

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ ЩЕЛОЧНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКАХ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ

Сорокин А.П., Денисова Н.А., Кузина Ю.А. (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,
Обнинск, Россия), Сорокин Г.А. (НИУ МФТИ, Москва, Россия)

Введение

Моделирование на современном уровне динамического кипения щелочных жидких металлов имеет важное значение для комплексного анализа нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активной зоны реакторов на быстрых нейтронах в аварийных ситуациях (UTOP, ULOF) при обосновании их безопасности [1–3].

Одним из ключевых вопросов является экспериментальное и расчетное подтверждение возможности устойчивого охлаждения активной зоны в процессе протекания аварии с кипением натрия в тепловыделяющих сборках твэлов (ТВС) активной зоны, изучение границы устойчивого охлаждения активной зоны, получение данных для валидации модели процесса кипения натрия и верификации расчетных кодов.

По сравнению с кипением воды процесс кипения жидких металлов имеет существенные особенности:

- взаимодействие отдельных факторов настолько сложно, что начальный перегрев для вскипания жидких металлов трудно прогнозировать;
- рост парового пузыря щелочного металла имеет взрывообразный характер при скорости роста ~ 10 м/с, образуются пузыри достаточно большого размера на ограниченном числе центров парообразования, основная часть времени цикла образования пузыря приходится на период ожидания;
- основные режимы течения двухфазных потоков щелочных металлов те же, что и у обычных теплоносителей: при давлении, близком к атмосферному, преобладает дисперсно-кольцевой режим течения;
- фазовый переход при дисперсно-кольцевом течении щелочных металлов в каналах, как правило, осуществляется испарением с поверхности пристенной пленки жидкого металла без образования пузырьков (кипения) на стенке, эффективный коэффициент теплоотдачи при этом достигает сотен кВт/м².

Для режимов с малыми скоростями течения или естественной конвекции в сборках твэлов, характерных для аварийных ситуаций, по кипению жидких металлов получены лишь ограниченные данные [4, 5].

В период 1995–2007 гг. в ГНЦ РФ – ФЭИ проведена серия экспериментов по кипению эвтектического натрий-калиевого сплава на моделях одиночных ТВС и в системе параллельных ТВС в контуре с естественной циркуляцией теплоносителя с целью изучения охлаждения ТВС активной зоны в аварийных режимах и в режиме аварийного расхолаживания с учетом влияния различных факторов на процесс кипения [6, 7].

Полученные результаты исследований показывают, что процесс кипения жидких металлов в ТВС формируется под воздействием различных факторов, имеет сложную структуру, характеризуется как устойчивыми, так и пульсационными режимами с значительными колебаниями технологических параметров (расхода, давления, температуры), которые могут продолжаться в течение десятков секунд и обуславливать

кризис теплообмена. Показано согласие между данными экспериментов и проведенными тестовыми расчетами [8, 9].

Для исключения развития аварийной ситуации, приводящей к разрушению элементов активной зоны реактора на быстрых нейтронах, предложено техническое решение, заключающееся в расположении в ТВС между активной зоной реактора и верхним торцевым экраном «натриевой полости». В 2010–2015 годах в ГНЦ РФ – ФЭИ были проведены исследования, впервые показавшие возможность продолжительного охлаждения имитаторов твэлов при кипении натрия в ТВС при наличии «натриевой полости» [10].

Следует отметить, что важной особенностью реакторов на быстрых нейтронах, оказывающей влияние на условия теплообмена при кипении теплоносителя в активной зоне, является низкое давление в теплоносителе и большое различие, составляющее около трех порядков, в плотностях паровой и жидкой фаз.

1. Экспериментальное оборудование и система измерений при проведении исследований

Экспериментальная установка, созданная в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» на стенде АР-1 для проведения исследований кипения жидкометаллического теплоносителя [11, 12], содержит два вертикальных канала высотой 3 м, соединенных сверху и внизу и образующих опускную и подъемную ветви циркуляционного контура, дыхательный бак и подогреватель на входе в подъемный канал (рис. 1).

В нижней части подъемного канала расположен рабочий участок с моделью ТВС с 7 имитаторами твэлов и 12 вытеснителями в треугольной решетке с шагом 1,185, заключенными в стальную трубу диаметром (50×1,5) мм. Перед ТВС в контуре установлены дроссельные устройства с шайбами 12 мм, 16 мм и 20 мм.

Имитаторы представляют собой трубки диаметром (8×1) мм, внутри которых установлены спиральные нагреватели диаметром 4 мм из молибденовой проволоки диаметром 1 мм. Пространство между спиралью и оболочкой заполнено высокотемпературной электроизоляционной засыпкой и заполнено гелием. Оболочка состоит из двух коаксиальных труб, изготовленных из жаропрочной стали. В трубе меньшего диаметра выполнены четыре продольных паза для установки термпар с головками, распределенными по длине зоны энергосвечения.

