

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ МЕЖКОНТУРНУЮ НЕПЛОТНОСТЬ ПАРОГЕНЕРАТОРА СО СВИНЦОВЫМ И СВИНЕЦ-ВИСМУТОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ, И ОПТИМИЗАЦИЯ ЕГО КОНСТРУКЦИИ**

**А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.А. Молодцов**

*Нижегородский государственный технический университет, г. Нижний Новгород*



В реакторных установках со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителем одной из наиболее потенциально опасных аварийных ситуаций является межконтурная неплотность парогенератора. При такой аварии пар, пароводяная смесь или вода из контура рабочего тела с давлением 60–240 кгс/см<sup>2</sup> через неплотность в трубной системе с размером, определяемым размером неплотности, поступает в контур с давлением жидкого металла 0,1–10,0 кгс/см<sup>2</sup> и температурой 400–500°С.

Конечной целью проводимых в Нижегородском государственном техническом университете (НГТУ) экспериментальных и расчетно-теоретических исследований процессов, сопровождающих такую аварийную ситуацию, является разработка рекомендаций по проектированию и эксплуатации максимально безопасных конструкций парогенераторов, принципиальных схем и компоновок контуров, в которые они входят. Аналогичные исследования проводились в ГНЦ РФ-ФЭИ.

Задачи работы:

- исследование локальных и интегральных характеристик процессов, сопровождающих течь парогенератора;
- исследования воздействия указанных процессов и их характеристик на элементы парогенератора, другого оборудования жидкометаллического контура и контура в целом;
- разработка экспериментально обоснованных рекомендаций и предложений по конструктивным схемам наиболее безопасных парогенераторов с точки зрения рассматриваемой аварии;
- разработка рекомендаций и предложений по схемным и компоновочным решениям жидкометаллического контура и газовой системы, обеспечивающих безопасную локализацию рассматриваемой аварийной ситуации при любом гипотетически возможном расходе сред, поступающих в жидкий металл, в том числе, в сочетании с другими авариями.

© А.В.Безносков, Т.А.Бокова, А.А.Молодцов, 2006

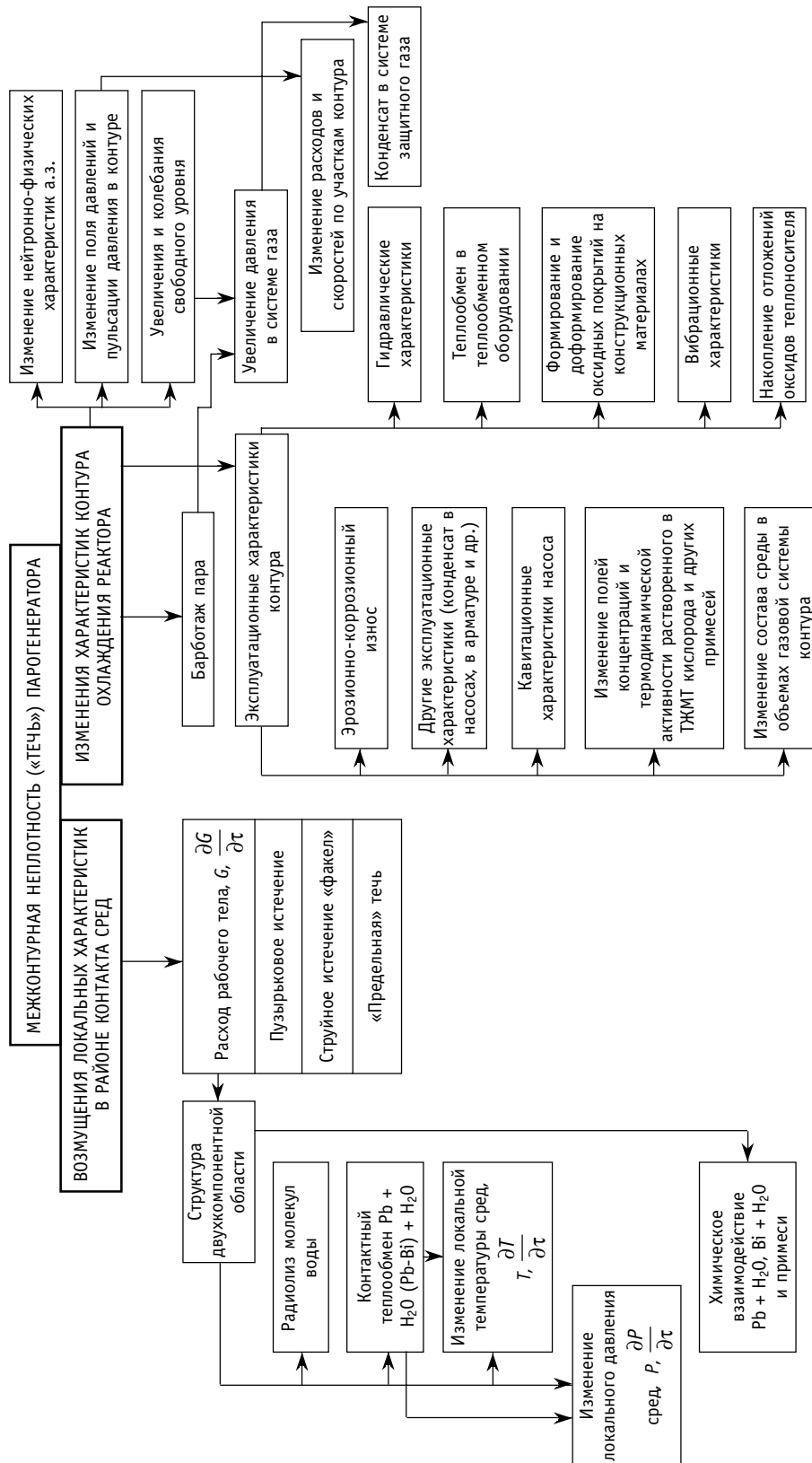


Рис. 1. Блок-схема процессов при течи ПТ

На рис. 1 представлена блок-схема процессов, сопровождающих межконтурную неплотность парогенератора. Основными наиболее потенциально опасными воздействиями аварийной ситуации на реакторный контур, которые необходимо минимизировать или исключить, являются поступление воды в активную зону реактора на быстрых нейтронах и переопрессовка контура.

В НГТУ экспериментально и расчетно-теоретически исследовались характеристики процессов при следующих основных режимах истечения «легкой» фазы в жидко-металлический теплоноситель: 1 – при пузырьковом истечении; 2 – при струйном (факельном) истечении; 3 – при истечении с образованием полостей и каверн «легкой» фазы в жидком металле с неупорядоченной геометрией поверхностей их раздела; 4 – при образовании сплошного канала «легкой» фазы от места истечения до газового (парогазового) объема над свободной поверхностью жидкометаллического теплоносителя. Под «легкой» фазой, кроме отдельно оговоренных случаев, понимается фаза с плотностью меньшей в 10 и более раз, чем плотность жидкого металла.

Экспериментально исследовались характеристики отрыва пузырьков или их серий от отверстий истечения, течения двухкомпонентного потока и разрыва пузырей на свободной поверхности жидкого металла. В качестве «легкой» фазы, барботируемой через слой свинцового или свинец-висмутового теплоносителя использовались аргон, гелий, водород, их смеси, водяной пар, пароводяная смесь, конденсат. Диапазон диаметров отверстий истечения составляли от 0,5 до 3,0 мм, перепада давлений на отверстиях истечения от 1,0 до 240 кгс/см<sup>2</sup>, заглублений отверстий истечения от свободной поверхности жидкого металла в затесненном и свободных объемах – от 200 до 3500 мм. Температуры жидкого металла от 350 до 600°C, «легкой» фазы – 200–300°C.

