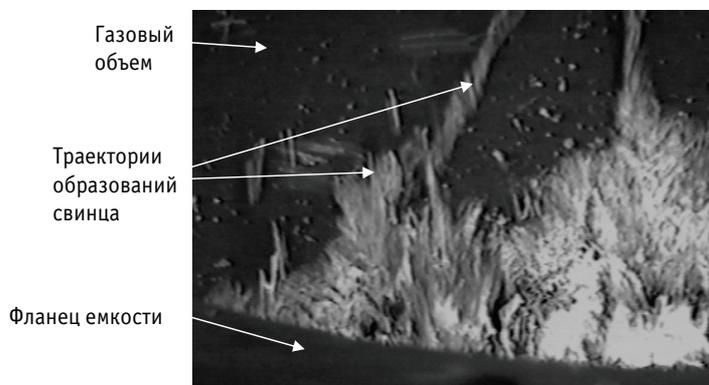


Рис. 5. Фотография газового объема емкости диаметром 350 мм при барботаж аргона через слой свинца толщиной 410 мм. Отверстие истечения – круглое (диаметром 2,0 мм) удельная барботажная нагрузка – $100 \text{ м}^3/\text{дм}^3$ на 1 м^2 поверхности свинца

прослойкой. При дальнейшем движении такого пузыря в составе двухкомпонентного потока теплообмен между ТЖМТ, водой и паром, находящемся в объеме пузыря, осуществляется за счет

- конвективной теплоотдачи от ТЖМТ к пару на границе пузыря;
- конвективного переноса тепла в паровой прослойке от внешней поверхности контакта со свинцом до внутренней поверхности с каплей конденсата;
- передачи тепла излучением от поверхности контакта пузыря с паром (вероятно, в значительной мере покрытой примесями) к объему пара в паровой прослойке и к поверхности капли конденсата;

- конвективного теплообмена внутри капли конденсата.

Температура пара в пузыре близка к температуре насыщения при давлении внутри пузыря. После завершения испарения капли конденсата начинается перегрев пара. В процессе испарения и перегрева объем пузыря увеличивается. В момент разрыва пузыря на свободной поверхности ТЖМТ возникают динамические эффекты с волнообразованием, пульсациями давления и вибрациями оборудования контура.

В процессе экспериментов с вводом пара, газа, воды в ТЖМТ при рассматриваемых режимах истечения практически всегда фиксируется пульсирующий характер истечения «легкой» фазы из отверстия истечения – пузыри поступают в объем теплоносителя сериями.

Выполненные в НГТУ расчетно-теоретические и экспериментальные исследования [2, 3] показывают, что исходя из зависимости скорости всплытия от размеров пузырей и расчетной длительности испарения рабочего тела можно определить расстояние, которое могли бы пройти (не сепарируясь) капли рабочего тела до полного испарения (рис. 6).

Проведенные эксперименты показали, что капли воды с начальной температурой 20–110°C размером в несколько миллиметров полностью испаряются, всплывая в свинце с температурой 400–500°C на пути в несколько метров.

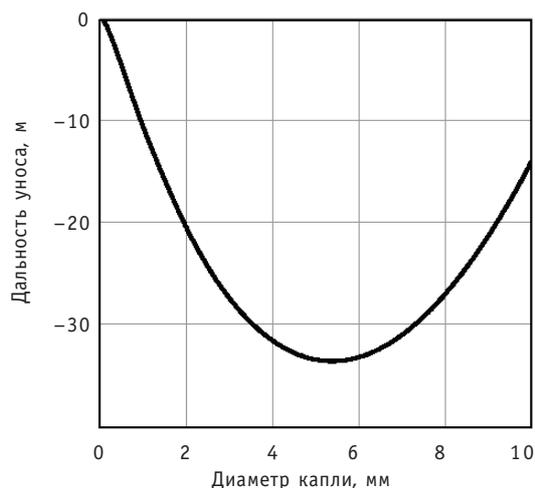


Рис. 6. Дальность уноса пузырей до полного испарения

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТЕЧЕНИЯ С НЕУПОРЯДОЧЕННОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА ТЖМТ И РАБОЧЕГО ТЕЛА И С ОБРАЗОВАНИЕМ СПЛОШНОГО КАНАЛА ВОДЯНОГО ПАРА ОТ МЕСТА ИСТЕЧЕНИЯ ДО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЖМТ

Проведенные в НГТУ эксперименты с подачей водяного пара и воды под давлением до 240 кгс/см² в «свободный» и затесненный объем свинца с температурой до 600°C с заглублением отверстия истечения диаметром 10 мм под уровень свинца до 3,5 м показали следующее. В кольцевом зазоре между трубкой 14×2 мм и соосной трубкой 54×4 мм, установленной в емкости диаметром ~300 мм, средняя скорость подъема фронта раздела свинца и водяного пара составила около 30 м/с на высоте 1,5 м выше отверстия истечения при расходе пара 20–50 кг/с. Поверхность фронта имела существенную неравномерность по высоте в поперечном

сечении канала. Фиксировались значительные динамические (ударные) нагрузки на элементы конструкции, приводящие к их разрушению. После установки в кольцевой зазор подъемного участка фронта дроссельной решетки с коэффициентом сопротивления ~ 10 , имитирующей сопротивление трубной системы ПГ, скорость подъема фронта снизилась до 4,0–6,0 м/с (при прочих равных условиях), т.е. более чем в пять раз. Динамические (ударные) нагрузки практически исчезли. Вероятно, в месте установки дросселя происходила гомогенизация смеси свинец—рабочее тело, замедление и уменьшение скорости подъема фронта. При подаче пара в кольцевой зазор (наряду с описанным верхним фронтом) фиксировался нижний (опускной) фронт с аналогичными характеристиками.

В процессе исследований с самопроизвольным формированием сплошного парового (газопарового) канала от места истечения до свободной поверхности ТЖМТ варьировались заглубления отверстий истечения до свободной поверхности от 200 до 1500–2000 мм. При этом подача «легкой» фазы производилась в «свободный» объем теплоносителя и в объем, затесненный вертикальными трубками с давлением пара перед отверстием истечения до 80 кгс/см². В начальный момент истечения в процессе образования сплошного парового канала происходил выброс тяжелого жидкометаллического теплоносителя из объема над участком поступления пара в объем над свободным уровнем ТЖМТ. На рисунке 7 представлены последовательные видеок кадры верхней части емкости с трубной системой, одна из труб которой сообщалась с генератором насыщенного пара при давлении 80 кгс/см². Крышка емкости была демонтирована, емкость была накрыта слоем стеклоткани, и свободная поверхность ТЖМТ сообщалась с атмосферой помещения. Перепад давления на отверстии истечения диаметром 1,0 мм составлял около 80 кгс/см², температура свинца $\sim 450^\circ\text{C}$. После образования сплошного парового канала процесс стабилизируется. Из емкости выбрасывалась смесь мелкодисперсной фазы свинца в объеме пара. Свинец захватывается со стенок парового канала, дробится на мелкие фракции и транспортируется паровым потоком в виде мелкодисперсной фазы. Остаточных деформаций трубок, расположенных вблизи отверстия истечения, а также каких-либо разрушений элементов дистанционирующих трубок не обнаружено.

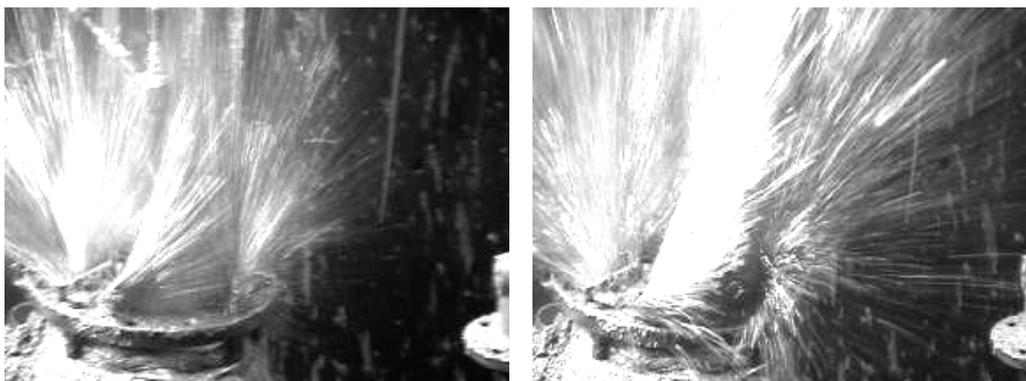


Рис. 7. Два кадра (через 0,08 с) в процессе выброса капель свинца из экспериментальной емкости

По результатам анализа результатов экспериментальных и расчетно-теоретических исследований авторами была предложена конструктивная схема ядерной энергетической установки с ТЖМТ с горизонтальными парогенераторами [3], которая исключает поступление воды и водяного пара в активную зону реактора и переопрессовку реакторного контура при возникновении аварии «межконтурная

неплотность ПГ» при любом возможном расходе истечения рабочего тела в реакторный контур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты представленных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований рекомендуется использовать при разработке проектной и эксплуатационной документации реакторных установок со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. Для развития данной тематики рекомендуется проведение работ по исследованию напряженно-деформированного состояния моделей труб ПГ при аварии «межконтурная неплотность ПГ». Исследования планируется проводить, контролируя содержание термодинамической активности кислорода в теплоносителе, с применением массообенников различных конструкций.

