

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЯМОКОНТАКТНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ С ТЯЖЕЛЫМИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

А.В.Безносков, Т.А.Бокова, С.Ю. Савинов, П.А.Боков, М.Д.Зефилов

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



Приводятся результаты экспериментальных исследований характеристик элементов прямоконтактных парогенераторов со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями.

Исследовались устройства ввода и диспергации водопаровой фазы, вводимой в жидкий металл, размеры образующих пузырей, скорость всплытия пузырей, характеристики теплообмена между жидким металлом и пузырями. Эксперименты проводились в диапазоне температур свинца и свинец-висмутовой эвтектики 350–550°C; давления подаваемой воды 0,2–8,0 МПа; расходов воды, формирующих пузырьковое и струйное (факельное) истечение до 200 кг/ч; длительной паровой нагрузкой на свободную поверхность жидкого металла до 10,0 м³/м²ч.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие атомной энергетики инициирует формирование новых концепций реакторных установок. Применительно к установкам с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями одной из таких концепций является использование прямоконтактных парогенераторов. Вариант схемы реакторного контура такой установки, предложенной и проработанной авторами, представлен на рис. 1. Применение прямоконтактных парогенераторов в составе реакторных контуров ядерных энергетических установок может позволить повысить их безопасность и улучшить технико-экономические показатели за счет

- исключения из состава реакторного контура поверхностных парогенераторов и обслуживающих их систем, упрощения схемы контура, упрощения его обслуживания, уменьшения массогабаритных характеристик, улучшения экономических показателей;
- исключения одной из наиболее потенциально опасных аварийных ситуаций – «межконтурная неплотность парогенератора»;
- исключения из состава реакторного контура главных циркуляционных насосов и соответственно их отказа; циркуляция во всех энергетических режимах контура может быть обеспечена за счет эффекта газлифта – увлечения объема

© А.В.Безносков, Т.А.Бокова, С.Ю. Савинов, П.А.Боков, М.Д.Зефилов, 2008

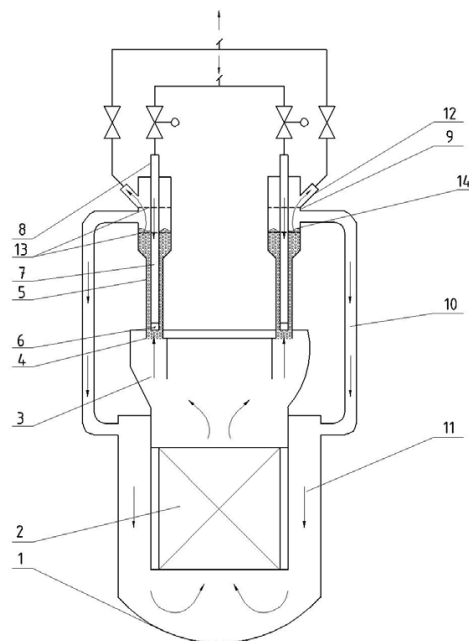


Рис. 1. Схема реакторной установки с прямым контактным парогенератором: 1 – корпус реактора; 2 – активная зона реактора; 3 – коллектор; 4 – концевые участки вертикальных парогенерирующих модулей; 5 – парогенерирующие модули; 6 – отверстия истечения воды в жидкий металл; 7 – трубы (каналы); 8 – патрубки подвода питательной воды; 9 – верхние расширительные участки парогенерирующих модулей; 10 – соединительные каналы; 11 – опускной участок реактора; 12 – патрубки отвода пара; 13 – сепарирующие устройства; 14 – свободный уровень теплоносителя

жидкого металла всплывающими пароводяными пузырями и движущего напора, создаваемого разностью плотностей жидкометаллического теплоносителя без пароводяных пузырей и при их наличии, по высоте элементов контура.

Наряду с этим, применение прямоконттактных парогенераторов в подобных контурах является неблагоприятным фактором или создает достаточно сложные научно-технические проблемы, требующие разрешения, основными из которых являются следующие.

- В традиционных контурах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями существенным преимуществом является низкое (близкое к атмосферному) давление в реакторном контуре. Введение в состав контура прямоконттактных парогенераторов повышает требования к конструкциям и их материалам, работающим в условиях высоких температур (до 550–600°C), высоких давлений (6,1–24,0 МПа) и воздействия агрессивных сред – высокотемпературных свинца, эвтектики свинец-висмут и воды (пара).