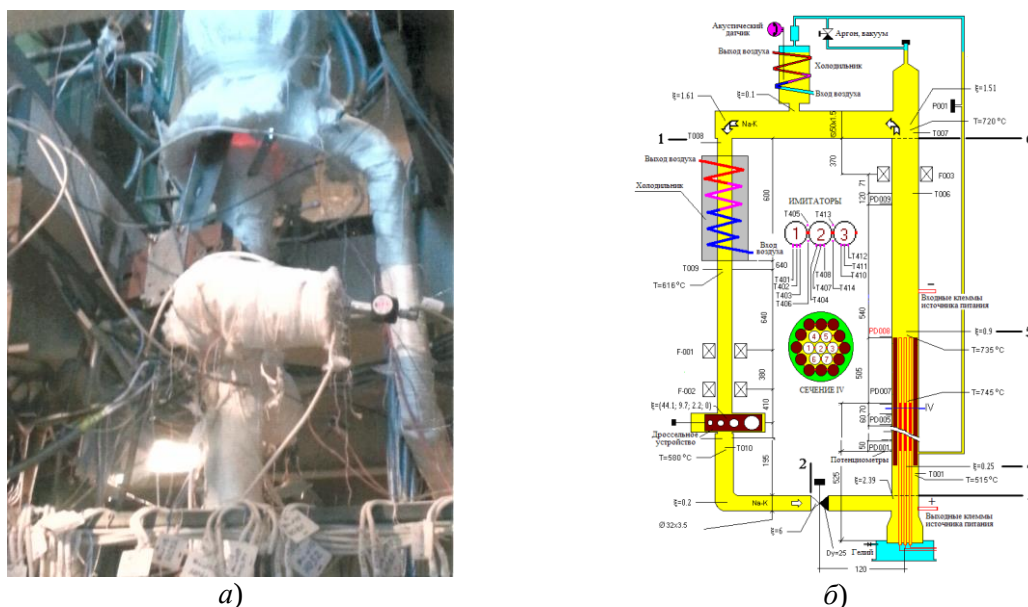


Рис. 1. Фрагмент экспериментальной установки (а) и схема рабочего участка (б) для исследований кипения жидкого металла на моделях ТВС в аварийных режимах

Установка оснащена большим количеством датчиков для измерения: давления в газовой полости, расхода и пульсаций расхода теплоносителя, статического давления в зоне кипения и флуктуаций (пульсаций) давления в теплоносителе, перепада давления между кипящей сборкой и расширительным баком, температуры теплоносителя в различных точках контура циркуляции, температуры и пульсаций температуры теплоносителя и оболочки (поверхности) имитаторов твэлов в трех сечениях по высоте участка энерговыделения, регистрации потенциометрическими датчиками паровой фазы по высоте модели ТВС, электрической мощности, подводимой к нагревателям имитаторов твэлов, уровня жидкого металла в дыхательном баке, сигналов акустической эмиссии.

2. Феноменология и анализ процесса кипения натрий-калиевого теплоносителя в модельных сборках с гладкими и шероховатыми твэлами

Выход на режим кипения жидкого металла в режиме естественной конвекции в модели ТВС осуществлялся путем повышения мощности энерговыделения имитаторов твэлов. Подогретый в модели ТВС жидкий металл поднимался в расширительный бак, в котором охлаждался и далее поступал в опускной участок. Мощность имитаторов твэлов повышалась дискретно небольшими ступенями вплоть до закипания натрия [10].

2.1. Кипение натрий-калиевого теплоносителя в модели с имитаторами твэлов с гладкой поверхностью с низкой шероховатостью (0,5 мкм)

Пузырьковое кипение жидкого металла возникло при плотности теплового потока на поверхности имитаторов твэлов 117 кВт/м^2 в конце зоны энерговыделения и по мере увеличения подводимой к модели мощности постепенно распространилось на всю зону энерговыделения. При этом расход на входе в модель оставался почти неизменным на уровне значений до начала кипения. Режим с устойчивым характером процесса кипения сохранялся до плотности теплового потока 133 кВт/м^2 , пока кипение не охватило всю зону энерговыделения.

При дальнейшем увеличении подводимой мощности произошел переход к пульсационному (снарядному) режиму, который имел периодический характер. В начале цикла происходило запаривание зоны энерговыделения, затем образовавшаяся паровая пробка (снаряд) всплывала, освобождающаяся зона обогрева заполнялась теплоносителем, поступающим на вход модели.

Разность температуры стенка – жидкость в устойчивом режиме кипения составляла в среднем 20°C . В пульсирующем режиме наблюдались резкие колебания перегрева стенки имитаторов, возрастающие по мере роста энерговыделения до $(80\text{--}90)^\circ\text{C}$, что можно объяснить осушением поверхности имитатора в области снарядов. Температурный перегрев стенки имитаторов по отношению к теплоносителю и показания датчика паросодержания на выходе из модели коррелируют с расходом теплоносителя на входе. При плотности теплового потока 151°кВт/м^2 произошло осушение поверхности имитаторов (кризис теплообмена второго рода) и расплавление оболочки.

2.2. Кипение в модели с имитаторами с шероховатой поверхностью промышленного изготовления (1,5 мкм)

В эксперименте с вариантом дроссельной шайбы диаметром 20 мм в начальной стадии процесса кипения при достижении плотности теплового потока 125 кВт/м^2 наблюдался процесс кипения с устойчивыми параметрами, характерный для пузырькового режима: температуры теплоносителя и имитаторов, перепада давления на сборке, расхода теплоносителя на входе и выходе из зоны обогрева (рис. 2).

При повышении энерговыделения до 140 кВт/м^2 произошел переход к неустойчивому, пульсационному режиму. Этот режим характеризовался высокой амплитудой пульсаций температуры стенки (до 100°C) и расхода теплоносителя (в интервале от $0,3$ до $1,2 \text{ м}^3/\text{ч}$). Образующиеся с интервалом 40 с и более крупные паровые пузыри (снаряды) в момент всплытия вызывали резкое увеличение расхода теплоносителя на входе в пучок и значительные колебания всех параметров. Очевидно, что колебания параметров имели гидродинамическую природу и определялись не только непосредственно процессом кипения теплоносителя только в ТВС, но и комплексом процессов, происходящих в сборке и циркуляционном контуре в целом. Постепенно угасавший пульсационный (снарядный) режим в диапазоне теплового потока от 200 до 230 кВт/м^2 перешел в дисперсно-кольцевой режим, характеризующийся стабильностью измеряемых параметров.

При тепловом потоке свыше 230 кВт/м^2 наблюдалось уменьшение расхода теплоносителя в циркуляционном контуре и переход от дисперсно-кольцевого к дисперсному режиму кипения (закризисному теплообмену), поскольку истинное объемное паросодержание увеличилось незначительно, а трение двухфазного потока (как и паросодержание) стало существенным.