Контроль за характеристиками процессов осуществлялся электроконтактными времяпролетными (трехэлектродными) датчиками с чувствительностью 0,5–1,0 мм и микротермопреобразователями с обработкой сигнала на ПК. Варьировались заглубления чувствительных элементов датчиков и их ориентации относительно отверстия истечения. Видеофотосъемкой фиксировались разрывы пузырей – состояния свободной поверхности жидкого металла при варьируемых расходах истечения, заглублениях отверстий истечения и их ориентации относительно отверстия истечения. Акустическими датчиками фиксировались моменты одиночных пузырей и их серий, а также последующих разрывов пузырей на свободной поверхности свинца или эвтектики свинец-висмут. Контроль положения и вертикального перемещения («набухания») участков свободного уровня жидкого металла осуществлялся электроконтактными датчиками и визуально. Контроль расхода «легкой» фазы осуществлялся расходомерами, а также по величине изменения уровня конденсата и давления в расходных сосудах. На рис. 2 и 3 представлены разрывы пузырей на поверхности свинца при пузырьковом истечении «легкой» фазы. На рис. 4 и 5 представлены примеры результатов измерения распределений «легкой» фазы по размерам и скоростям всплытия пузырей. Экспериментально определенные скорости всплытия пузырей «легкой» фазы составили 0,15–0,3 м/с при отсутствии эффекта газлифта.

При развитом спутном течении пузырей в составе двухкомпонентного потока за счет газлифта скорость их всплытия достигала 0,7–0,8 м/с и более. Пузыри диаметром до 3,0 мм в процессе подъема сохраняют форму, близкую к сферической. Пузыри с размером более 5,0 мм деформируются и могут дробиться в двухкомпонентном потоке, причем в момент дробления и сразу после него скорость подъема существенно уменьшается, приближаясь к несущей скорости потока. Характеристики барботажных газовых и паровых пузырей идентичны и существенно отличаются от характеристик

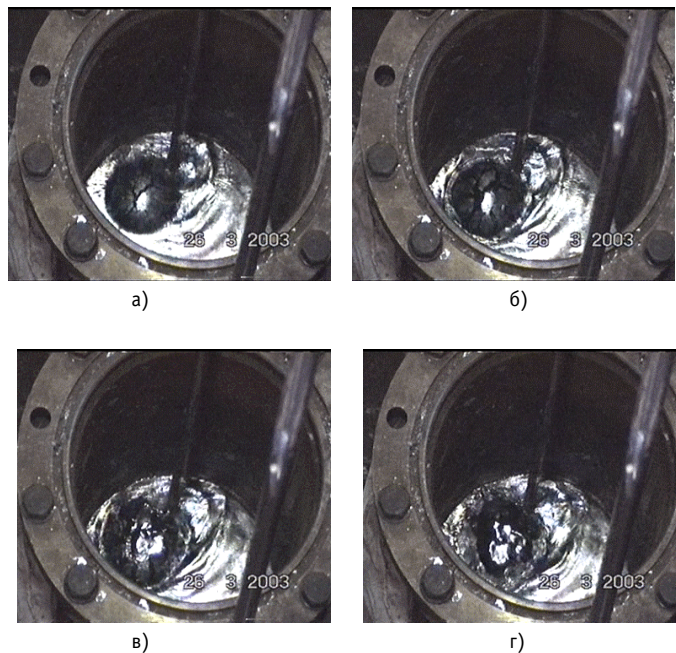


Рис. 2. Последовательные кадры вида свободной поверхности свинца при начале барботажа аргона: разрыв первого большого пузыря; расход газа 70 дм<sup>3</sup>/ч; барботажная нагрузка 13 дм<sup>3</sup>/ч·дм<sup>2</sup>; давление газа 4 кг/см<sup>2</sup> (ати); заглубление сопла 3000 мм; диаметр сопла 0,6 мм; температура свинцового теплоносителя 400°C

движения конденсата. В последнем случае полное испарение капли за время барботажа не происходит, вследствие образования паровой прослойки между поверхностями жидкого металла и конденсата [1]. При барботаже фиксируется подъем свободного уровня («набухание») на величину объема «легкой» фазы, внедренной в объем