- Висмут является составным элементом теплоносителя свинец-висмут и обязательной примесью в свинцовом теплоносителе. В нейтронном потоке активной зоны реактора из висмута образуется биологически опасный радионуклид полоний-210. В установках с прямоконттактными парогенераторами полоний-210 будет распространяться по пароводяному контуру и, вероятно, концентрироваться в конденсаторе паровой турбины. Обслуживание и ремонт радиоактивного пароводяного контура существенно усложнит эксплуатацию теплосиловой установки, потребует изменения системы выброса паровоздушной смеси от системы уплотнений турбины и вакуумирования конденсатора и создаст принципиально новые условия эксплуатации энергоблока.

- Потребуется решения проблема удаления продуктов, образующихся при контакте теплоносителя с примесями, содержащимися в питательной воде (аналогичная система продувки парогенератора).

- Реакторы со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями предусматриваются как реакторы на быстрых нейтронах. Поступление воды в активную зону такого реактора (сверх определенного количества) приведет к тяжелой аварии с «разгоном» реактора. Поступление воды в активную зону должно быть гарантированно исключено при всех возможных состояниях установки.

- В прямоточном парогенераторе реализуется спутное движение воды, пара и жидкого металла, тогда как в традиционных парогенераторах – противоток. Спутное движение (прямоток) существенно усложняет получение высоких температур генерируемого пара.

- Существует проблема уноса теплоносителя в мелкодисперсной фазе в конденсатно-питательную систему и очистки от него пара, поступающего на турбину.

Указанные выше проблемные вопросы требуют своего разрешения, т.к. возможные преимущества установок с прямоточными парогенераторами делают их привлекательными для последующего рассмотрения. Принципиальная возможность создания прямоточных ПГ была показана в [1, 2].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В Нижегородском государственном техническом университете (НГТУ) спроектированы и созданы высокотемпературные стенды для исследования характеристик прямоточных парогенераторов со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями.

Модифицированный стенд ФТ-31М (рис. 2) предназначен для исследования характеристик барботажа воды и пароводяной смеси через слой свинца; стенд 2007ФТ-М01 (рис. 3) – для теплофизических испытаний и отработки конструктивных решений ввода и диспергации воды в свинец макетного образца прямоточного парогенератора М01. Стенд 2007ФТ-М02СТ (рис. 4) используется для исследований процессов физико-химического воздействия свинцового теплоносителя с соленой (морской) водой и содержащимися в ней примесями, накопления этих продуктов при повышенных содержаниях (до 40 г/кг) в воде и исследования коррозионного воздействия расплава свинца совместно с водой, содержащей примеси и продукты контакта свинца с примесями воды на конструкционные материалы (стали) в составе макетного образца М02 прямоточного парогенератора.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Методика проведения экспериментов на всех указанных стендах заключалась во вводе воды с температурой 20–150°C под уровень расплава в объем свинца при температурах 350–550°C с заглублениями отверстий истечения от 150 до 3000 мм. Давление воды перед отверстиями истечения круглой, щелевой и трещиновидной форм с характерными размерами от 0,5 до 3,0 мм составило от 0,2 до 8,0 МПа, что формировало пузырьковый или струйный (факельный) режимы истечения «легкой» фазы (воды, пара).

Варьировались указанные режимные и конструктивные параметры. Исследовалось влияние на характеристики теплообмена, наличие перфорированных листов в объеме свинца, влияние заглубления отверстий истечения воды под свободный уровень расплава свинца. На макетном образце М02 осуществлялась подача