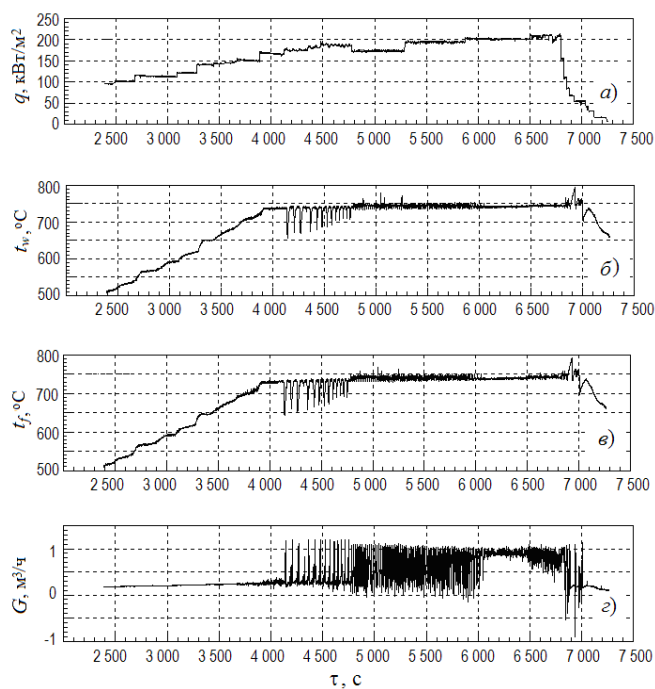


Рис. 2. Плотность теплового потока (а), температура имитатора (б) и теплоносителя (в) на выходе из зоны энерговыделения и объемный расход теплоносителя (г) в эксперименте с дроссельной шайбой диаметром 20 мм

3. Гидравлические характеристики и картограмма течения двухфазного потока жидкометаллического теплоносителя в сборках твэлов

В результате обработки экспериментальных данных для каждого из проведенных экспериментов по кипению жидкого металла в сборках твэлов построены гидравлические характеристики: точечные картограммы зависимости перепада давления в рабочем участке контура от объемного расхода (рис. 3), а также картограмма зависимости массовой скорости жидкого металла от весового паросодержания (рис. 4), характеризующая разные режимы течения двухфазного потока жидкометаллического теплоносителя в сборках твэлов.

Расположение точек на точечных картограммах (рис. 3) позволило провести аппроксимирующие линии, схожие с классической гидравлической характеристикой, соответствующей неустойчивому режиму кипения. Наряду с множеством точек, характеризующих пульсационный режим кипения (центральная область гидравлической характеристики), существует обособленное множество точек, относящихся к режиму устойчивого кипения (левая и правая ветви гидравлической характеристики).

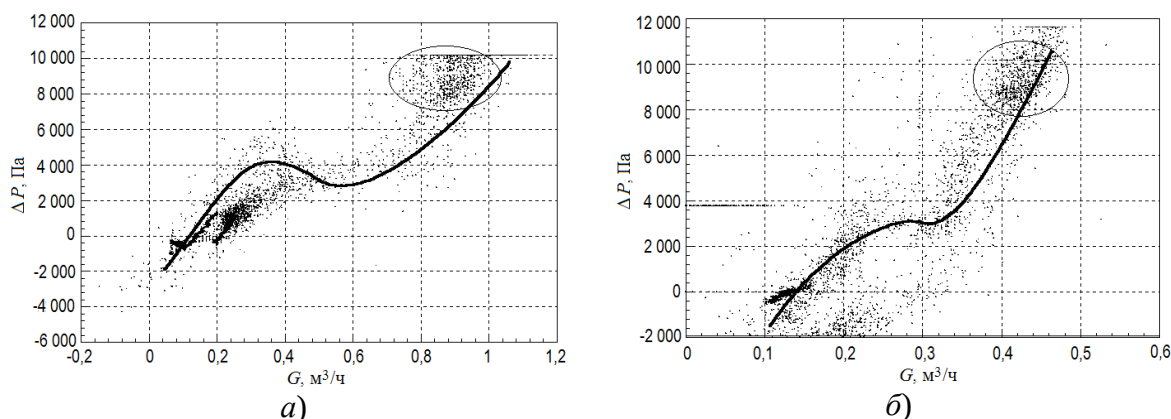


Рис. 3. Гидродинамическая характеристика эксперимента с дроссельными шайбами диаметром 12 мм (а) и зажатым вентилем (б)

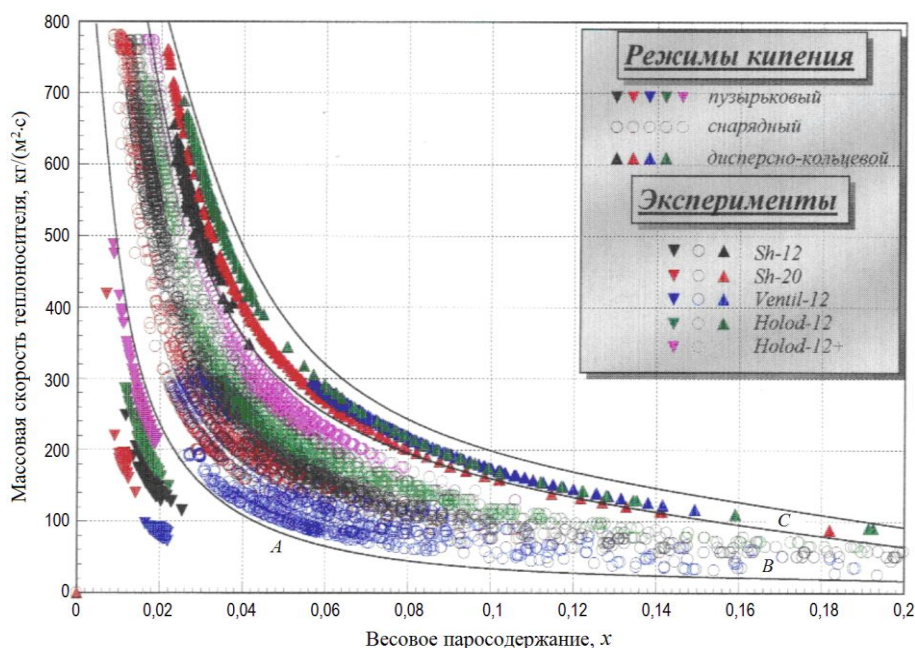


Рис. 4. Зависимость массовой скорости жидкого металла от паросодержания двухфазного потока жидкого металла в моделях пучков твэлов с промышленной шероховатостью поверхности: данные для пузырькового, снарядного, дисперсно-кольцевого и дисперсного режимов разграничены аппроксимирующими линиями

