

**ВОПРОСЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА
КИПЕНИЯ НАТРИЯ В МОДЕЛИ ТВС БЫСТРОГО РЕАКТОРА В АВАРИЙНЫХ
РЕЖИМАХ**

Р.Р. Хафизов, Е.Ф. Иванов, В.В. Привезенцев, А.П. Сорокин

ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского, г. Обнинск

Введение

Аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд», на Чернобыльской АЭС и Японской АЭС Фукусима показывают, что обеспечение надёжной и безопасной работы АЭС является важнейшей задачей уже на ранних этапах проектирования энергоблока с ядерным реактором. Будущее ядерной энергетики всецело зависит от обеспечения безопасной работы ЯЭУ в любых ситуациях, как при воздействии техногенных или проявлении человеческих факторов, так и в условиях природных катаклизмов.

При эксплуатации реактора на быстрых нейтронах в проточной части активной зоны возникают перекосы и изгибание твэлов, блокировки части проходных сечений ТВС и т.д., являющиеся сильными возмущающими факторами для потока теплоносителя в активной зоне, которые могут приводить к изменению гидродинамики потока теплоносителя, опрокидыванию циркуляции в отдельных каналах ТВС и, как следствие, к перегревам, вскипанию и развитию кипения теплоносителя в каналах ТВС.

Одной из наиболее опасных ситуаций, которая может привести к вскипанию теплоносителя в активной зоне быстрого реактора и далее к тяжёлой аварии, является одновременное прекращение энергоснабжения всех главных циркуляционных насосов совместно с отказом органов аварийного останова реактора – авария типа ULOF. Кипение в

случае такой аварийной ситуации может возникнуть как по всему объёму активной зоны, так и в отдельных каналах ТВС. В первом случае вскипание может быть обусловлено дисбалансом между уровнем мощности, выделяемой в активной зоне, и установившимся расходом теплоносителя, а во втором – вследствие перераспределения расхода теплоносителя между отдельными каналами.

Принятые конструктивные решения активной зоны должны исключать возможности возникновения такого рода аварий. В случае вскипания теплоносителя технические характеристики активной зоны и установки в целом должны обеспечивать стабильный отвод тепла от ТВЭЛов кипящим теплоносителем.

В рамках программы по разработке системы кодов нового поколения, предназначенных для анализа и обоснования безопасности перспективных реакторных установок, в ГНЦ РФ-ФЭИ проводится подготовка серии экспериментов по кипению натрия в каналах ТВС. Исследования посвящены изучению режимов кипения натриевого теплоносителя в активной зоне перспективных быстрых реакторов с целью получения данных для верификации новой версии расчётного компьютерного кода COREMELT [1]. Эксперименты являются частью программы по созданию единого расчетно-экспериментального комплекса, который с большей точностью позволит определять необходимые режимы и условия работы как для конкретных экспериментов с кипением щелочных теплоносителей в моделях ТВС, так и для проектируемых коммерческих установок.

Исследования кипения жидкометаллических теплоносителей

Первые экспериментальные работы по кипению металлов в России, были выполнены на ртути в 40-ые годы С.С. Кутателадзе, М.А. Стыриковичем и др. [2, 3, 4]. Дальнейшее развитие исследований кипения металлов было обусловлено потребностями атомной энергетики. В первую очередь, требовалась оценка поведения активной зоны реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, в условиях отклонения от нормального режима эксплуатации, при которых может возникнуть вскипание натрия (блокировки ТВС в

связи с радиационным повреждением твэлов, закупорка проходного сечения канала и др.). В области исследований кипения жидких металлов было проведено большое количество как аналитических, так и экспериментальных работ, а также выполнен ряд фундаментальных обзоров под руководством крупнейших исследователей, таких как В.И. Субботин, П.Л. Кириллов, Ю.А. Зейгарник и др. [5–25].

В конце 60-х годов в ФЭИ были спроектированы и сооружены несколько установок для экспериментов при естественной и принудительной циркуляции натрия и калия. Освоенная техника эксперимента на высокотемпературных установках при температурах до 1000°C позволила получить данные о теплообмене при кипении натрия и калия в трубе при разных способах нагрева теплоносителя (металлом или электричеством) [21, 22]. Подобные исследования проводились другими исследователями как В.М. Боришанским и др. [23], И.Т. Аладьевым и др. [24], Ю.А. Зейгарником и В.Д. Литвиновым [25].

За рубежом основная масса исследований поначалу была связана с кипением ртути и амальгам. В этой области известны работы Бониллы, Лунардини, Микиоши, Вагнера и др. [26-28, 31-35]. Ряд стран (Япония, США, Франция, Англия, Германия), начиная с 70-х годов, начали реализацию долгосрочных программ по безопасности реакторов с жидкометаллическим охлаждением. Основное внимание уделялось изучению динамики развития паровой фазы в ТВС, особенностям охлаждения при кипении теплоносителя в области за блокадой в ТВС и т. д. В частности, в Японии проведены поэтапные исследования аварийных процессов с кипением жидкометаллического теплоносителя в кольцевых каналах и в многостержневых сборках. В Германии исследовались нестационарные процессы, связанные с изучением аварии при потере теплоносителя и блокировки части проходного сечения ТВС. Во Франции выполнены исследования кипения в ТВС в стационарных условиях, при медленных переходных процессах с падением расхода, при естественной конвекции, в быстропротекающих процессах с ростом мощности или падением расхода. В США было проведено исследование перегрева теплоносителя на начальной стадии кипения при разных тепловых потоках и скоростях теплоносителя. Работы

выполнялись ведущими зарубежными специалистами такими как O.E. Dwyer, R.C. Noyes, P.I. Marto, W.M. Rohsenow, K. Yamaguchi и др. [36-51, 53, 54, 64].