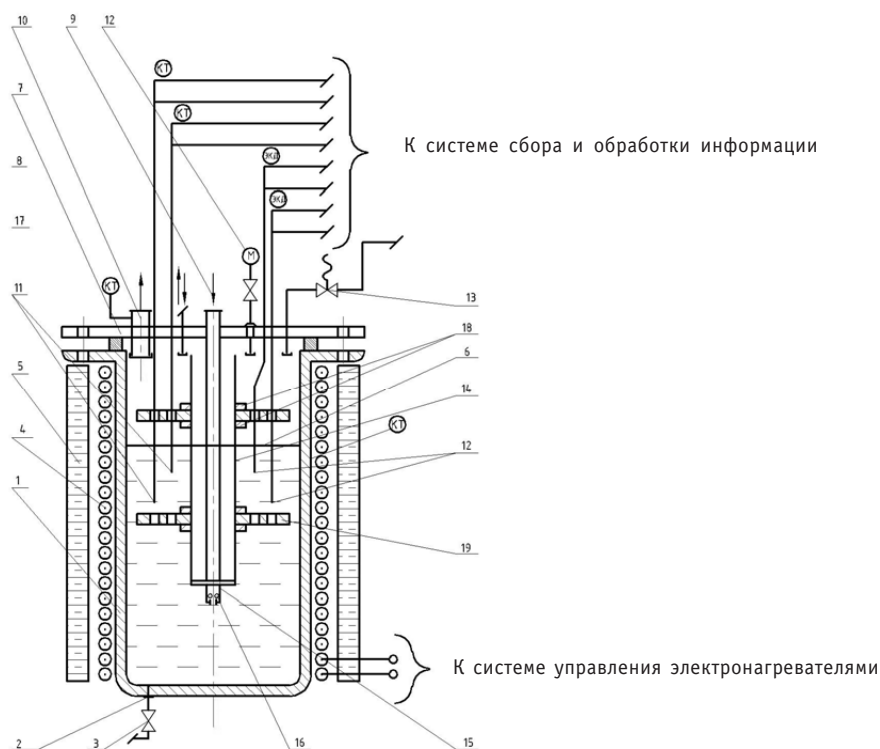
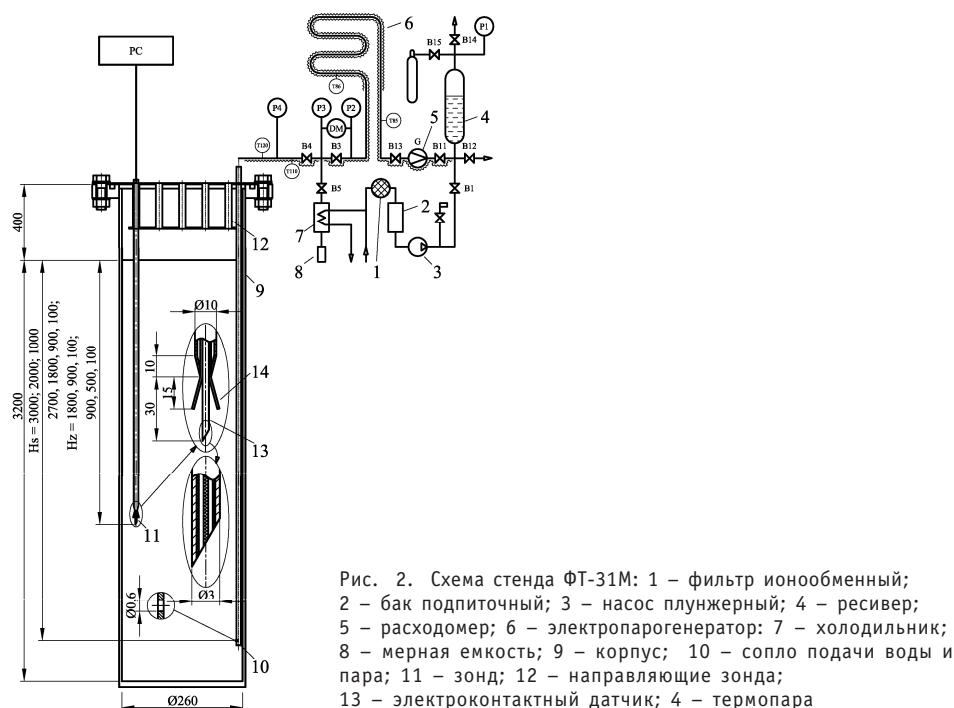


Рис. 3. Схема принципиальная макетного образца 1 (М01): 1 – корпус; 2 – штуцер дренажный; 3 – вентиль сильфонный запорный; 4 – спираль электронагревательная; 5 – теплоизоляция; 6 – свободный уровень свинца перед подачей воды; 7 – крышка; 8 – прокладка; 9 – штуцер трубы подачи воды; 10 – штуцер трубы отвода пара; 11 – микротермопара; 12 – электроконтактные датчики пузырей пара – воды; 13 – клапан предохранительный; 14 – труба чехловая; 15 – коллектор ввода воды в свинец; 16 – сопловые устройства (отверстия истечения) воды в свинец; 17 – лист перфорированный верхний; 18 – шайба; 19 – лист перфорированный нижний