Пульсации потока теплоносителя вызваны динамическими взаимодействиями между параметрами потока (скоростью, плотностью, давлением, энтальпией) благодаря эффектам запаздывания и процессам обратной связи. В зависимости от диапазона и сочетания теплогидравлических параметров определяющую роль в самоподдерживающихся колебаниях расхода, в том числе, и при сохранении постоянного перепада давления на рабочем участке, могут играть разные составляющие перепада давления. Это приводит к тому, что конструктивные и режимные параметры

неодинаково влияют на границу устойчивости потока в зависимости от того, какая из составляющих перепада давления определяет колебания потока. В мировой практике такой механизм принято трактовать как гидродинамическую неустойчивостью плотностных волн.

Обработка осредненных данных в координатах массовая скорость – весовое паросодержание указывает на области устойчивого (пузырькового) режима кипения – *A*, неустойчивого (снарядного) режима кипения – *B* и устойчивого (дисперсно-кольцевого) режима кипения – *C*. Справа от области дисперсно-кольцевого режима кипения лежит граница перехода к закризисному теплообмену. Между этими областями можно приближенно провести границы режимов, которые описываются следующей зависимостью:

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

где коэффициент *A* для границ перехода от пузырькового к снарядному, дисперсно-кольцевому и дисперсному режимам имеет значения 4,3, 14,0 и 19,0, соответственно.

4. Межканальная неустойчивость при кипении натрий-калиевого теплоносителя в системе параллельных модельных сборок твэлов

Установка для исследования процесса кипения жидкометаллического теплоносителя в системе параллельных модельных сборок твэлов состоит из двух контуров естественной циркуляции, в каждом из которых установлены модельные сборки с семью имитаторами, при общем опускном участке контура с холодильником. Каждая из сборок может работать автономно в своем циркуляционном контуре. Емкости над сборками также соединены. Отвод тепла из контуров осуществляется холодильниками типа «трубки Фильда» на опускных линиях контуров и «рубашек» на баках в верхней части контура циркуляции.

Полученные данные экспериментальных исследований кипения натрий-калиевого сплава в системе двух параллельных модельных ТВС в контуре с естественной циркуляцией сплава показывают:

- при плотности теплового потока тепловыделяющих элементов ~ 130 кВт/м² пузырьковый режим кипения переходит в развитый снарядный режим, характеризующийся колебаниями теплогидравлических параметров теплоносителя большой амплитуды;

- возникновение колебательного процесса при кипении в одной из параллельных ТВС приводит к противофазному колебательному процессу в параллельной ТВС, далее колебания параметров в различных контурах носят противофазный характер;

- гидравлическое взаимодействие системы параллельных контуров в снарядном режиме течения на участках энергоснабжения с течением времени приводит к значительному увеличению амплитуды колебаний расхода теплоносителя в них («резонанс» пульсаций расхода) и к возможному «запиранию» или инверсии расхода теплоносителя в контурах, росту температуры теплоносителя и оболочки имитаторов твэлов (эффект межканальной неустойчивости) и в дальнейшем к возникновению кризиса теплообмена;

- при различной плотности теплового потока имитаторов твэлов в системе параллельных ТВС происходит усиление «резонанса» колебательного процесса.

Для численного моделирования теплообмена при кипении жидкого металла в одиночной и в системе параллельных ТВС развита версия кода SABENA [8, 9], разработанного ранее для теплогидравлического анализа кипения натрия в ТВС

быстрых реакторов, реализующая двухжидкостную модель двухфазного потока жидкого металла в приближении равных давлений в паровой и жидкой фазах:

- сборка твэлов моделируется в многомерном поканальном приближении, остальная часть контура циркуляции в одномерном приближении, замыкающие соотношения и теплофизические свойства эвтектического натрий-калиевого сплава уточнены путем проведения специального анализа;

- реализованная в коде численная процедура решения системы уравнений сохранения по методу конечных разностей позволила выполнить численное моделирование теплогидравлики в циркуляционном контуре как для случая одиночной, так и системы параллельных ТВС.

Результаты численного моделирования гидродинамики и теплообмена для условий эксперимента для одиночной энерговыделяющей ТВС в контуре циркуляции (рис.5) показали:

- при расчете возникновение пузырькового кипения теплоносителя обнаруживается несколько позднее, чем в эксперименте;

- в дальнейшем, результаты расчетов не описывают полученные в эксперименте пульсации параметров высокого порядка;

- результаты расчетов удовлетворительно описывают изменение во времени средних значений температуры теплоносителя и оболочки имитаторов твэлов, а также изменение расхода теплоносителя в течение всего переходного процесса до момента отключения мощности.