Полученные результаты исследований показали, что кипение жидких щелочных металлов имеет характерные особенности, во многом обусловленные их физическими свойствами (высокая теплопроводность, низкая теплоемкость, высокое поверхностное натяжение), а также низким давлением (большое различие в объемах паровой и жидкой фаз):

- при кипении жидких металлов образуются пузыри достаточно больших размеров на ограниченном числе центров парообразования;
- основная часть времени образования парового пузыря приходится на период ожидания (прогрев пристенного слоя жидкометаллического теплоносителя);
- рост развитого пузыря носит взрывообразный характер, скорость роста пузыря имеет порядок 10 м/с;
- основные режимы течения двухфазных потоков щелочных металлов те же, что и у обычных теплоносителей;
- фазовый переход при дисперсионно-кольцевом режиме течения щелочных металлов в каналах, как правило, осуществляется испарением с поверхности пристенной пленки жидкого металла, коэффициенты теплоотдачи при этом достигают сотен $\text{кВт}/\text{м}^2$.

Многочисленные исследования физики кипения жидких металлов показали, что устойчивое кипение металла не приводит к серьезной аварийной ситуации, тогда как неустойчивое кипение металла может быть опасным. Режимы, называемые как неустойчивое кипение, характеризуются большими колебаниями температуры тепловыделяющей поверхности, и интенсивности теплообмена. Исследования по обеспечению безопасной работы быстрых реакторов в режимах, связанных с кипением теплоносителя в активной зоне, направлены в первую очередь на выявление условий, при которых в режиме кипения обеспечивается надежное охлаждение твэлов и не возникает кризис теплоотдачи.

Теплоотдача при кипении жидких металлов

На теплоотдачу при кипении жидкометаллического теплоносителя влияет много факторов, основными из которых являются давление, плотность теплового потока, критерий Прандтля, состояние поверхности теплообмена (шероховатость), смачивание поверхности теплообмена теплоносителем, режимы течения двухфазного потока.

В работе [5] коэффициент теплоотдачи при развитом пузырьковом кипении щелочных металлов в большом объёме описывается следующими зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 4,96q^{2/3} \left(\frac{\lambda r \rho'}{\sigma T_s^2} \right)^{1/3} \left(\frac{p}{p_{кр}} \right)^{0,45} && \text{при } \frac{p}{p_{кр}} = 4 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-3} \\ \alpha &= 0,62q^{2/3} \left(\frac{\lambda r \rho'}{\sigma T_s^2} \right)^{1/3} \left(\frac{p}{p_{кр}} \right)^{0,15} && \text{при } \frac{p}{p_{кр}} = 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-2} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где λ , ρ' и σ – теплопроводность, плотность и поверхностное натяжение жидкой фазы соответственно, r – скрытая теплота парообразования. Формулы (1) пересчитаны в систему СИ из приведенных в первоисточнике соотношений в технической системе единиц. Согласно [5] эти формулы обобщают с точностью $\pm 20\%$ опытные данные для натрия, цезия [23] и калия [40].

На основании принципа термодинамического подобия щелочных металлов, все теплофизические свойства (λ , r , σ , ρ , T_s) можно выразить через отношение $p/p_{кр}$. Тогда формулы (1) примут более простой вид:

$$\alpha = Aq^{2/3} \left(\frac{p}{p_{кр}} \right)^n \quad (2)$$

Аналогичные эмпирические соотношения для расчета теплообмена при развитом пузырьковом кипении различных жидкометаллических теплоносителей (ЖМТ) в виде следующей формулы

$$\alpha = A \cdot q^m \cdot p^n, \quad (3)$$

где q – плотность теплового потока, $Вт/м^2$; p – давление, $МПа$, были предложены В.М. Боришанским и др. [23].

Соотношения, задаваемые формулой (3) совпадают с формулами для пузырькового кипения воды и других жидкостей при давлении равном $0,1 МПа$. Причиной данного сходства являются близкие величины скорости испарения $w_{ev} = q/(r \cdot \rho)$, так как теплота испарения на единицу объема разных жидкостей примерно одинакова. Таким образом, с точностью $\pm 50\%$ теплообмен при кипении не только термодинамически подобных металлических, но и других жидкостей описывается практически одинаковыми соотношениями.

Данные по теплоотдаче ЖМТ в каналах и пучках разрозненны и не систематизированы, отсутствует обобщающая зависимость, с учетом влияния всех факторов. При вынужденном течении парожидкостной смеси металлов в трубе (при давлениях около $0,1 МПа$) уже при массовых паросодержаниях $0,01-0,05$ наступает дисперсно-кольцевой режим. Он характеризуется тем, что $95-99\%$ жидкости находится в виде капель в центральной области потока. Коэффициент теплообмена при таких условиях имеет примерно такую же величину, что и при кипении в большом объеме.

В дисперсно-кольцевом режиме фазовый переход связан с испарением с поверхности пристенной пленки жидкого металла, имеющей малую толщину и высокую теплопроводность [25]. Влияние массовой скорости и паросодержания на теплообмен, по-видимому, несущественно. Выполненные эксперименты [7] подтвердили это предположение – коэффициент теплоотдачи при кипении натрия в широком диапазоне плотностей теплового потока ($q = 0,2 \dots 1,1 МВт/м^2$) оставался по существу неизменным и равным $(2,5 \dots 4) \cdot 10^5 Вт/(м^2 K)$.

Однако в опытах [24] при кипении калия наблюдалась хорошо известная зависимость для теплоотдачи при кипении $\alpha \sim q^{0,7}$ для неметаллических жидкостей. Эта зависимость оказалась близкой соответствующей зависимости для теплоотдачи при кипении в большом

объеме. Совпадение зависимости $\alpha(q)$, полученной в опытах с кипением жидкого металла в большом объеме и в трубах скорее не случайно. Аналогичное совпадение имеет место при кипении воды, а именно: теплообмен при кипении в каналах и умеренных скоростях смеси соответствует соотношениям для теплообмена при кипении воды в большом объеме. При малых скоростях пароводяной смеси $\alpha \sim q^{0,7}$, а при больших – $\alpha \sim \omega^{0,8}$, как это наблюдается для конвективного теплообмена.

В результате обработки результатов экспериментальных исследований были получены экспериментальные данные по теплоотдаче при кипении жидкого металла в семи стержневой сборке в контуре с естественной циркуляцией. Эти данные, в сопоставлении с данными по кипению калия в большом объеме и трубах представлены на рисунке 1.

Результаты проведенных исследований показывают, что существует четыре области теплоотдачи при кипении жидких металлов в каналах:

1. Область перегрева жидкости (она может отсутствовать) [56, 57].
2. Область развитого кипения – интенсивного теплообмена при $0 < x < x_{\text{lim}}$ (исследование теплоотдачи в области интенсивного теплообмена проводилось рядом авторов [52, 56, 57 и др.] на рабочих участках, как с электрообогревом, так и с натриевым обогревом, в широком диапазоне весовых паросодержаний – от нуля до значения, характеризующего начало кризиса).
3. Переходная область при $x'_{\text{lim}} < x < x''_{\text{lim}}$ [63].
4. Область ухудшенного теплообмена (закризисная область) при $x'_{\text{lim}} < x < 1$.

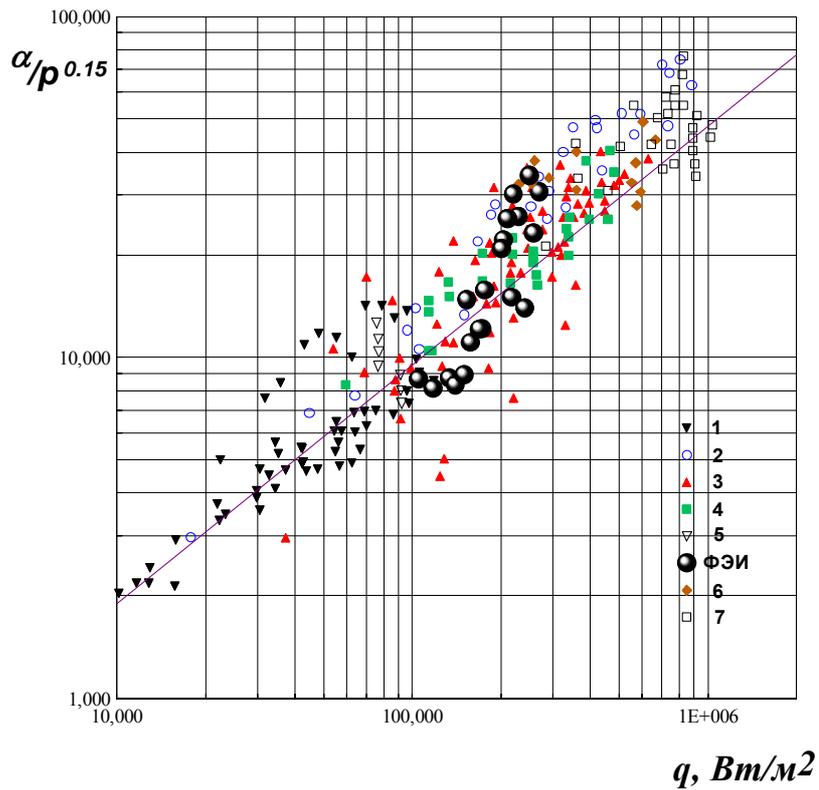


Рисунок 1 – Сравнение экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении к жидким металлам в трубах и ТВС

Калий:

- ▼ – кипение в большом объеме [58],
- – труба, $d = 10 \text{ мм}$ (теплообменник) [58, 59],
- ▲ – труба, $d = 6 \text{ мм}$ (электрический нагрев) [62],
- – труба, $d = 10 \text{ мм}$ (электрический нагрев) [58, 59],
- ▽ – труба, $d = 22 \text{ мм}$ (электрический нагрев) [60],
- ◆ – труба, $d = 8,3 \text{ мм}$ (электрический нагрев) [60],
- – труба, $d = 4 \text{ мм}$ (электрический нагрев) [61].

Эвтектический натрий-калиевый сплав:

- – семи стержневой пучок (электрический нагрев),
- – расчет по формуле для кипения жидких металлов в большом объеме [7]

Картограмма режимов течения двухфазного потока жидких металлов

Несмотря на достаточно большое число выполненных исследований, задача определения режима двухфазного потока остается в настоящее время в значительной мере нерешенной и единственно реальным является приближенное описание границ существования течений с различными структурами – с помощью приближенных карт режимов двухфазного потока. Многочисленность параметров, влияющих на режим течения, и их сложная зависимость друг от друга не позволяет построить "универсальную" карту режимов и приводит к совокупности карт режимов, каждая из которых описывает определенный класс двухфазных потоков.

Возможно ли использование карт режимов, полученных для кипения воды, в расчетах характеристик двухфазных потоков жидкого металла, или, ввиду специфики процесса кипения жидкого металла, необходимо построение специальной карты режимов? Несмотря на то, что карты режимов Беннета [69] и Дорощука [66] получены для воды, кипящей при схожих условиях высокого давления, сравнение указывает на их существенное отличие. Это еще раз подтверждается утверждение о сложной зависимости режимов течения двухфазного потока от различных теплофизических и гидродинамических параметров. Из вышеуказанного вытекает необходимость проведения анализа исходных картограмм с целью выявления зависимости того или иного режима течения от наиболее существенных определяющих параметров.

Результаты исследований границ режимов течения двухфазных потоков жидкого металла не так обширны как для воды. Из полученных для жидкого металла экспериментальных карт режимов течения можно отметить картограммы, построенные по результатам экспериментов на моделях ТВС с натрий-калиевым теплоносителем в ГНЦ РФ-ФЭИ [29, 30] и на натрием, представленную в работе Ямагучи [64] в диапазоне $\rho W < 250 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$. Сравнение этих данных с экспериментальными данными Коста [67], полученными в

условиях вынужденной конвекции при использовании циркуляционного насоса малой мощности, и данными Фоске [68], показывает их удовлетворительное согласие (рисунок 2).