ком металле не превышает нескольких десятков значений выходного размера отверстия истечения. В жидком металле формируются пузыри воды (пара), которые дробятся турбулентным потоком жидкого металла. При движении в канале истечения возможен переход части воды в пар с дроблением образовавшихся пузырей. При поступлении пузырей в теплоноситель на границе контакта сред образуется паровая прослойка. Невозможен непосредственный, прямой контакт капли конденсата с поверхностью расплава жидкого металла с температурой, на 100°C и более превышающей температуру насыщения при давлении в пузыре. При дальнейшем движении – всплытии пузыря в составе двухкомпонентного потока теплоноситель–вода, пар– подвод тепла к капле конденсата осуществляется за счет следующих механизмов: конвективного теплообмена на границе жидкий металл – пар; потока излучения от поверхности жидкого металла (частично покрытой примесями – оксидами свинца и другими) к поверхности конденсата через паровую прослойку; конвективного теплообмена в паровой прослойке от поверхности жидкого металла к поверхности конденсата; теплообмена между движущимися объемами внутри капли конденсата.

Термическое сопротивление паровой прослойки достаточно велико. Расчетные оценки показывают, что полное испарение капли конденсата, поступающего в контур с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем при скорости двухкомпонентного потока 1–3 м/с может происходить через метры и десятки метров, в зависимости от исходного размера капли. Реализация концепции прямоконтактного парогенератора требует уменьшения этого значения. Это возможно за счет уменьшения размера капли, ее дробления в потоке жидкого металла, а также за счет увеличения времени нахождения пузырей (времени теплообмена) при той же высоте барботажного слоя при фиксированной величине теплового потока к капле. Существенная деформация пузыря, приводящая к локальному уменьшению толщины паровой прослойки также повышает объемную теплонапряженность в двухкомпонентном потоке.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. Геометрия отверстий истечения воды. Экспериментально исследовались отверстия истечения воды круглой формы, в виде горизонтально ориентированного паза (щели), в виде искусственной горизонтально ориентированной трещины.

Состояние свободной поверхности и динамические эффекты в макетных образцах при подаче воды через паз (щель) и трещину при прочих равных условиях были аналогичны состояниям при подаче воды через круглое отверстие с расходом в несколько раз меньше, чем при подаче через паз (щель) такого же поперечного размера. Вероятно, при истечении воды через горизонтально ориентированный паз (щель), трещину формируются пузыри с меньшим размером, чем при истечении через круглое отверстие с диаметром, близким к меньшему размеру паза (щели), трещины.

2. Влияние заглубления отверстия истечения воды под уровень жидкого металла. Эксперименты показали, что с увеличением заглубления отверстия истечения воды под уровень жидкого металла и соответственно с увеличением давления воды перед отверстием истечения, необходимого для «выдавливания» воды через отверстие истечения, возмущения свободной поверхности (высота каверн свинца, сопровождающих разрыв пузырей) и другие динамические эффекты увеличатся (при прочих равных условиях).

Увеличение заглубления отверстий истечения воды в макетном образце М01 до 400 мм позволило получить полное испарение воды, подаваемой в М01 с температурой 20°C с расходом 0,73 кг/ч.

Колебания давления воды на входе в М01 находилось в диапазоне 0,38–0,44 кгс/см² (ати). Температура свинца в течение 125 мин подачи воды монотонно изменялась от 455 до 435°C при выключенных электрообогревателях. На графике видны пульсации локальной температуры свинца с периодом около 500 с, вероятно, вследствие движения серий пузырей, изменяющих расход воды через отверстие истечения согласно пульсации перепада давления на этом отверстии. Температура генерируемого пара при этом находилась в диапазоне 130–140°C (рис. 5).