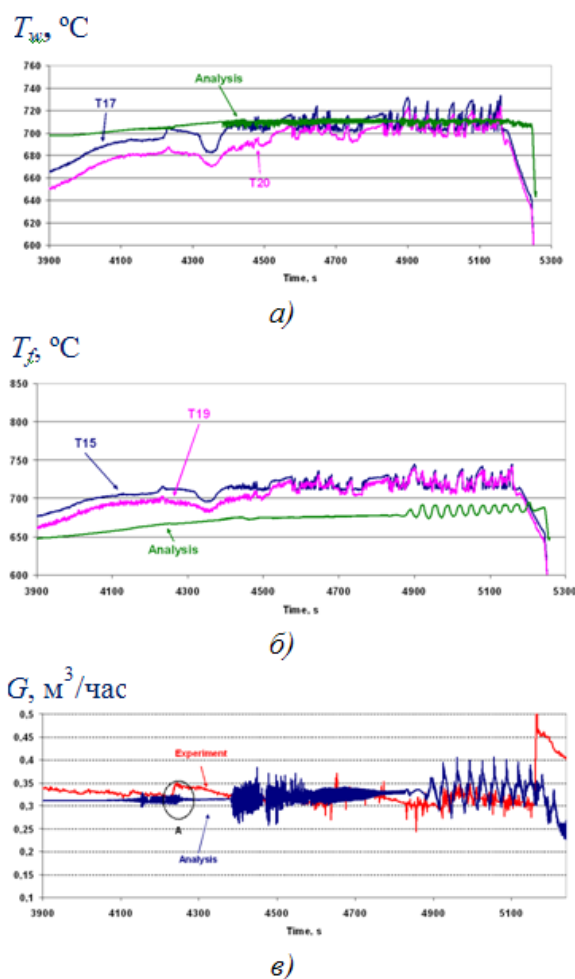


Рис. 5. Сравнение расчетных и экспериментальных распределений во времени температуры поверхности тепловыделяющих элементов (а), температуры теплоносителя (б) и расхода теплоносителя (в) при работе отдельной тепловыделяющей сборки

Результаты расчетных исследований для системы параллельных ТВС (рис. 6):

- воспроизводят ход температуры, развитие режимов течения однофазного потока (пузырькового, снрядного), пульсации расхода жидкого металла;
- демонстрируют противофазные пульсации расхода теплоносителя в параллельных ТВС, межканальную неустойчивость, характеризующиеся значительным возрастанием амплитуды пульсаций расхода теплоносителя в параллельных ТВС по сравнению с одиночными ТВС, периодическим падением расхода теплоносителя в ТВС практически до нуля и возможным осушением ТВС.

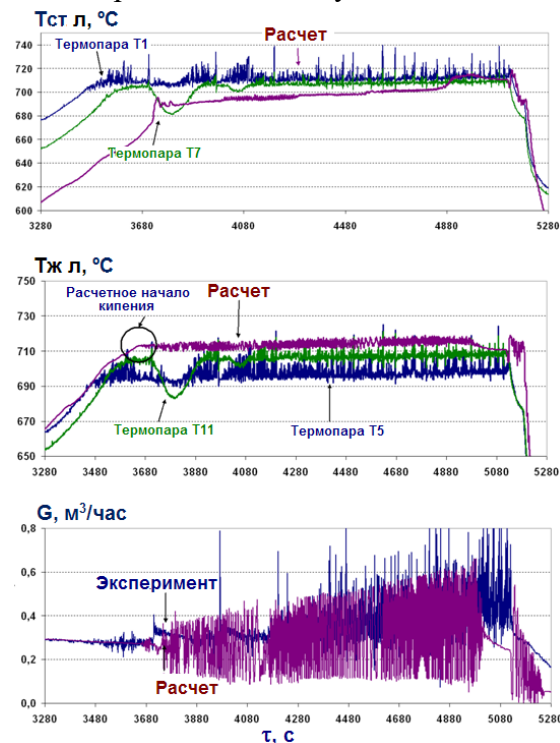


Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных распределений во времени температуры поверхности имитаторов твэлов (а), температуры теплоносителя (б) и расхода теплоносителя (в) в левой ТВС при параллельной работе ТВС с одинаковым энерговыделением

5. Теплообмен при кипении натрия в модельной сборке твэлов с «натриевой полостью» над участком энерговыделения

Сборка из семи имитаторов твэлов диаметром около 9 мм и длиной 1200 мм в треугольной решетке с относительным шагом 1,11 и дистанционированием проволоочной навивкой с шагом 180 мм, помещена в шестигранный чехол из жаропрочной стали, который является корпусом модели. Над моделью активной зоны расположена «натриевая полость» длиной 430 мм. После предварительного нагрева в петлевом подогревателе прямого нагрева натрия сначала попадает во входную камеру, затем в область модели активной зоны, где подогревается имитаторами твэлов. Далее натрий проходит через область, затесненную имитатором верхнего торцевого экрана, который вместе с корпусом участка образует узкий кольцевой зазор [10].

Вскипание теплоносителя зафиксировано в момент времени 9799 с показаниями расходомера – индикатора кипения, расходомера в однофазной области, сигналами акустической системы и пульсациями давления. В этот момент расход натрия падает до нулевого значения. Через 0,5 с зафиксирован кратковременный скачок температуры стенки центрального имитатора, который связан с остановкой расхода теплоносителя, температура жидкости в начальной области «натриевой полости» растет на 6 $^\circ C$, далее

расход увеличивается до $0,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ и температура стенки имитатора снижается до 911°C в течение 3 с. Такой процесс повторяется неоднократно в течение эксперимента и представляет собой интенсивное вскипание и затухание кипения натрия вследствие увеличения расхода. В остальное время превалирует пузырьковый режим с переменной интенсивностью, то полностью затухающий, то значительно интенсифицирующийся и сопровождающийся увеличением расхода на период до 10 с.

При увеличении теплового потока имитаторов от $120 \text{ кВт}/\text{м}^2$ до $135 \text{ кВт}/\text{м}^2$ (рис. 7) наступает ярко выраженный пульсационный режим течения двухфазного потока с периодом пульсаций от 3 до 14 с и амплитудой пульсаций температуры имитаторов твэлов до 55°C . Процессу интенсивного парообразования в ТВС сопутствует конденсация паров натрия в «натриевой полости» с заливом холодной жидкости из верхней части модели. Об этом можно судить по крутому падению температуры в «натриевой полости» (до 820°C). Одновременно с конденсацией паров в «натриевой полости» увеличивается расход теплоносителя, обеспечивая приток более холодной жидкости в модель и прекращение кипения, далее процесс повторяется снова. При увеличении теплового потока до $140 \text{ кВт}/\text{м}^2$ пульсации температуры стенки начинают непрерывно развиваться. При достижении температуры стенки имитатора 985°C питание модели автоматически отключено аварийной системой защиты.