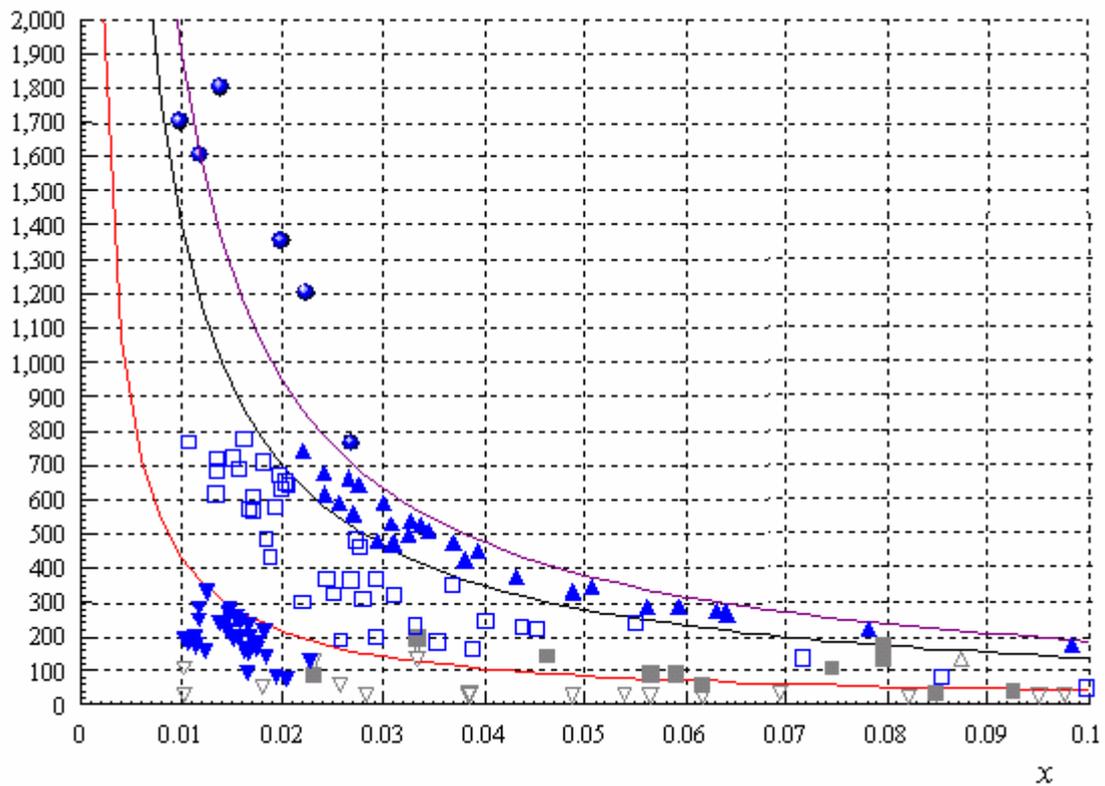


Рисунок 2 – Картограмма режимов течения двухфазного потока жидкого металла:

Данные Ямагучи [64]:

▽ – первый стабильный режим;

■ – пульсационный режим;

△ – второй стабильный режим.

Данные ГНЦ РФ-ФЭИ:

▼ – пузырьковый режим;

□ – снарядный режим;

▲ – дисперсно-кольцевой режим.

Данные по критическим тепловым потокам:

● – Данные Коста [67] и Фоске [68].

Границы между режимами течения двухфазного потока жидкого металла на карте режимов рассчитываются по формуле:

$$\rho W = A(\rho_0 W_0) \left(\frac{1}{x} - x \right), \quad (3)$$

где A – безразмерный коэффициент; $(\rho_0 W_0)$ – базовая величина, носитель размерности;

$A(\rho_0 W_0) = 4,3$ – граница между пузырьковым и снарядным режимами;

$A(\rho_0 W_0) = 14$ – граница между снарядным и дисперсно-кольцевым режимами;

$A(\rho_0 W_0) = 19$ – граница перехода в режим закризисного теплообмена.

Кризис теплообмена при кипении металлов в каналах и ТВС

Имеющиеся экспериментальные данные показывают, что при кипении металлов в каналах возникает кризис теплообмена второго рода. В условиях дисперсно-кольцевого потока жидкость течет по стенке канала в виде пленки и в центре потока в виде капель. Кризис в этой области связан с высыханием жидкой пленки в условиях, когда выпадение капель жидкости из потока на стенку не компенсирует убыль уносимой и испаряющей жидкости на стенке [7].

Опыты по исследованию кризиса при кипении металлов в ФЭИ проводились в парогенерирующих трубах, обогреваемых как жидким металлом, так и непосредственным пропусканием электрического тока [22].

Основные закономерности, установленные при исследовании этого явления заключаются в следующем:

– Величина q_{cr} возрастает с увеличением массовой скорости пропорционально $G^{0,8}$ и уменьшается с увеличением длины трубы $q_{cr} \sim l^{-(0,8 \pm 1)}$;

– влияние давления не отмечается в большинстве опытов, в связи с узким диапазоном давлений, охватываемым опытами;

- величина q_{cr} уменьшается с увеличением паросодержания;
- пульсации расходов приводят к уменьшению величины q_{cr} ;
- для разных условий наблюдаются ряд зависимостей $x_{lim} = f(G)$.

Устойчивость кипения

Проведённые в ГНЦ РФ-ФЭИ экспериментальные исследования показали, что процесс кипения жидкометаллического теплоносителя в сборке имитаторов твэлов проходит несколько стадий по мере увеличения плотности теплового потока.

Сначала наблюдается режим пузырькового кипения, когда образуются мелкие паровые пузырьки, которые не вносят существенных изменений в характер течения теплоносителя по сравнению с однофазным потоком, (расход сохраняется при значении, соответствующем режиму без кипения, характер течения устойчивый, без пульсаций).

Затем наступает снарядный режим, который характеризуется тем, что образуются крупные паровые пузыри через значительные временные интервалы. Частота образования пузырей растёт по мере увеличения подводимой мощности. Образование в сборке и отрыв крупных паровых пузырей вызывает резкие колебания (пульсации) расхода, в связи, с чем наблюдаются также значительные пульсации температур теплоносителя и оболочки имитаторов, давления.

Дальнейшее увеличение подводимой мощности приводит к тому, что по мере роста частоты образования пузырей они сливаются, прекращаются пульсации расхода и постепенно наступает третий режим кипения – дисперсно-кольцевой. Расход теплоносителя возрастает примерно в три раза по сравнению с однофазным течением. Эта величина, по-видимому, зависит от гидравлического сопротивления контура циркуляции, а температура поверхности оболочек имитаторов твэлов сохраняется на уровне температуры насыщения. Дисперсно-кольцевой режим характеризуется наличием пленки жидкости на теплоотдающей поверхности и наличием паро-капельной смеси в ядре потока.