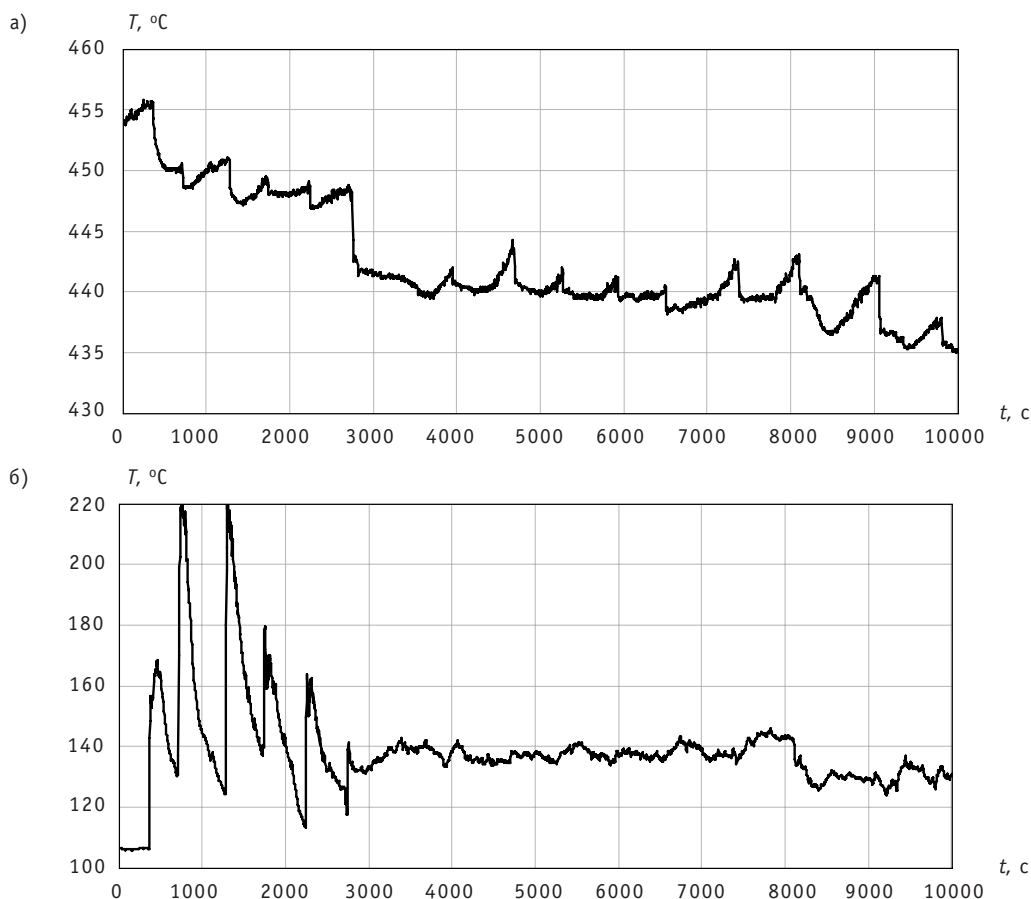


Рис. 5. Изменение температуры свинца (а) и генерируемого пара (б) в макетном образце М01: расход воды через щелевую насадку 1,4×10 мм 0,73 г/ч; давление воды 0,38–0,44 кгс/см² (ати); заглубление отверстия истечения под свободный уровень свинца 400 мм

Пульсации температуры пара имеют такой же период, как и пульсации температуры свинца, но их амплитуда меньше, чем амплитуда пульсаций температуры свинца, вследствие усреднения измеряемой температуры в паровом объеме М01. Возможной причиной пульсаций с повышением температуры в паровом объеме емкости в начальный момент времени (2000 с) является поступление к чувствительному элементу термопары более горячего газа из слоя, контактировавшего с поверхностью свинца. Этот газ транспортировался паром из первых серий пузырей. В переходном начальном режиме был возможен «переток» пузырей с частичным содержанием неиспарившейся конденсированной фазы. После завершения переходного процесса режим стабилизировался.

Испытания проводились с установленным в объеме свинца перфорированным листом с отверстиями Ø3,0 мм.

Следует отметить, что при заглублениях отверстий истечения до 2,5 м на стенде ФТ-31М, но при круглых отверстиях истечения $\varnothing 1,6$ мм в емкости стенда без перфорированного листа, на пути всплытия пузырей воды, пара (тормозящих их движение), температура в паровом объеме над свободным уровнем была около 100°C и фиксировались мелкие капли конденсата.

3. Установка перфорированных листов в объеме жидкого металла. Наличие перфорированных листов на пути всплытия пузырей воды, пара, толщиной 3,0 мм с отверстиями $\varnothing 3,0$ мм приводит при прочих равных условиях к заметному уменьшению динамических эффектов барботаж и высоты образований свинца, поднимающихся над свободным уровнем вследствие разрыва пузырей (см. рис. 6). При установленном перфорированном листе увеличивается доля свободной поверхности, занятой разрывающимися пузырями и соответственно уменьшается локальная паровая нагрузка на свободную поверхность жидкого металла.