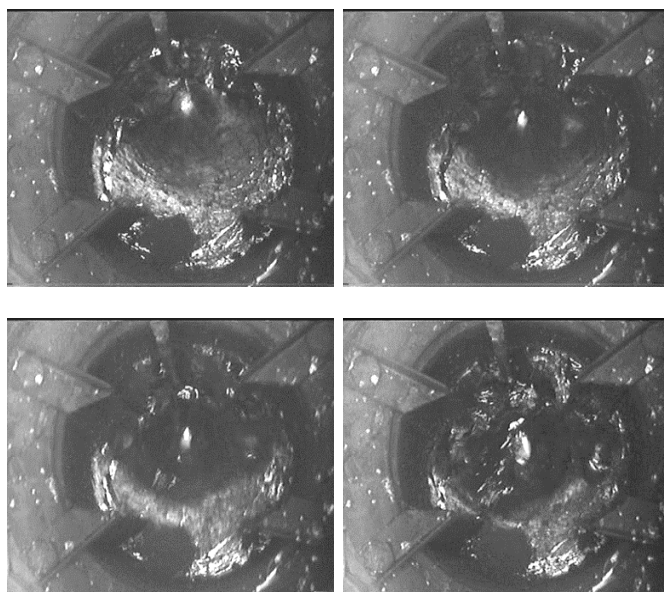


Рис. 3. Последовательные кадры вида свободной поверхности свинца при начале барботажа водяного пара сквозь змеевик: расход пара 800 дм<sup>3</sup>/ч; барботажная нагрузка 130 дм<sup>3</sup>/ч·дм<sup>2</sup>; давление пара 80 кг/см<sup>2</sup> (ати); заглубление сопла 1600 мм; диаметр сопла 0,6 мм; температура свинцового теплоносителя 400°C

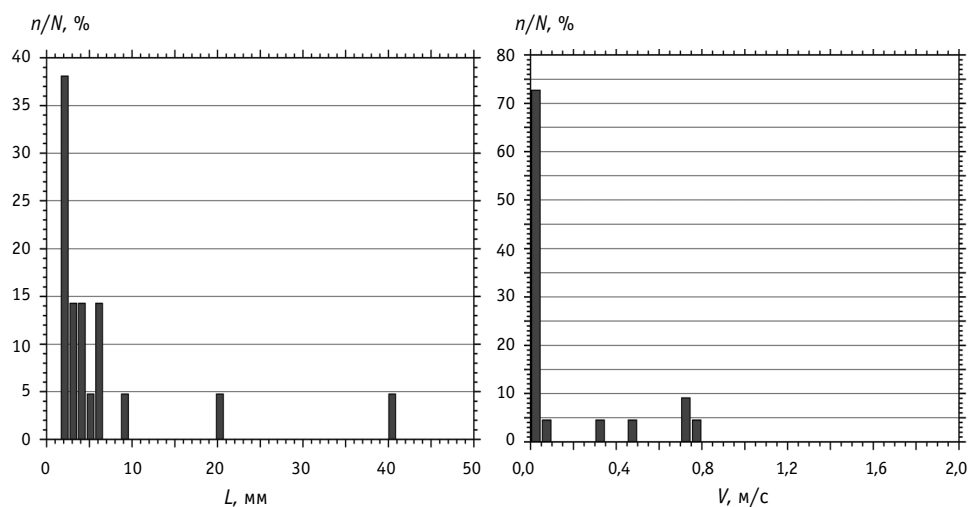


Рис. 4. Гистограммы распределения длин хорд и скорости всплытия пузырей рабочего тела при барботаже аргона; глубина установки экспериментального зонда 900 мм; параметры рабочего тела:  $P = 4$  МПа,  $Q = 12\text{--}26$  г/с; заглубление сопла под уровень свинца 1000 мм

жидкого металла. Максимальный подъем фиксируется в начальный момент перед первыми разрывами пузырей на свободной поверхности. С увеличением расхода «легкой» фазы, при прочих равных условиях, частота разрывов увеличивается, фиксируется интерференция волн от разрывов, уменьшение разрывных диаметров, увеличение глубины кратеров и высот гребней.

Результаты экспериментов и расчетно-теоретического анализа показывают, что при пузырьковом поступлении «легкой» фазы в жидкий металл, свободный уровень теплоносителя в реакторном контуре первоначально возрастает, а затем стабилизируется за счет сепарации пузырей, выхода их в систему защитного газа и последующего вывода сконденсировавшейся в специальных конденсаторах воды из контура. В том случае, если значение поднявшегося уровня жидкого металла не достигает

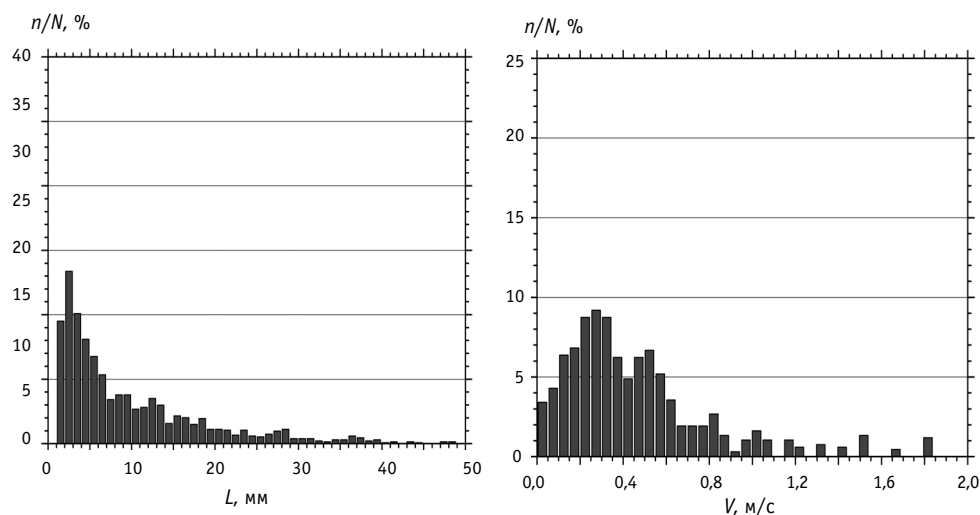


Рис. 5. Гистограммы распределения длин хорд и скорости всплытия пузырей рабочего тела при барботаже конденсата рабочего тела; глубина установки зонда 900 мм; параметры рабочего тела:  $P = 6$  МПа,  $Q = 15\text{--}25$  г/с; заглубление сопла под уровень свинца 1000 мм

аварийных значений и отсутствует поступление воды в активную зону реактора (что фиксируется ионизационными камерами) возможна последующая работа контура и установки в целом при такой аварии.

Струйное (факельное) истечение «легкой» фазы в объем жидкого металла характеризуется наличием устойчивого объема «легкой» фазы – струи, начинающейся у отверстия истечения и затем быстро дробящейся на отдельные пузыри, всплывающие в объеме теплоносителя. Длина (протяженность) струи определяется ориентацией отверстия истечения в пространстве и перепадом давления на отверстии истечения (расходом «легкой» фазы). Геометрия поверхности струи в экспериментах фиксируется электроконтактными датчиками и микротермопреобразователями. Экспериментально определенная длина горизонтальной струи «легкой» фазы до ее разрушения в объеме жидкого металла незначительна и составляла не более 50–100 диаметров отверстий истечения при перепаде давления на них до 20,0 МПа. Характер движения пузырей, образовавшихся при последующем дроблении струи, соответствует режиму пузырькового течения «легкой» фазы в составе подъемного двухкомпонентного потока. При увеличении паровой (газовой) нагрузки «легкой» фазы на свободную поверхность жидкого металла на ней формируются вертикальные, вытянутые вверх образования с неупорядоченной поверхностью (рис. 6). В поперечном сечении эти «сталагмиты» уменьшаются по мере увеличения их высоты. От вершин этих «сталагмитов» периодически отрываются отдельные образования жидкого металла, поднимающиеся (в процессе экспериментов) на высоту до 1,5 м и более. Последующая работа реакторного контура при такой аварии возможна с учетом ограничений, высказанных выше для пузырькового режима истечения «легкой» фазы.

Экспериментальные исследования процессов с подачей «легкой» фазы под давлением до 240 кгс/см<sup>2</sup> под уровень свинца с температурой до 600°C проводились на емкости высотой 4,0 м, внутренним диаметром около 0,3 м, в «свободный» и в затесненный объем свинца. Исследования при подаче пара и воды с давлением 240 кгс/см<sup>2</sup> (ата) в свободный объем свинца из центральной трубки 14×2 мм в кольцевой зазор между этой трубкой и соосной трубкой 56×4 мм показали на высоте около 1,5 м среднюю скорость подъема фронта раздела свинца и «легкой» фазы около 30 м/с при расходе 20–50 кг/с. Отмечалась существенная неравномерность поверхности фрон-



Рис. 6. Фотография газового объема емкости диаметром 350 мм при барботаже аргона через слой свинца толщиной 410 мм с расходом газа приблизительно 0,2 м<sup>3</sup>/ч (барботажная нагрузка 2 м<sup>3</sup> газа/м<sup>2</sup>): 1 – фланец емкости; 2 – траектории образований свинца; 3 – газовый объем