С повышением мощности энерговыделения идет постоянное высыхание пленки жидкости, что происходит вследствие испарения и уноса жидкости потоком пара. Механизм разрушения пленки реализуется при довольно высоких объемных паросодержаниях $\varphi > 0,6$. Разрушение пленки жидкости ведет к резкому падению коэффициента теплоотдачи, подъему температуры оболочек выше t_s и расплавлению тепловыделяющих элементов (наступает кризис теплоотдачи).

Кризис теплоотдачи имеет гидродинамическое происхождение и только при больших перегревах относительно температуры насыщения (на величину более 100°C) носит термодинамический характер, когда жидкая фаза не может существовать на столь перегретой поверхности. В связи с этим на процесс будут оказывать влияние также такие факторы как контурная и межканальная неустойчивости потока в контуре естественной циркуляции с кипящим теплоносителем.

Исследования теплообмена в ТВС в аварийных режимах

Задачами предстоящих экспериментальных исследований являются обнаружение и регистрация вскипания и кипения натриевого теплоносителя в модели ТВС, изучение влияния на режимы течения двухфазного потока натриевой полости над моделью ТВС и подтверждение корректности расчётных результатов по модели кипения принятой в последней версии кода COREMELT.

В состав экспериментальной установки входят два контура: экспериментальный натриевый контур и вспомогательный натрий-калиевый контур. Экспериментальный контур состоит из подъёмного участка с расположенной в нём моделью ТВС из 7-ми электрообогреваемых имитатором твэлов и имитатора ПЭЛ, дыхательного бака, опускающего участка и дополнительного подогревателя на входе в подъёмную ветвь. Вспомогательный контур используется для охлаждения теплоносителя натриевого контура. Отвод тепла от натриевого контура осуществляется холодильником дыхательного бака экспериментального

участка. Вспомогательный контур имеет в своём составе циркуляционные насосы, систему очистки теплоносителя, а также воздушный холодильник.

Контур, предназначенный для проведения экспериментов по кипению натриевого теплоносителя, изображён на рисунке 3. Он представляет собой замкнутый контур циркуляции и состоит из экспериментального участка, содержащего модель ТВС с семью электрообогреваемыми имитаторами твэлов, дыхательного бака, опускного трубопровода и подъёмного участка с дополнительным подогревателем.

Все трубопроводы, ёмкости и другие устройства экспериментального контура снабжены электрической системой подогрева для поддержания теплоносителя в жидком состоянии.

Имитатор твэла представляет собой цилиндрическую оболочку с внешним диаметром 8 мм и длиной около 1000 мм с установленной в неё спиралью из тугоплавкого металла. Пространство между спиралью и оболочкой заполнено плавленной окисью магния. Оболочка состоит из двух коаксиальных труб диаметрами 8 мм и 7,2 мм изготовленных из жаропрочной стали. Обогреваемая длина имитатора твэл составляет 600 мм.

В качестве нагревательного элемента в имитаторе использована спираль из молибденовой проволоки диаметром 1 мм. Диаметр витка спирали 3 мм и шаг спирали также 3 мм, рабочая длина спирали 600 мм. С одной из сторон спирали закреплён молибденовый токоподвод диаметром 4 мм, при помощи которого нагревательный элемент соединяется с контактами источника питания.

Для дистанционирования имитаторов твэлов в модельной сборке использована проволока диаметром 0,8 мм. Проволока навита на внешнюю поверхность оболочки имитатора с шагом 100 мм. Также в качестве навивки используется хромель-алюмелевая термопара.