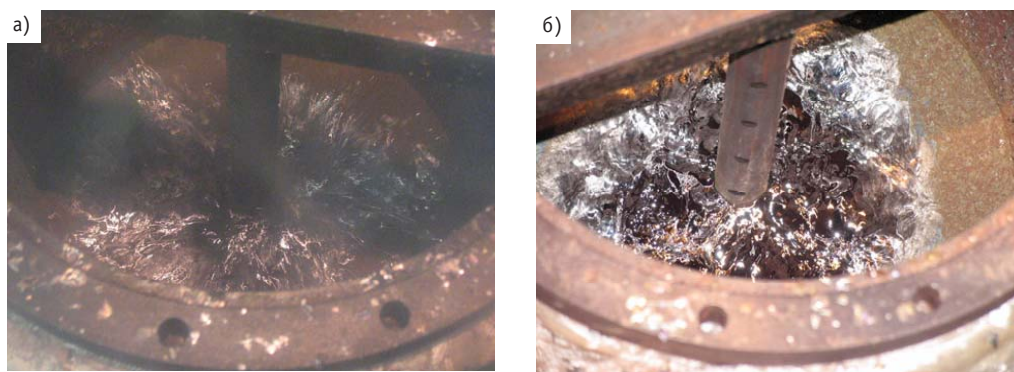


Рис. 6. Фото свободной поверхности свинца на макетном образце М01 без перфорированного листа (а) в объеме свинца и с таким листом (б): отверстие истечения – круглое $\varnothing 1,0$ мм, заглубление под свободный уровень свинца 150 мм, температура воды 20°C , расход воды в М01 0,73 кг/ч, давление воды 0,18 – 0,2 кгс/см²(ата), температура свинца $470\text{--}480^{\circ}\text{C}$

4. Значение расхода воды, подаваемой в макетный образец прямоконтактного парогенератора. Ограничением расхода воды, подаваемой в макетный образец, является предельная паровая нагрузка на свободную поверхность жидкого металла, при превышении которой начинается подъем «среднего» уровня в объеме образца и интенсивное поступление жидкого металла в трубопровод отвода пара с последующим застыванием в паропроводе.

В процессе испытаний не зафиксирован факт зависимости температуры генерируемого пара от значения расхода подаваемой воды.

При увеличении расхода воды, подаваемой в макетный образец, увеличиваются колебания свободного уровня жидкого металла и динамические эффекты в макетном образце, вероятно, вследствие агломерации пузырей в объеме свинца и увеличения их размера. Ревизия стенда испытаний образца М01 показала, что при высоте парового объема над свободной поверхностью жидкого металла 400–500 мм в отводящих паровых трубопроводах – гофрированных шлангах с диаметрами проходного сечения $\varnothing 13 \times 16$ мм обнаружен «чулок» (пленка) свинца, толщиной до 2,0 мм, покрытия налетом оксидов свинца. Значение средней паровой нагрузки не превышало $7,0 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ пара. Следует отметить, что манометры, установленные на трубопроводе ввода воды в макетные образцы всегда фиксировали пульсации давления, что обуславливало пульсирующий расход воды (пара), поступающей в жидкий металл.

5. Размер пузырей воды и пара, всплывающих в объеме жидкого металла.

На рис. 7 представлен пример распределения размеров пузырей в макетном образце М01, измеренных электроконтактными датчиками конструкции НГТУ. Чувствительные элементы датчиков были заглублены на 60 и 160 мм от свободной поверхности свинца, располагались выше перфорированного листа в объеме теплоносителя на 300 и 200 мм соответственно. Конструкция датчика обеспечивала фиксацию пузырей с размерами 1,0 мм и более. Из рис. 7 видно, что больше половины измеренных пузырей находятся в диапазоне 3,0 мм и менее. По мере всплытия пузырей относительное число пузырей малого диаметра увеличивается, вероятно, вследствие дробления пузырей по мере всплытия.

Измеренное увеличение размеров позволяет предполагать, что пузыри по мере всплытия не сохраняют массу исходной капли конденсата, а дробятся, что подтверждает предложенную модель процесса. При вводе соленой воды через аналогичное отверстие, заглубленное на 1700–1800 мм под уровень свинца в макетном образце М02 при примерно тех же распределениях размеров пузырей, температура генерируемого пара при барботаже составляла 115–127°C, что может свидетельствовать о полном испарении капель конденсата при их подъеме в емкости М02 диаметром 80 мм, и в М01 диаметром 350 мм.