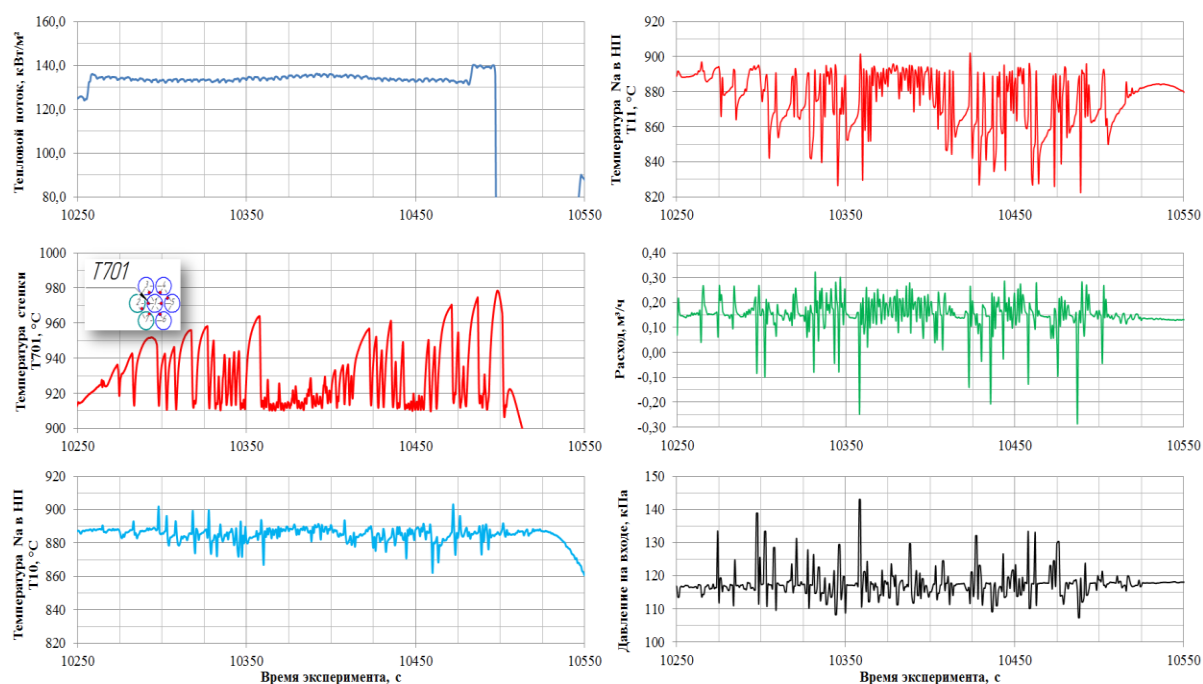


Рис. 7. Изменение температуры стенки центрального имитатора (Т701), температуры теплоносителя в «натриевой полости» и расхода при кипении натрия в диапазоне теплового потока от 120 до $135 \text{ кВт}/\text{м}^2$

6. Картограмма режимов течения двухфазного потока щелочных металлов в сборках имитаторов твэлов

Полученные данные для модели ТВС с «натриевой полостью» в координатах массовая скорость – массовое паросодержание (рис. 8) согласуются с данными серии экспериментов на модели ТВС без «натриевой полости» (без торцевого экрана) в контурах с естественной циркуляцией натрий-калиевого сплава. Для пузырькового режима данные расположены в области массового паросодержания $(0,1\text{--}2,5)\%$, для

снарядного режима – (2,5–9) % в диапазоне массовой скорости натрия (100–200) кг/(м²·с).

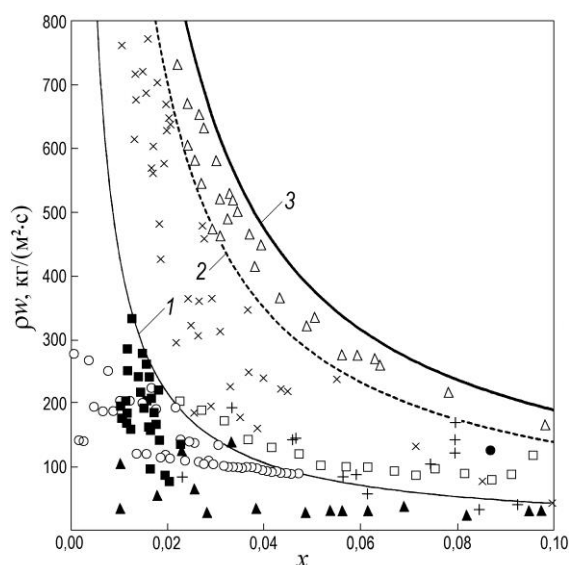


Рис. 8. Картограмма режимов течения двухфазного потока щелочных теплоносителей в сборках имитаторов твэлов:

1 – граница пузырькового и снарядного режимов кипения; 2 – граница снарядного и дисперсно-кольцевого режима кипения; 3 – граница перехода к закризисному теплообмену; O, □ – пузырьковый и снарядный режимы, данные по кипению натрия АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»; ▲, +, ● – первый стабильный режим, пульсационный и второй стабильный режим, соответственно, по данным Ямагучи [5]; ■, x, Δ – данные АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» по кипению натрий-калиевого сплава: пузырьковый, снарядный и дисперсно-кольцевой режимы, соответственно

7. Теплоотдача при кипении щелочных металлов

На теплоотдачу при кипении жидкометаллических теплоносителей оказывают влияние давление, плотность теплового потока, состояние поверхности теплообмена (шероховатость), смачивание поверхности теплообмена теплоносителем, режимы течения двухфазного потока и др.