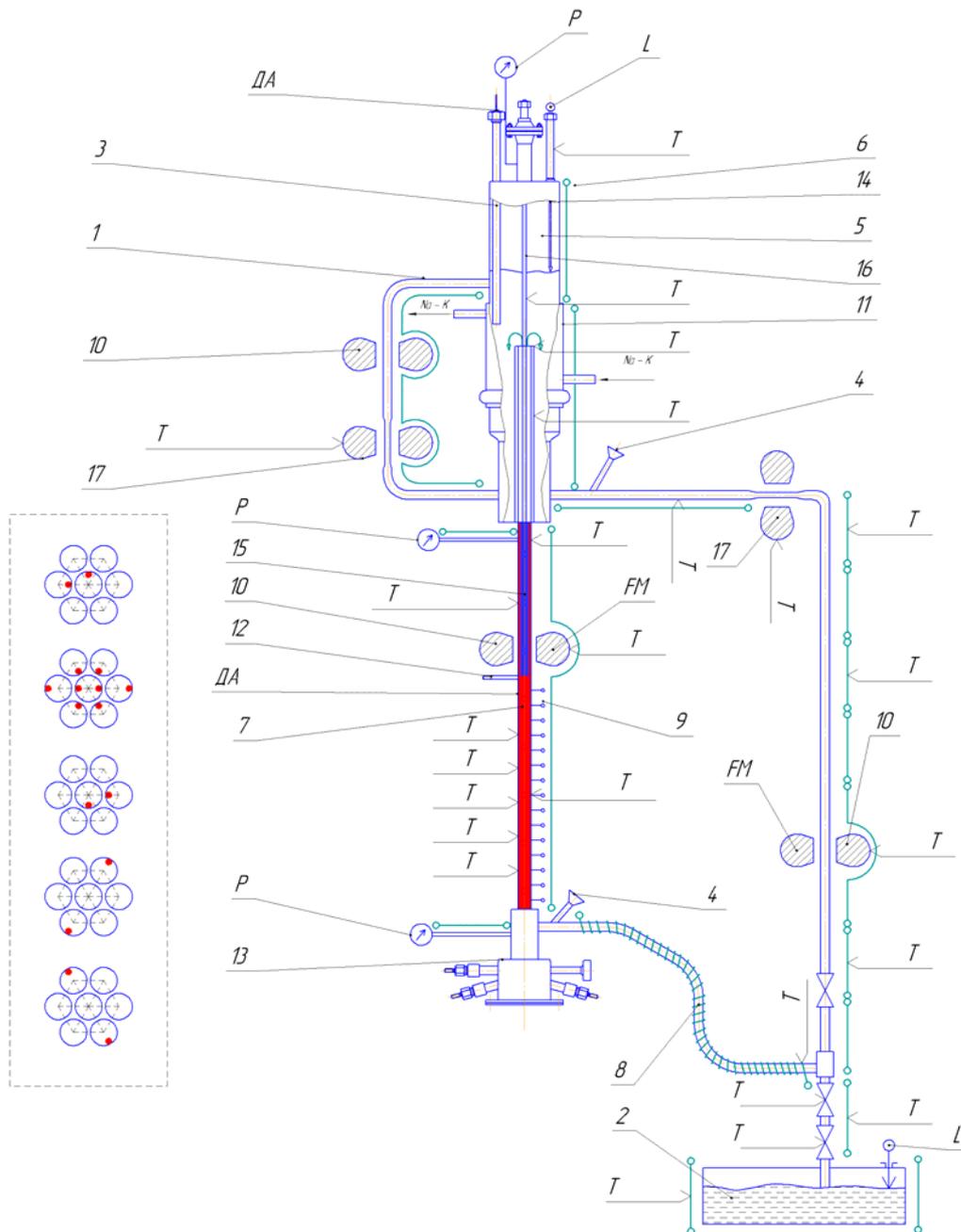


Рис. 3 – Схема экспериментального контура:

1 – байпасная линия, 2 – бак с натрием, 3 – акустический датчик, 4 – патрубки для ввода термопар, 5 – газовая подушка, 6 – дыхательный бак с натрием, 7 – участок с моделью ТВС, 8 – дополнительный подогреватель, 9 – отводы потенциметрических датчиков, 10 – магнитные расходомеры, 11 – рубашка-холодильник с натрий-калиевым теплоносителем, 12 – токоподвод, 13 – узел размещения токоподводов имитаторов твэлов, 14 – уровнемер, 15 – область размещения вытеснителя, 16 – штанга вытеснителя, 17 – электромагнитный насос байпасной линии

Тепловыделяющая сборка собрана из 7-ми имитаторов ТВЭЛ с треугольным шагом, и помещена в шестигранный чехол, изготовленный из жаропрочной стали. Относительный шаг решётки $s/d = 1,125$. Чехол состоит из двух сваренных между собой желобов, изготовленных из листовой жаропрочной стали, толщиной 3 мм. Чехол также выполняет функцию корпуса тестовой секции, а его внешняя поверхность должна быть снабжена подогревателем и заключена в слой теплоизоляции.

В процессе проведения экспериментальной работы будет производиться измерение следующих параметров:

- Электрическая мощность имитаторов твэлов.
- Расход и пульсации расхода теплоносителя в модельном контуре.
- Давление теплоносителя на входе и выходе модели ТВС, пульсации давления, давление газовой подушки.
- Температуры стенок имитаторов твэл в нескольких сечениях по длине участка энерговыделения.
- Температуры теплоносителя в различных участках контура, в том числе в зоне обогрева.
- Регистрация наличия паровой фазы по высоте модели ТВС (потенциометрические датчики).

После выполнения предварительных расчётных работ и анализа полученных результатов должна быть проведена серия экспериментов по изучению стационарных режимов течения двухфазного потока натрия в условиях вынужденной конвекции. Далее необходимо провести сравнительные эксперименты с установленным в канал вытеснителем, при этом моделируется натриевая полость, а также без установки вытеснителя в канал. Следует отметить, что при вскипании теплоносителя в области натриевой полости в активную зону вносится отрицательная реактивность. Но при этом, неизвестно каким образом натриевая полость повлияет на направление и скорость роста паровой фазы, а также на расход и другие технологические параметры теплоносителя в процессе его кипения.

Задача следующего этапа экспериментов – смоделировать аварийную ситуацию, связанную с отказом электропитания ГЦН при совместном отказе систем аварийного останова реактора (авария типа ULOF). Методика проведения этого эксперимента заключается в том, что установка сначала выводится в стационарный режим работы, а затем по заданной программе начинается снижение мощности, выделяемой имитаторами ТВЭЛов и снижение расхода теплоносителя в циркуляционном контуре. При достижении на стенках имитаторов ТВЭЛов предельно допустимой температуры происходит отключение электропитания имитаторов для предотвращения их разрушения.

Применительно к аварийному расхолаживанию планируется провести ряд экспериментов в условиях естественной циркуляции теплоносителя. В этом эксперименте температура теплоносителя повышается постепенно с увеличением мощности имитаторов. По достижению температуры насыщения при дальнейшем увеличении энерговыделения начинается процесс кипения, и циркуляция теплоносителя в контуре интенсифицируется. Тепло из циркуляционного контура отводится посредством вспомогательного натрий-калиевого контура, в составе которого есть воздушный холодильник.

Заключение

Проведенный анализ и обобщение полученных результатов экспериментальных исследований, полученные соотношения для коэффициента теплоотдачи и критическому тепловому потоку, картограмма режимов течения двухфазного потока жидкометаллических теплоносителей в ТВС, новые экспериментальные исследования являются отправной точкой для создания математических моделей изучаемого процесса и реализации на их основе верифицированных теплогидравлических компьютерных кодов.

Список литературы.

1. Волков А.В., Кузнецов И.А. Усовершенствованная модель кипения натрия для анализа аварий в быстром реакторе // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – №2. – С. 101-111.
2. Кутателадзе С.С., Зысина Л.В. Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении ртути // Советское котлотурбостроение. – 1939. – № 8. – С. 279-283.
3. Стырикович М.А., Семеновкер И.Е., Сорин А.Р. // Советское котлотурбостроение. – 1940. – № 9. – С. 316.
4. Ложкин А.Н., Канаев Л.М. // Советское котлотурбостроение. – 1938. – № 4.
5. Теплообмен при кипении металлов в условиях естественной конвекции / Под ред. В.И. Субботина, Д.Н. Сорокина, Д.М. Овечкина, А.П. Кудрявцева. – М.: Наука. 1969.
6. Жидкометаллические теплоносители. 2-ое изд. / Под ред. В.М. Боришанского, С.С. Кутателадзе, И.И. Новикова, О.С. Федынского. – М.: Атомиздат. – 1967.
7. Зейгарник Ю.А., Литвинов В.Д. Кипение щелочных металлов в каналах. – М.: Наука. 1983.
8. Двайер О. Теплообмен при кипении жидких металлов. – М.: Наука. 1980.
9. Зейгарник Ю.А., Кириллов П.Л., Ушаков П.А., Ивановский М.Н. Теплообмен жидких металлов при кипении и конденсации // Теплоэнергетика. – 2001. – № 3. – С. 2-8.
10. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллического теплоносителя. – М.: Атомиздат. 1970.
11. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета) / Под ред. В.И. Субботина, М.Х. Ибрагимова, П.А. Ушакова, В.П. Бобкова, А.В. Жукова, Ю.С. Юрьева. – М.: Атомиздат. 1975.
12. Кириллов П.Л. Учет контактных термических сопротивлений теплообмену жидких металлов в круглой трубе. Препринт ФЭИ-284. – Обнинск.: ГНЦ РФ-ФЭИ. 1971.
13. Кириллов П.Л., Грачев Н.С. Изучение упругости паров натрия при температурах 880-1300⁰С // Инженерно-физический журнал. – 1959. – Т. 2. – № 5. – С. 3-8.