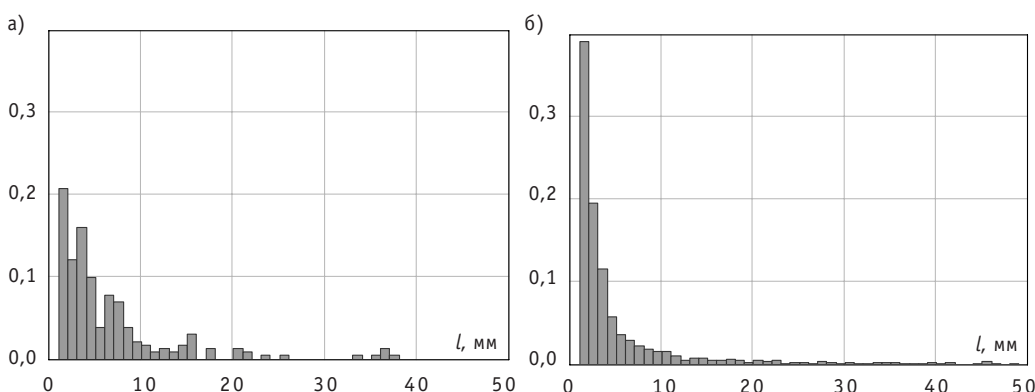


Рис. 7. Распределение размеров пузырей, фиксируемых электроконтактными датчиками при значении их заглубления: а) 160 мм и б) 60 мм под свободный уровень свинца 400 мм на макетном образце М01: подача воды через насадку с двумя щелями 1,4×15 мм, расход воды 0,73 кг/ч, давление воды 0,38–0,44 кгс/см² (ати), температура свинца 470–435°C, температура генерируемого пара 130–140°C

6. Скорость всплытия пузырей в объеме свинца в макетных образцах. Пример распределения скоростей подъема пузырей в макетном образце М01 представлен на рис. 8. Результаты измерений скоростей всплытия пузырей во всех сериях экспериментов показывают их однозначную корреляцию с распределениями размеров пузырей. Наиболее вероятная (более 50%) скорость всплытия пузырей находится в диапазоне от нуля до 0,1 м/с, что подтверждает наиболее вероятный размер пузырей 2,0–3,0 мм и менее. Следует отметить, что измеренная скорость всплытия пузыря складывается из скорости движения вверх пузыря относительно локального объема жидкого металл и скорости газлифта двухкомпонентного потока жидкого металл – вода, пар.

7. Влияние наличия растворенных солей. При подаче соленой воды (до 40 г/кг) в свинец на макетном образце М02 зафиксировано образование и рост отложений солей в трубе подвода воды к отверстиям истечения в районе ее частичного испарения, и в отверстиях истечения 1,4×15 мм, вплоть до их забивания. При подаче водопроводной воды в макетный образец М01 при аналогичных усло-

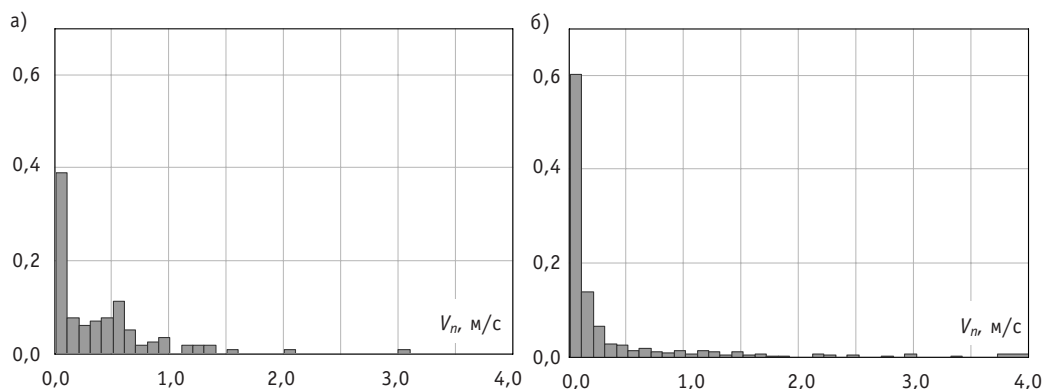


Рис. 8. Распределение V_n (м/с) вертикальных составляющих скорости движения пузырей в двухкомпонентном потоке свинец–вода, пар, фиксируемых электроконтактными датчиками при значении их заглубления а) 160 мм и б) 60 мм под свободный уровень свинца 400 мм на макетном образце М01: подача воды через насадку с двумя щелями 1,4×15 мм, расход воды 0,73 кг/ч, давление воды 0,38–0,44 кгс/см² (ати), температура свинца 470–435°C, температура генерируемого пара 130–140°C

виях отложений солей в такте подачи воды и в отверстии истечения не зафиксировано.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье результаты могут оказаться полезными при дальнейшей работе над прямоконтактными ПГ и анализе аварийных процессов в РУ с ТЖМТ и ПГ поверхностного типа.