та в процессе его подъема и значительные динамические (ударные) нагрузки на элементы конструкции в процессе экспериментов, приводящие к их разрушению. При установке в кольцевой зазор дроссельной решетки с коэффициентом сопротивления около 10, имитирующих условия трубной системы парогенератора, скорость подъема фронта при прочих равных условиях снизилась до 4,0–6,0 м/с, т.е. более чем в 5 раз. При этом динамические (ударные) нагрузки практически исчезли. Вероятно, в месте установки дросселя происходила гомогенизация смеси свинец – рабочее тело, торможение фронта, уменьшение скорости его подъема. Разрушения элементов конструкции, по сравнению с экспериментами без дросселя практически отсутствовали.

Исследования процессов с образованием сплошного канала «легкой» фазы от места истечения до газового (парогазового) объема над свободной поверхностью свинцового и свинец-висмутового теплоносителей производились при заглублениях отверстий истечения под уровень жидкого металла от 200 мм до 1500–2000 мм. Подача «легкой» фазы производилась в «свободный» объем теплоносителя и в объем, затесненный вертикальными трубками с давлением перед отверстием истечения до 80 кгс/см<sup>2</sup>. Значение величины этого давления и расхода «легкой» фазы, при которых образовывался сплошной канал «легкой» фазы в объеме жидкого металла, определялись, прежде всего, величиной заглубления отверстия истечения под уровень жидкого металла и затесненностью объема жидкого металла другими трубками, имитировавшими трубную систему парогенератора.

В начальный момент образования сплошного парового канала происходит выброс жидкого металла из объема над районом поступления пара в газовый объем над свободным уровнем теплоносителя.

На рис. 7 представлены последовательные видеок кадры процесса выброса свинца. В последующем, расход через паровой канал стабилизируется. С его стенок захватываются образования жидкого металла, дробятся в потоке пара и в виде мелко-дисперсной фазы поступают в объем над свободным уровнем теплоносителя. Остаточных деформаций трубок, расположенных вблизи отверстия истечения, а также каких-либо разрушений элементов, дистанционирующих трубки, не зафиксировано.

Проведенные экспериментальные исследования, а также расчетно-теоретический анализ дали основания авторам, при участии специалистов ОКБ «Гидропресс», предложить конструктивную схему принципиально нового парогенератора для установок со свинец-висмутовым и со свинцовым теплоносителями. Эта конструктивная схема обеспечивает безопасность реакторных установок такого типа при любой аварии с межконтурной неплотностью парогенератора, включая одновременное разрушение всех труб трубной системы парогенератора. Предложено выполнять рабочую повер-

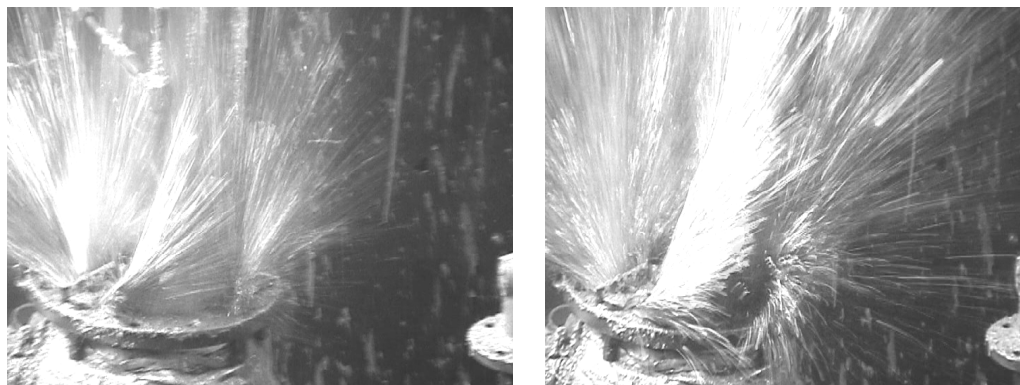


Рис. 7. Два кадра (через 0,08 с) в процессе выброса капель свинца из экспериментальной емкости

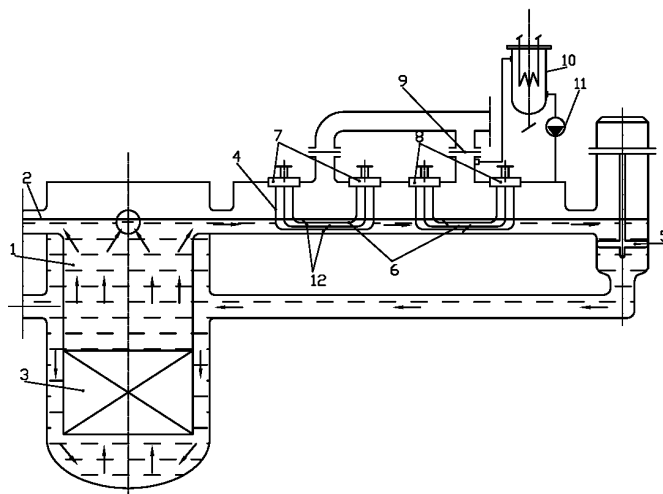


Рис. 8. Схема установки горизонтальных парогенераторов: 1 – реактор; 2 – свободный уровень теплоносителя; 3 – активная зона реактора; 4 – парогенератор; 5 – насос; 6 – горизонтальные криволинейные трубы; 7 – трубные доски входной и выходной камер; 8 – трубные доски выходной камер; 9 – разрывная мембрана; 10 – конденсатор пара; 11 – вентилятор; 12 – гребенки

хность трубной системы парогенератора из горизонтальных труб с минимальным заглублением труб под уровень жидкого металла (рис. 8). Газовый объем в корпусе горизонтального парогенератора выполняется равным или больше объема теплоносителя в нем. Объем над свободным уровнем жидкого металла сообщается через разрывную мембрану, охладитель и фильтр с атмосферой. Парогенератор выполняется в виде установленных по ходу теплоносителя пароперегревательных и испарительных горизонтальных труб, концы которых заделываются в трубные доски камер соответствующих секций. Такое техническое решение может быть использовано как в парогенераторе с сепаратором и контуром многократной циркуляции, так и в прямоточном парогенераторе. Для увеличения поверхности теплообмена горизонтальные трубы могут выполняться криволинейными, например, в виде горизонтальных плоских змеевиков.

В моноблочных реакторных установках предлагаемая конструктивная схема парогенератора позволяет упростить компоновку реакторного блока. Секции парогенератора устанавливаются в кольцевом канале, размещенном выше активной зоны ре-

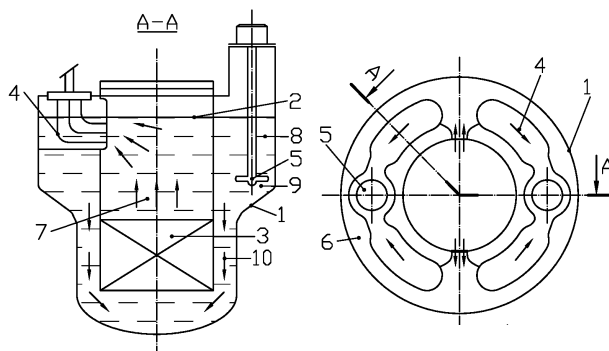


Рис. 9. Вариант схемы реакторной установки: 1 – реактор; 2 – свободный уровень теплоносителя; 3 – активная зона реактора; 4 – парогенератор; 5 – насос; 6 – кольцевой канал; 7 – объем теплоносителя; 8 – напорная камера насоса; 9 – колесо насоса; 10 – опускной канал



актора. Внутренний диаметр кольцевого канала больше наружного диаметра активной зоны реактора (рис. 9). Входной участок секций парогенераторов сообщен с объемом теплоносителя над активной зоной. Выходной участок – с входной камерой насоса. Учитывая незначительное гидравлическое сопротивление контура, насос может быть выполнен осевым или электромагнитным. Напорная камера насоса сообщена через опускающий канал с активной зоной реактора.

В такой реакторной установке при любом размере течи при межконтурной неплотности парогенератора, исключается попадание воды в активную зону реактора на быстрых нейтронах и переопрессовка контура.

### **Литература**

1. Безносков 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. 182-191.

Поступила в редакцию 5.07.2006