14. Кириллов П.Л., Грачев Н.С. Экспериментальное определение упругости паров калия температурах 550-1280⁰С // Инженерно-физический журнал. – 1960. – Т. 3. – № 6. – С. 62-65.
15. Минашин В.Е., Субботин В.И., Ушаков П.А., Шолохов А.А. Применение микротермопар в исследовании теплоотдачи // В кн.: Вопросы теплообмена. – М.: Изд-во АН СССР. 1959.
16. Кириллов П.Л., Ушаков П.А. Теплообмен жидких металлов: особенности, методы исследований и основные зависимости // Теплоэнергетика. – 2001. – № 1. – С. 49-56.
17. Минашин В.Е., Ушаков П.А., Шолохов А.А. Об ошибке измерения температуры за счет искажения в районе заделки термопар. В кн.: Конвективный и лучистый теплообмен. – М.: АН СССР. 1960.
18. Кириллов П.Л., Субботин В.И., Суворов М.Я., Троянов М.Ф. Теплоотдача к сплаву натрия с калием и к ртути // Атомная энергия. – 1959. – Т. 6. – № 4. – С. 382-390.
19. Логинов Н.И. Электромагнитные преобразователи расхода жидких металлов. – М.: Энергоиздат. 1981.
20. Субботин В.И., Кириллов П.Л., Турчин М.Н. Магнитные расходомеры для жидких металлов // Атомная энергия. – 1960. – Т. 9. – №3.
21. Бережной В.Д., Грачев Н.С., Кириллов П.Л., Субботин В.И., Турчин М.Н. Установка для изучения кипения калия в трубах // Теплофизика высоких температур. – 1968. – Т. 6. – № 2. – С. 186.
22. Грачев Н.С., Зеленский В.Н., Кириллов П.Л., Субботин В.И., Турчин М.Н. Теплообмен и гидродинамика при кипении калия в трубах // Теплофизика высоких температур. – 1968. – Т. 6. – № 4. – С 682-690.
23. Боришанский В.М., Жохов В.А., Андреевский А.А. Теплоотдача при кипении жидких щелочных металлов // Атомная энергия. – 1965. – Т. 19. – № 2. – С. 191-193.
24. Аладьев И.Т., Горлов И.Г., Додонов Л.Д. и др. Теплообмен при кипении калия в трубах с равномерным теплоподводом // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1966. – № 2. – С. 136.

25. Зейгарник Ю.А., Литвинов Ю.Д. Экспериментальное исследование теплообмена и потерь давления при кипении натрия в вертикальной трубе. В кн.: Теплообмен-V. – Минск. – 1975. – Т. 3. – Ч. 1. – С. 147-156.
26. Madsen N., Bonilla C. // Chemical Engineering. Progress. Symposium Series. – 1960. – Vol. 56. – No. 30. – P. 251.
27. Farmer W.S. /Ph. D. Thesis, University of Tennessee, 1952. Quoted by Dwyer O. E. Boiling Liquid Metal Heat Transfer.-Hinsdale. American Nuclear Society. – 1976.
28. Lyon R., Foust A., Katz D., 1955, Boiling Heat Transfer with Liquid Metals // Chemical Engineering Prog. Symposium Series. – 1955. – Vol. 51. – No. 7. – P. 41-47.
29. Сорокин А.П., Иванов Е.Ф., Мальков В.Л., и др. Экспериментальные исследования теплообмена и устойчивости кипения жидкометаллического теплоносителя в контуре естественной циркуляции // Препринт ФЭИ-2631. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ. 1997. – 32с.
30. Корхов О.А., Богословская Г.П., Сорокин А.П. О сопоставлении данных по кипению жидких металлов // Препринт ФЭИ-2649. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ. 1997. – 30с.
31. Bonilla C.F., Busch J.S., et al. Pool Boiling Heat Transfer with Mercury // Chemical Engineering. Progress. Symposium Series. – 1957. – Vol. 53. – No. 20. – P. 51-57.
32. Lunardini V.Jr. An experimental Study of the Effect of a Horizontal Magnetic Field on the Nucleate Pool Boiling of Water and Mercury with 0.02 Percent Mg and 0.0001 Percent Ti / Ph. D. Thesis, Mechanical Engineering Dept., Ohio State University. – 1963.
33. Bonilla C.F., Grady J.J., Avery G.W. Pool Boiling Heat Transfer from Scored Surfaces // Chemical Engineering. Progress. Symposium Series. – 1965. – Vol. 61. – No. 57. – P. 280-288.
34. Michiyoshi I., Takahashi O., Serizawa A. Effects of Magnetic Field Pool on Pool Boiling Heat Transfer for Mercury // Department of Nuclear Engineering Report, Kyoto University, Kyoto, Japan. – 1975. – P. 1-3 (Quoted by Wagner L.R. and Lykoudis PS in [35]).
35. Wagner L.R. and Lykoudis P.S. Mercury Pool Boiling under the Influence of a Horizontal Magnetic Field // Int. Journal of Heat & Mass Transfer. – 1981. – No. 24. – P. 635-643.
36. Noyes R.C. An experimental Study of Sodium Pool Boiling Heat Transfer // Transactions of ASME. Ser. C. – 1963. – Vol. 85. – No. 2.

37. Marto P.I., Rohsenow W.M. Effect of Surface Conditions on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer to Sodium // Transactions of ASME. Ser. C. – 1966. – Vol. 88. – No. 2. – P. 51-59.
38. Fujishiro T., et al. The 8th Japan Heat Transfer Symp. – 1971, – P. 153-156, Quoted in Aoki. S., Current Liquid Metal Heat Transfer Research in Japan // Prog. Heat Mass Transfer. – 1973. – No. 7. – P. 569-587.
39. Sakurai A., et al. Sodium Pool Boiling Heat Transfer // Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf. – 1978. – Vol. 1. – P. 193-198.
40. Bonilla C.F., Wiener M., Bilfinger H. Pool Boiling of Potassium // Proceedings of High Temperature Liquid Metal Heat Transfer Technology Meeting, September. ORNL-3605. – 1963. – Vol. 1. – P. 286-310.
41. Colver C., Balzhizer R.E. A study of Saturated Pool Boiling Potassium up to Burnout Heat Fluxes // Chemical Engineering. Progress. Symposium Series. – 1964. – Vol. 61. – No. 59. – P. 253-263.
42. Takenaka N. Natural Convection and Boiling Heat Transfer in Potassium. Doctoral Thesis, Dept. of Nuclear Engineering, Kyoto University, Kyoto. – 1984.
43. Michiyoshi I., Takenaka N., Murata T., et al. Effects of Liquid Level on Boiling Heat Transfer in Potassium Layers on a Horizontal Plane Heater // Journal of Heat Transfer. – 1985. – No. 107. – P. 468-472.
44. Michiyoshi I., Takenaka N., Takahashi O. Dry Patch Formed Boiling and Burnout in Potassium Pool Boiling // Int. Journal of Heat & Mass Transfer. – 1986. – No. 29. – P. 689-702.
45. Tang J.S., Smith C.R., Ross P.T., et al. Potassium-Mercury Amalgam Boiling Heat Transfer, Two-Phase Flow and Properties Investigation // ORNL-3605. – 1964. – Vol. 2. – P. 110-132.
46. Hoffman H.W., Krakowiak A.I. Forced-Convection Saturation Boiling of Potassium at Near-Atmospheric Pressure // Proceedings of 1962 High Temperature Liquid Metal Heat Transfer Technology Meeting. USAEC Report BNL-756, Brookhaven National Laboratory. – 1962. – P. 182-203.

47. Longo D., Brooks R., Alkali Metals Boiling and Condensing Investigations // Report ORNL-3605. 1963. – Vol. 2. – P. 86-109.
48. Bersin F., Horan J. // Report PWAC-430. – 1964.
49. Berenson F., Killakey J. An Experimental Investigation of Forced-Convection Vaporization of Potassium. – Report ORNL-3605. – 1964. – Vol. 2. – P. 1-23.
50. Bernstein E., Petrik J. – Report PWAC-429. – 1964.
51. Bernstein E., Randall D. Forced-Convection Boiling Potassium Heat Transfer Data. – Report TID 21256, PWAC. – 1964.
52. Боришанский В.М., Андриевский А.А., Жохов Л.А., и др., Теплоотдача при кипении калия в трубе в области умеренного паросодержания // Атомная энергия. – 1966. – Т. 21 – № 1. – С. 58.
53. Noyes R.C., Lurie H. Boiling Sodium Heat Transfer // Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf. Chicago. Aug. – 1966. – Vol. 5. – P. 92.
54. Fisher C.R. Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics for Boiling Rubidium in Forced Convection Flow. – Report ORNL-3605. – 1964. – Vol. 2. – P. 64-85.
55. Кириллов П.Л. Теплообмен жидких металлов в круглых трубах (однофазный и двухфазный потоки). – Докторская диссертация. – М.: ИВТАН. – 1968.
56. Андреев П.А., Боришанский В.М., Федорович Е.Д. // Сборник ст. IV Всесоюзного совещания: Тепло- и массоперенос. Минск. – 1972. – Т. 2. – Ч. 1. – С. 352.
57. Петухов Б.С., Зейгарник Ю.А. // Теплофизика высоких температур, – 1970. – Т. 8. – № 2. – С.309.
58. К итогам дискуссии о структуре и свойствах жидких металлов // Известия АН СССР. ОТН. Metallургия и топливо. – 1961. – № 3. – С. 104.
59. Makansi M., Muendel C., Selke W. // J. Phys. Chem. – 1955. – Vol.59. – No 1. – P. 40.
60. Donglas J.B., Epstein L.E. / Amer. Chem. Soc., – 1955. – Vol. 77. – No 8. – P. 2144.
61. Андреев П.А., Канаев А.А., Федорович Е.Д. Жидкометаллические теплоносители ядерных реакторов. – Л. – Судпромгиз. 1959.
62. Liquid Metals Handbook. Ed. R. L. Lyon. Second. ed. Washington. – 1955.

63. Hewitt G.F., Kearsy H.A., Lacey P.M.C., Pulling D.J. // Rept. AERE. R-4374. – 1963.
64. Yamaguchi K. Flow Pattern and Dryout under Sodium Boiling Conditions at Decay Power Levels // Nuclear Engineering and Design. –1987. – Vol. 99. – No. 3. – P. 247-263.
65. Жуков А.В., Кириллов П.Л., Матюхин Н.М. Теплогидравлический расчет ТВС быстрых реакторов с жидкометаллическим охлаждением // М.: Энергоатомиздат. – 1985.
66. Doroschuk V.E., Borevsky L.Ja., Levitan L.L. Holographic Investigation of Steam-Water Flows in Heated and Unheated Channels // Heat Transfer, Proc. VII Internat. Heat Transfer Conf., Munich, FRG. – Vol. 5. – P. 537–553.
67. Costa J., Charley P. Critical-flow experiments in a forced-convection boiling-sodium loop // Progress in Heat & Mass Transfer, NY. – 1973. – Vol 7.
68. Fauske H.K., Grolmes M.A. Pressure drop for forced convection flashing sodium // Symposium on Liquid Metal Heat Transfer and Fluid Dynamics, Winter Annual Meeting of the ASME, NY. – 30 November 1970.
69. Bennett A.W. et al. Flow Visualisation Studies of Boiling Water at High Pressures // AERE-R4874. – 1965.