Данные по теплоотдаче жидкометаллических теплоносителей в каналах и пучках твэлов разрознены и не систематизированы, отсутствует обобщающая зависимость, учитывающая влияние этих факторов. При вынужденном течении парожидкостной смеси металлов в трубе (при давлении 0,1 МПа) уже при массовом паросодержании (1–5) % наступает дисперсно-кольцевой режим, характеризуемый тем, что (95–99) % жидкости находится в виде капель в центральной области потока. Коэффициент теплоотдачи в таких условиях имеет примерно такое же значение как при кипении в большом объеме (рис. 9).

В дисперсно-кольцевом режиме фазовый переход связан с испарением с поверхности пристенной пленки жидкого металла, имеющей малую толщину и высокую теплопроводность. Влияние массовой скорости и паросодержания на теплообмен в этих условиях, по-видимому, несущественно. Эксперименты, проведенные Ю.А. Зейгарником и др. [14], подтвердили это предположение – коэффициент теплоотдачи при кипении натрия в широком диапазоне плотности теплового потока (0,2–1,1) МВт/м² оставался по существу неизменным и равным $(2,5–4) \cdot 10^5$ Вт/(м²·К).

В опытах при кипении калия в трубах данные описываются хорошо известной зависимостью для теплоотдачи при кипении $\alpha \sim q^{0,7}$ для неметаллических жидкостей

[13]. Эта зависимость близка к зависимости для теплоотдачи при кипении жидкостей в большом объеме. Совпадение зависимости $\alpha(q)$ в опытах с кипением жидкого металла в большом объеме и в трубах не случайно. Аналогичное совпадение наблюдается при кипении воды, а именно, соотношения для теплообмена при кипении в каналах при умеренной скорости смеси соответствуют соотношениям для теплообмена при кипении воды в большом объеме. При малой скорости пароводяной смеси $\alpha \sim q^{0,7}$, при большой – $\alpha \sim w^{0,8}$, как это наблюдается при конвективном теплообмене.

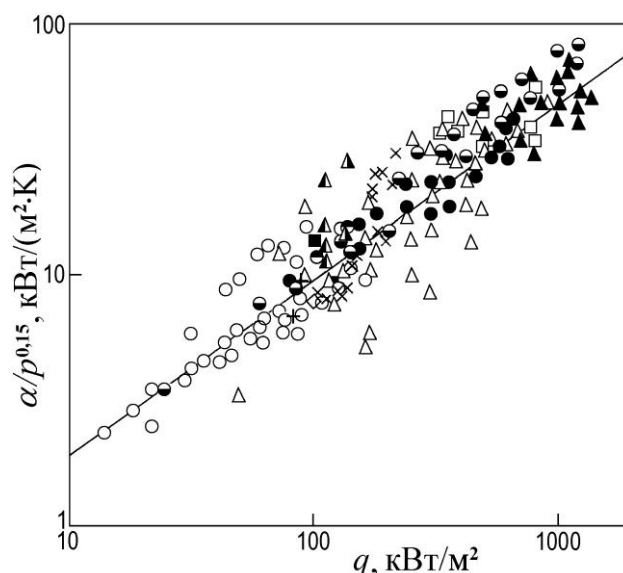


Рис. 9. Сравнение экспериментальных данных различных авторов по теплоотдаче при кипении жидких металлов в трубах с данными АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» для сборок твэлов:

данные по кипению калия [13]: ○ – кипение в большом объеме; ● – труба Ø10 мм (электрообогрев); ◐ – труба Ø10 мм (теплообменник); □ – труба Ø8,3 мм; ■ – труба Ø22 мм; ▲ – труба Ø4 мм (электрообогрев); △ – труба Ø6 мм;
данные по кипению натрий-калиевого сплава в ТВС (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»):
× – одиночные ТВС (7 элементов, длина зоны энерговыделения 420 мм) [6]; + – параллельные ТВС (7 элементов, длина зоны энерговыделения 840 мм); ◐ – параллельные ТВС (одинаковая мощность); ▲ – параллельные ТВС (4 включенных имитатора в левой сборке и 7 в правой) [4];
данные по кипению натрия (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»): ▲ – одиночная ТВС (7 элементов, длина зоны энерговыделения 600 мм) [7]; ——— расчет по формуле В.М. Боришанского [13]

Сопоставление данных по теплоотдаче показывает (см. рис. 9), что теплоотдача при кипении натрий-калиевого сплава в сборках твэлов [6, 7] и калия в трубах [13] в диапазоне плотности теплового потока свыше 100 кВт/м² в среднем в 1,5 раза выше, чем при кипении щелочных жидких металлов в большом объеме [14].

Заключение

Кипение жидких металлов в стесненных каналах ТВС является сложным и динамичным высокотемпературным процессом (температура насыщения натрия при атмосферном давлении 883 °С). Динамика образования паровой фазы может быть взрывной, особенно с учетом возможного перегрева жидкого металла относительно температуры насыщения при вскипании. С учетом этих факторов оперативное управление установкой во время экспериментов осуществляется с высокой скоростью, запись и обработка данных ведутся непрерывно в реальном времени.

Результаты проведенных экспериментальных исследований кипения жидких металлов в модельных ТВС в режиме естественной конвекции показывают:

- режим устойчивого пузырькового кипения в модельных ТВС отмечается лишь в ограниченной области тепловых потоков, его переход в режим неустойчивого пульсационного снарядного кипения определяется разными факторами;

- в сборке с низкой шероховатостью поверхности имитаторов твэлов развитие неустойчивого (снарядного) режима с резкими колебаниями расхода теплоносителя и перегрева стенки имитаторов может привести к кризису теплообмена, по существу, отсутствует запас до кризиса;

- для имитаторов твэлов с промышленной шероховатостью поверхности благодаря появлению на поверхности имитаторов пленки жидкости, наблюдается переход от неустойчивого снарядного к устойчивому дисперсно-кольцевому режиму;

- границы перехода от пузырькового к снарядному, дисперсно-кольцевому и дисперсному режимам течения двухфазного потока жидкого металла в пучках твэлов аппроксимируются простыми зависимостями, картограмма режимов течения двухфазного потока жидких металлов существенно отличается от картограммы для воды;

- возникновение колебательного процесса при кипении теплоносителя в одной из параллельных ТВС приводит к противофазному колебательному процессу в другой ТВС, в дальнейшем колебания в различных контурах носят противофазный характер;

- гидродинамическое взаимодействие контуров с течением времени приводит к значительному увеличению амплитуды колебаний расхода теплоносителя в них («резонанс» пульсаций расхода) и возможному «запиранию» или инверсии расхода теплоносителя в контурах, росту температуры теплоносителя и оболочки тепловыделяющих элементов (эффект межканальной неустойчивости) и, в конечном итоге, к возникновению кризиса теплообмена;

- коэффициенты теплоотдачи имитаторов твэлов при кипении жидкого металла в моделях ТВС в одиночных контурах и при их параллельной работе согласуются между собой и находятся в том же диапазоне, что и данные по теплоотдаче при кипении жидких металлов в трубах и в большом объеме;

- успешно проведены пилотные экспериментальные исследования нового технического решения («натриевая полость» между активной зоной и верхним торцевым экраном).

Модифицированный расчетный код SABENA-3D позволяет моделировать процесс теплообмена и устойчивость циркуляции теплоносителя при кипении жидкого металла как в одиночных ТВС, так и в системе параллельных ТВС в контуре с естественной циркуляцией.

Список литературы

1. Ашурко Ю.М., Андреева К.А., Бурьевский И.В., Волков А.В., Елисеев В.А., Егоров А.В., Кузнецов И.А., Коробейникова Л.В., Матвеев В.И., Соломонова Н.В., Хомяков Ю.С., Царапкина А.Н. Исследование влияния натриевого пустотного эффекта реактивности на безопасность быстрого натриевого реактора большой мощности // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2014. № 3. С. 5–13.
2. Ашурко Ю.М., Волков А.В., Раскач К.Ф., Соломонова Н.В. Влияние нейтронно-физической модели на расчет тяжелой аварии с кипением натрия в быстром реакторе // Атомная энергия. 2017. Т. 122. Вып. 4. С. 183–189.
3. Sorokin G.A., Sorokin A.P. Experimental and Numerical Investigations of Liquid Metal Boiling in Fuel Subassemblies under Natural Circulation Conditions // The Progress in Nuclear Energy Journal / Special Issue: Innovative Nuclear Energy System for

- Sustainable Development of the World. Proceeding of the First COE-INES International Symposium, INES-1, October 31 – November 4, 2004. Tokyo, Japan. 2005. Vol. 47. No 1–4. P. 656–663.
4. Kaizer A., Huber F. Sodium Boiling Experimental a Low Power under Natural Convection // Nuclear Engineering and Design. 1987. Vol. 100. No 3. P. 367–376.
 5. Yamaguchi K. Flow Pattern and Dryout under Sodium Boiling Conditions // Nuclear Engineering and Design. 1987. Vol. 9. P. 247–263.
 6. Efanov A.D., Sorokin A.P., Ivanov Eu.F., Bogoslovskaya G.P., Kolesnik V.P., Martsinyuk S.S., Sorokin G.A., Rymkevich K.S. An Investigation of the Heat Transfer and Stability of Liquid-Metal Coolant Boiling in a Natural Circulation Circuit // Thermal Engineering. 2003. Vol. 50. No 3. P. 194–201.
 7. Efanov A.D., Sorokin A.P., Ivanov E.F., Sorokin G.A., Bogoslovskaya G.P., Ivanov V.V., Volkov A.D., Sorokin G.A., Zueva I.R., Fedosova M.A. Heat Transfer under Natural Convection of Liquid Metal during Its Boiling in a System of Channels // Thermal Engineering. 2007. Vol. 54. No 3. P. 214–222.
 8. Сорокин Г.А., Ниноката Х., Эндо Х., Ефанов А.Д., Сорокин А.П., Иванов Е.Ф., Богословская Г.П., Иванов В.В., Волков А.Д., Зуева И.Р. Экспериментальное и расчетное моделирование теплообмена при кипении жидкого металла в системе параллельных тепловыделяющих сборок в режиме естественной конвекции // Ядерная энергетика. 2005. № 4. С. 92–106.
 9. Sorokin G.A., Ninokata H., Sorokin A.P., Endo H., Ivanov Eu.F. Numerical Study of Liquid Metal Boiling in the System of Parallel Bundles under Natural Circulation // Journal of Nuclear Science and Technology. 2006. Vol. 43. No 6. P. 623–634.
 10. Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Иванов Е.Ф. Теплообмен при кипении жидкометаллических теплоносителей в ТВС быстрых реакторов в аварийных режимах // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2018. № 3. С. 176–194.
<https://vant.ippe.ru/year2018/3/thermal-physics-hydrodynamics/1548-17.html>
 11. Теплофизическая стендовая база атомной энергетики России и Казахстана // Редакционная коллегия: Першуков В.А., Архангельский Н.В., Кононов О.Е., Сорокин А.П. Саров: ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», 2016. 160 с.
 12. Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Иванов Е.Ф. Особенности теплообмена при кипении жидкого металла в аварийных режимах в ТВС быстрых реакторов // Атомная энергия. 2019. Т. 126. Вып. 2. С. 69–76.
 13. Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федынский О.С. Жидкометаллические теплоносители. М.: Атомиздат, 1976.
 14. Зейгарник Ю.А., Литвинов В.Д. Кипение щелочных металлов в каналах. М.: Наука, 1983.