Работа проводилась в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Литература

1. Безносков А.В. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Т.А. Бокова. – Н.Новгород: Литера, 2012. – 535 с.: ил.
2. Безносков А.В. Экспериментальные исследования процессов, сопровождающих межконтурную неплотность парогенератора со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителем, и оптимизация его конструкции / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.А. Молодцов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – № 4. – С. 3-18.
3. Безносков А.В. Экспериментальные исследования характеристик контактного теплообмена свинцовый теплоноситель – рабочее тело / А.В. Безносков и др. // Атомная энергия. – 2005. – Вып. 3. – Т. 98. – С. 182-187.

Поступила в редакцию 12.04.2012

УДК 621.039.58: 356.24

Thermodynamic Cycles of NPPs Operated with Supercritical Water \V.M. Abdulkadyrov, G.P. Bogoslovskaya, V.A. Grabejnaya; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 7 pages, 1 illustration. – References, 22 titles.

УДК 621.039.586

Experimental Researches of the Processes Accompanying an Accident «The Intercontour Leak of a Steam Generator» for Fast Reactor with HLMC \A.V. Beznosov, T.A. Bokova, O.O. Novozhilova, A.K. Matjunin, V.L. Khimich, S.N. Pichkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 10 pages, 7 illustrations. – References, 3 titles.

Results of experimental and settlement-theoretical studies of the processes accompanying an intercontour leak of a steam generator for power installations on lead or lead-bismuth coolants are presented. The results of research the processes of appearing a micro-, operational and acceptable, and a large leak of the working body in the reactor loop and recommendations of the actions of operational personnel in similar accidents are given. A review of experimental studies carried out at NNSTU on the structure and characteristics of two-component flows at different flow the working body in the flow of lead and lead-bismuth coolant at a temperature of 600 °C, flow rates from 0.1 to 5.0 m/s, the content «light» phase 1–3% to 50% by volume is presented.

УДК 621.039.534

The Use of Coolants Pb and Pb-Bi in the New Technologies of Recycling Solid, Liquid and Gaseous Media \V.V. Ulyanov, V.A. Gulevsky, P.N. Martynov, A.S. Fomin, V.M. Shelemetev, R.P. Sadovnichy, S.-A.S. Niasov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 8 pages, 1 table, 5 illustrations. – References, 7 titles.

The results of studies demonstrating promising use of heavy liquid metal Pb and Pb-Bi in the new technologies of production steam, fresh water, light oil fractions, hydrogen, synthesis gas, and other technology products.

Developed and tested model samples vaporizer and water desalination with direct-contact liquid metal heat input. The test results showed the advantages the developed prototypes over direct-contact models developed in Japan.

Manufactured and tested demonstration samples hydrogen generators based on the processes of electrochemical decomposition of water and oxide conversion of hydrocarbon gases in the lead coolant. Revealed that more preferable to the further development is the hydrogen generator based on electrochemical decomposition of water.

Substantiated perspective of studying the processes of interaction oil products (fuel oil, bottoms, tar sands, etc.) with heavy coolant in terms of depth of refining oil and oil products.

УДК 621.039.53

Structural Studies of 15H2NMF AA Steel and its Welds after Long Thermal Exposures and Irradiation at the Operating Temperature of Reactor Pressure Vessel \B.A. Gurovich, E.A. Kuleshova, D.A. Maltsev, S.V. Fedotova, A.A. Frolov, O.O. Zabusov, M.A. Saltykov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 12 pages, 6 tables, 7 illustrations. – References, 8 titles.

A complex of microstructural studies (TEM, SEM and Auger) of VVER-1000 surveillance samples of the temperature sets in the initial state, after long thermal exposures (up to 180 000 hours) and irradiation was conducted in this paper.

It was shown that in non-irradiated elements of RPV the critical brittleness temperature shift can be caused by the development of reversible temper brittleness. Herewith its contribution to the total embrittlement of the material increases with increasing of operation time and can be decisive at extending the lifetime of VVER-1000 RPV up to 60 years and more. The level of grain-boundary segregations in various states was established. It is experimentally shown that radiation-enhanced diffusion of phosphorus to grain boundaries is observed in RPV steels.