Литература

1. Grachev N.S., Drobyshev A.V., Kirillov P.L. Mixing Steam Generators with Liquid Metals/Int. Conf. on Liquid Metals (March 16-18, 1993, Karlsruhe, Germany).
2. Грачев Н.С., Кириллов П.Л., Мартынов П.Н. Доклад на конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-98)» (Обнинск, 5-9 октября 1999). – Т. 2. – С. 799.
3. Безносова А.В., Пинаев С.С., Давыдов Д.В., Молодцов А.А., Бокова Т.А., Мартынов П.Н., Рачков В.И. Экспериментальные исследования контактного теплообмена свинцовый теплоноситель – рабочее тело // Атомная энергия. – 2005. – Т. 98. – Вып. 3. – С. 182-187.
4. Безносова А.В., Бокова Т.А., Молодцов А.А. Экспериментальные исследования процессов, сопровождающих межконтурную неплотность парогенератора со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями и оптимизация его конструкции // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – № 4.

Поступила в редакцию 12.12.2007

Contribution of (γ , n) reactions to entire neutron intensity of WWER-1000 spent fuel was estimated according with his burn-up degree.

УДК 621.039.542:536.24

Experimental Researches of Direct Contact Steam Generators Characteristics with Heavy Liquid Metal Heat-Carriers \A.V. Beznosov, T.A. Bokova, S.U. Savinov, P.A. Bokov, M.D. Zefirov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 10 pages, 8 illustrations. – References – 4 titles.

Experimental researches of direct contact lead and lead-bismuth heat-carriers steam generators elements characteristics are resulted.

The water-steam phase input and dispergation devices entered into liquid metal, formed bubbles sizes, the bubbles emersion speed, characteristics of heat exchange between liquid metal and bubbles were researched. Experiments were conducted under a range of lead and lead-bismuth eutectic temperatures 350-550°C; pressure of submitted water 0,2-8,0 MPa; forming bubble and the jet (torch) outflow charges of water up to 200 kg/h; durable liquid metal free surface steam loading up to 10,0 m³/m²h.

УДК 621.039.534

Numerical Modeling of Fragmentation in Liquid Media with Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Method \A.P. Vorobev, V.I. Kriventsev, Qian Lin, Xuewu Cao; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 10 pages, 3 illustrations. – References – 10 titles.

An application of the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method to liquid media fragmentation is demonstrated. Sample hydrodynamics problems are solved numerically. The detailed mathematical explanation of the method is given for non-viscous fluid approach while using artificial dissipative term applied in the Euler equation.

УДК 536.24.621.039.526

Natural Convection Specificity in Complex Loops \S.G. Kalyakin, Yu.P. Djusov, Yu.Yu. Shteyn, Yu.V. Klimanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 10 pages, 1 table, 5 illustrations. – References – 10 titles.

Now the natural convection is of great interest for many researchers from the point of view its use in the systems of passive cooling and removal of residual heat from nuclear reactor core at accident situations. Due to it investigation of the natural convection specificity is rather actual and useful for the NPP safety validation.

In this paper the investigation of natural convection evolution dynamics in closed loop is presented and the character of flow parameters changing in dependence of different factors (heat generation intensity, loop geometry) is shown.

УДК 621.039.564

Choosing of Frequency Range for Thermocorrelation Flowmeter \B.V. Keadze, V.A. Shurupov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetica» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 7 pages, 1 table, 1 illustration. – References – 8 titles.

Thermocorrelation method is widely used at test facilities and reactors in particular for flow measurement in fuel subassemblies. The experiments at flow calibration rig and reactor loop using hardware and digital filters suggested strong dependence of booth systematic and statistical error from frequency range chosen. Some practical recommendations are given for different conditions with the aim to minimize total error.

УДК 532.542:621.181.6

The Reduce of VVERs Steam Generator Power Output due to Deposits on the Tubes \A.A. Lukyanov, V.B. Smykov, Yu.S. Yuriev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya