

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА И УСТОЙЧИВОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ В СБОРКАХ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

© 2021 г. А. П. Сорокин^{а, *}, Е. Ф. Иванов^а, Ю. А. Кузина^а, Н. А. Денисова^а,
А. А. Низовцев^а, В. В. Привезенцев^а, Г. А. Сорокин^б

^аГосударственный научный центр РФ – Физико-энергетический институт,
пл. Бондаренко, д. 1, г. Обнинск, Калужская обл., 249033 Россия

^бМосковский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет),
Институтский пер., д. 9, г. Долгопрудный, Московская обл., 141700 Россия

*e-mail: sorokin@ippe.ru

Поступила в редакцию 29.11.2020 г.

После доработки 15.01.2021 г.

Принята к публикации 20.01.2021 г.

Обоснование безопасности реакторов на быстрых нейтронах в аварийных режимах (ULOF, UTOP) обуславливает изучение режимов активной зоны с пониженными расходами теплоносителя или при естественной конвекции. В настоящей работе представлены результаты исследований по теплообмену и устойчивости циркуляции при кипении натрия и натрий-калиевого сплава на моделях одиночных тепловыделяющих сборок (ТВС) и в системе параллельных ТВС при естественной циркуляции теплоносителя. Показано, что процесс кипения жидких металлов в ТВС имеет сложную структуру, характеризуется как устойчивыми, так и пульсационными режимами со значительными колебаниями расхода, давления, температуры при последующем возникновении кризиса теплообмена. Гидродинамическое взаимодействие контуров циркуляции с системой параллельных ТВС может приводить к значительному увеличению амплитуды колебаний расхода теплоносителя в них (резонанс пульсаций расхода) и возможному “запиранию” или инверсии расхода теплоносителя, росту температуры теплоносителя и оболочки твэлов (эффект межканальной неустойчивости) и кризису теплообмена. Сравниваются данные расчетных и экспериментальных исследований кипения жидкого металла в моделях ТВС. Демонстрируется влияние шероховатости поверхности твэлов на теплообмен и режимы течения при кипении жидкого металла в пучках. Экспериментально показано, что при расположении в ТВС натриевой полости (НП), предназначенной для компенсации положительного натриевого пустотного эффекта реактивности при кипении натрия, не происходит запаривания НП и изменения режима кипения в ТВС. Таким образом, существует возможность продолжительного охлаждения твэлов в ТВС. Обобщены данные по теплоотдаче при кипении жидких металлов в пучках, построена картограмма режимов течения двухфазного потока жидких металлов в пучках, существенно отличающаяся от картограммы режимов течения пароводяного потока. Границы между режимами течения аппроксимируются довольно простыми зависимостями.

Ключевые слова: быстрый реактор, жидкий металл, кипение, естественная конвекция, аварийный режим, эксперимент, расчет, теплообмен, тепловыделяющая сборка, твэл, паросодержание, шероховатость, картограмма режимов, перегрев при вскипании, устойчивость циркуляции, кризис теплообмена

DOI: 10.1134/S0040363621090095

Моделирование динамического кипения щелочных жидких металлов имеет важное значение для комплексного анализа нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активной зоны реакторов на быстрых нейтронах (быстрых реакторов) в аварийных ситуациях (UTOP, ULOF)

при обосновании их безопасности [1, 2]. Одни из ключевых вопросов — это экспериментальное и расчетное подтверждение возможности устойчивого охлаждения активной зоны в процессе протекания аварии с кипением натрия в тепловыделяющих сборках твэлов активной зоны, определение

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 следующие существенные особенности:

взаимодействие отдельных факторов оказывается настолько сложным, что начальный перегрев для вскипания жидких металлов трудно прогнозировать;

рост парового пузыря щелочного металла носит взрывообразный характер, скорость его роста составляет примерно 10 м/с;

у щелочных металлов образуются пузыри довольно большого размера на ограниченном числе центров парообразования, большая 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 киловатт на квадратный метр, умноженный на кельвин.

При кипении жидких металлов в сборках твэлов для режимов с малыми скоростями течения или естественной конвекции, характерных для аварийных ситуаций, были получены лишь ограниченные экспериментальные данные [3, 4].

В период 1995–2007 гг. в ГНЦ РФ-ФЭИ в целях изучения охлаждения ТВС активной зоны в аварийных режимах и в режиме аварийного расхолаживания с учетом влияния на кипение разных факторов была проведена серия экспериментов по кипению эвтектического натрий-калиевого сплава на моделях одиночных ТВС и в системе параллельных ТВС в контуре с естественной циркуляцией теплоносителя [5, 6].

Проведенные исследования показали, что процесс кипения жидких металлов в ТВС формируется под воздействием различных факторов и характеризуется как устойчивыми, **так и пульсационными режимами, в которых наблюдаются значительные колебания расхода, давления, температуры.** Эти явления могут продолжаться в течение десятков секунд и обуславливать возникновение кризиса теплообмена. В [7, 8] показано согласие между данными российских экспериментов и тестовыми расчетами японских и российских специалистов.

Для исключения развития аварийной ситуации, приводящей к разрушению элементов активной зоны реактора на быстрых нейтронах, применяется конструктивное решение, заключающееся в расположении над активной зоной реактора натриевой полости. В 2010–2015 гг. в ГНЦ РФ-ФЭИ были проведены исследования, впервые показавшие возможность продолжительного охлаждения имитаторов твэлов при кипении натрия в ТВС при наличии НП [9].

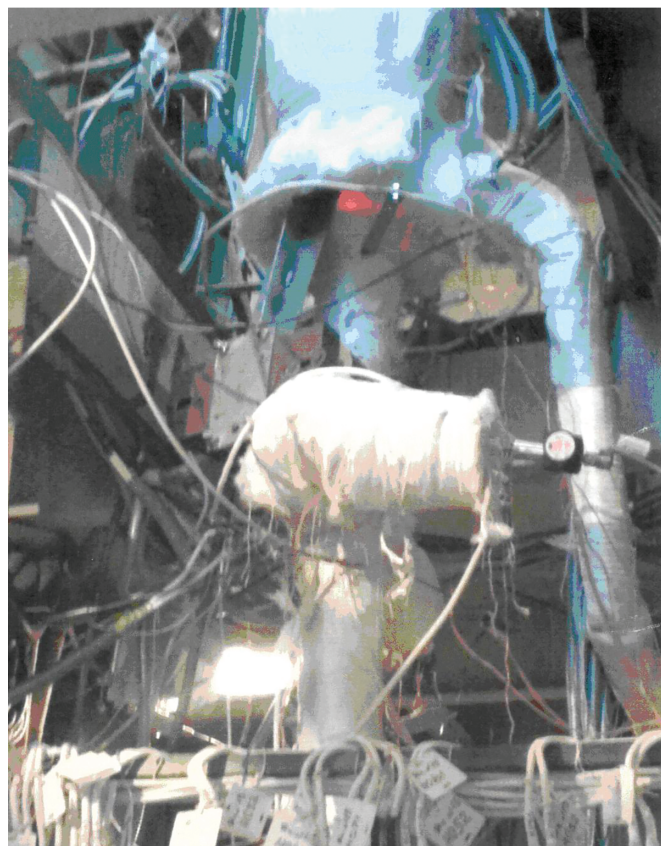
Следует отметить, что важными особенностями реакторов на быстрых нейтронах, оказывающими влияние на условия теплообмена при кипении теплоносителя в активной зоне, являются низкое давление в теплоносителе и большое различие, составляющее около трех порядков, в плотностях паровой и жидкой фаз.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

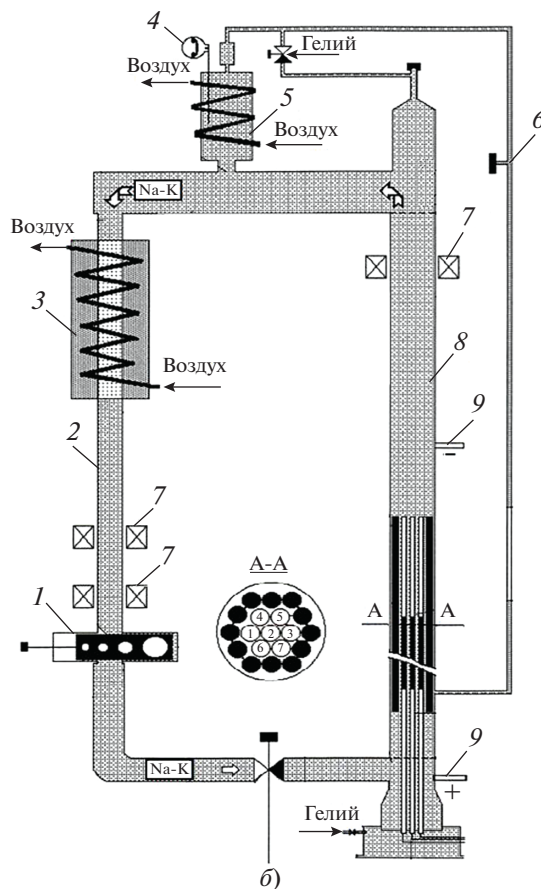
Экспериментальная установка, созданная в ГНЦ РФ-ФЭИ на стенде АР-1 для проведения исследований кипения жидкометаллического теплоносителя [5], содержит два вертикальных канала высотой 3 м каждый, соединенных сверху и снизу и образующих опускную и подъемную ветви циркуляционного контура, дыхательный бак и подогреватель, расположенный на входе в подъемный канал (рис. 1).

В нижней части подъемного канала расположен рабочий участок с моделью ТВС со сборкой из 7 имитаторов твэлов и 12 вытеснителей, собранных в треугольную решетку с шагом 1.185 мм и заключенных в стальную трубу типоразмером 50 × 1.5 мм. Рядом с магнитными расходомерами в циркуляционном контуре установлено дроссельное устройство, имеющее вид вдвигающейся рейки с диафрагмами различных размеров – дроссельными шайбами (12, 16 и 20 мм). Это устройство позволяет изменять гидравлическое сопротивление контура. Для этой же цели используется вентиль на горизонтальном участке контура, соединяющем нижние концы опускного и подъемного трубопроводов.

Имитаторы твэлов представляют собой калиброванные трубки из нержавеющей стали (наружные оболочки) заводского изготовления типоразмером 8 × 1 мм, внутри которых установлены размещенные в трубках из жаропрочной стали (внутренние оболочки) спиральные нагреватели диаметром 4 мм из молибденовой проволоки диаметром 1 мм. Пространство между спиралью и внутренней оболочкой заполнено гелием, а между оболочками – высокотемпературной электроизоляционной засыпкой (порошком из плавленого оксида магния). В трубке меньшего диаметра



a)



b)

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

1 – магазин сопротивлений; 2 – опускная ветвь контура циркуляции; 3 – холодильник; 4 – акустический датчик; 5 – компенсатор объема; 6 – датчик давления; 7 – расходомер; 8 – подъемная ветвь контура циркуляции; 9 – подвод тока для датчиков

с наружной стороны выполнены четыре продольных паза для установки термодпар со спаями, распределенными по длине зоны энерговыделения. Общая длина имитаторов твэлов составляет 760 мм, длина участка энерговыделения – 405 мм.

Установка оснащена большим количеством первичных преобразователей (датчиков) для измерения:

- давления в газовой полости;
- расхода и пульсаций расхода теплоносителя;
- статического давления в зоне кипения и флуктуаций (пульсаций) давления теплоносителя;
- 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 наличия паровой фазы по высоте модели ТВС (потенциометрические датчики);

электрической мощности, подводимой к нагревателям имитаторов твэлов, уровня жидкого металла в дыхательном баке, сигналов акустической эмиссии.

Температура наружной поверхности имитаторов твэлов измерялась хромель-алюмелевыми термопарами в чехлах из коррозионно-стойкой стали диаметром 0.5 мм, температура теплоносителя – термопарами диаметром 1 мм (см. таблицу).

ФЕНОМЕНОЛОГИЯ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ НАТРИЙ-КАЛИЕВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В МОДЕЛЬНЫХ СБОРКАХ С ГЛАДКИМИ И ШЕРОХОВАТЫМИ ТВЭЛАМИ

Выход на режим кипения жидкого металла в модели ТВС в режиме естественной конвекции осуществлялся путем повышения мощности энер-

Диапазон и погрешность измерений параметров кипения жидкого металла

Параметр	Диапазон измерения	Погрешность измерений, %
Температура, °C:		
стенки имитатора твэла	100–1000	1.5
теплоносителя	100–800	1.5
Давление в области кипения, МПа	0.05–0.06	0.5
Сигнал от потенциометрического датчика, В	0–10	0.5
Скорость потока на выходе из ТВС, м/с	0–1	2.0
Электрическая мощность, кВт	8–24	1.0
Плотность теплового потока на поверхности имитатора твэла, кВт/м ²	0–250	1.0

говыведения имитаторов твэлов. Подогретый в модели ТВС жидкий металл поднимался в расширительный бак (см. рис. 1, б), в котором охлаждался, и далее поступал в опускной участок. Мощность имитаторов твэлов повышалась дискретно небольшими ступенями вплоть до закипания натрий-калиевого теплоносителя [5, 10].

Кипение натрий-калиевого теплоносителя в модели с имитаторами твэлов с гладкой поверхностью и низкой шероховатостью (0.5 мкм)

Пузырьковое кипение жидкого металла возникло при плотности теплового потока на поверхности имитаторов твэлов 117 кВт/м² 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 кипением сохранялся до плотности теплового потока 133 кВт/м², 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, освобождая зона обогрева заполнялась теплоносителем, поступавшим на вход модели.

Разность температуры стенка — жидкость в устойчивом режиме кипения составляла в среднем 20°C, в пульсационном — наблюдались резкие колебания перегрева стенки имитаторов, возрастающие по мере роста энерговыделения до 80–90°C. Это явление можно объяснить осушением поверхности имитатора в области снарядов. Температурный перегрев стенки имитаторов по отно-

шению к теплоносителю и показания датчика паросодержания на выходе из модели коррелируют с расходом теплоносителя на входе. При плотности теплового потока 151 кВт/м² произошло осушение поверхности имитаторов (кризис теплообмена второго рода) и расплавление оболочки.

Кипение в модели с имитаторами промышленного изготовления с технической шероховатостью поверхности (1.5 мкм)

В эксперименте с дроссельной шайбой диаметром 20 мм на начальной стадии кипения при достижении плотности теплового потока 125 кВт/м² наблюдался процесс, характерный для пузырькового режима кипения с устойчивыми параметрами: температурой теплоносителя и имитаторов, перепадом давления на сборке, расходом теплоносителя на входе в зону обогрева и выходе из нее (рис. 2).

При повышении энерговыделения до 140 кВт/м² 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 м³/ч). Образовавшиеся с интервалом 40 с и более крупные паровые пузыри (снаряды) в момент всплытия вызвали резкое увеличение расхода теплоносителя на входе в ТВС и значительные колебания всех параметров. Очевидно, что колебания параметров имели гидродинамическую природу и определялись не только непосредственно процессом кипения теплоносителя в ТВС, но и комплексом процессов, происходивших в сборке и циркуляционном контуре в целом. Постепенно угасавший пульсационный (снарядный) режим в диапазоне теплового потока от 200 до 230 кВт/м² перешел в дисперсно-кольцевой ре-

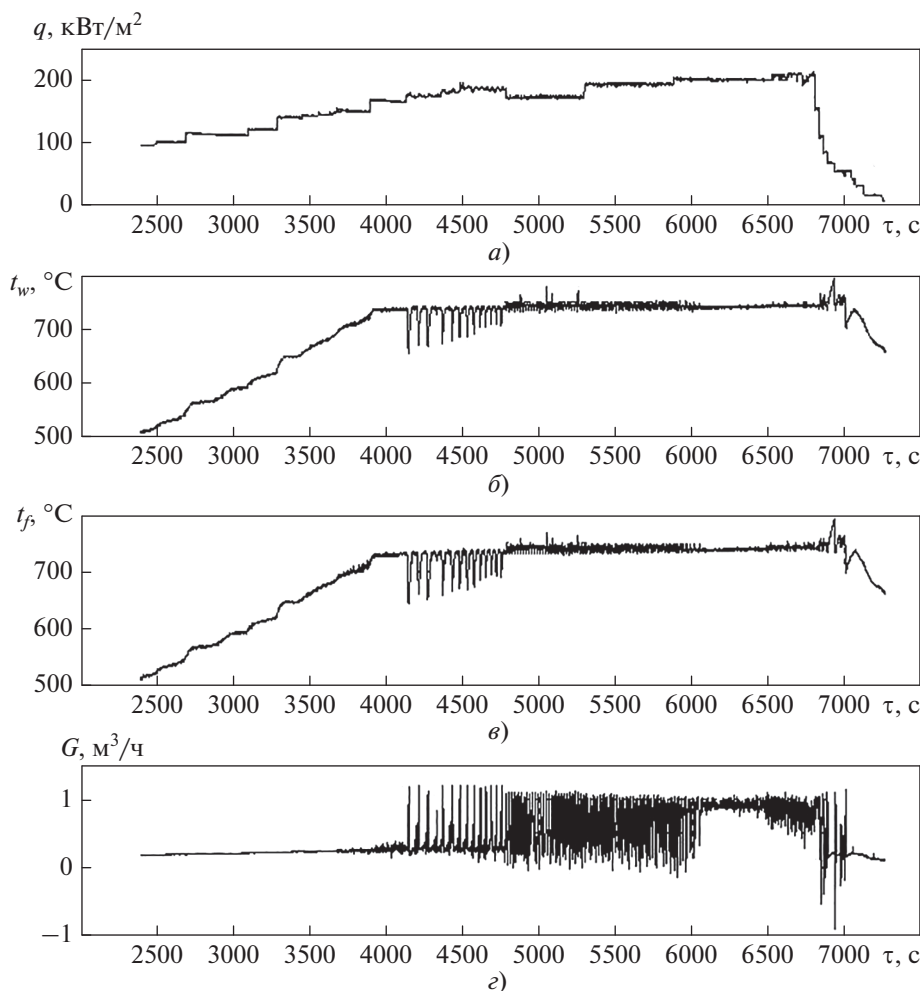


Рис. 2. Плотность теплового потока (а), температура имитатора (б) и теплоносителя (в) на выходе из зоны энерговыделения и объемный расход теплоносителя (г) в эксперименте с дроссельной шайбой диаметром 20 мм (τ – время эксперимента)

жим, характеризующийся стабильностью измеряемых параметров.

При тепловом потоке свыше 230 кВт/м² наблюдались уменьшение расхода теплоносителя в циркуляционном контуре и переход от дисперсно-кольцевого к дисперсному режиму кипения (закризисному теплообмену).

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 следующие гидравлические характеристики: точечные картограммы зависимости перепада давления в рабочем участке контура от объем-

ного расхода (рис. 3), а также картограмма зависимости массовой скорости жидкого металла от массового расходного паросодержания (рис. 4), характеризующая области параметров для разных режимов течения двухфазного потока жидкометаллического теплоносителя в сборках ТВЭлов [5].

Расположение точек на картограммах (см. 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).

Пульсации потока теплоносителя вызваны динамическими взаимодействиями между парамет-

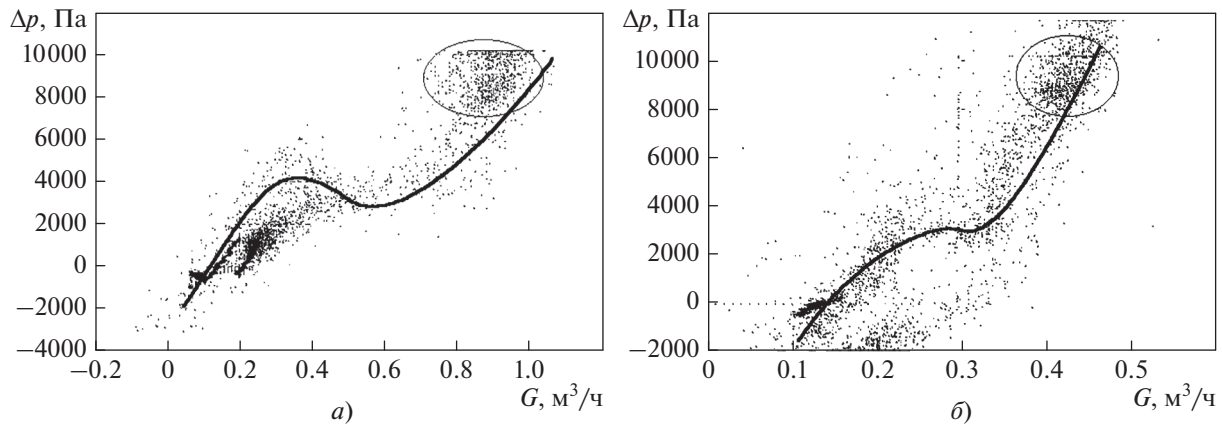


Рис. 3. Гидродинамическая характеристика экспериментов с дроссельными шайбами диаметром 12 мм (а) и зажатым вентилем (б)

рами 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 (перепады давления на подъемном и опускном участках). Это приводит к тому, что конструктивные и режимные параметры неодинаково влияют на границу устойчивости

потока. В мировой практике такой механизм принято трактовать как гидродинамическую неустойчивость плотностных волн.

Обработка осредненных данных в координатах массовая скорость — массовое расходное паросодержание указывает на области устойчивого (пузырькового) режима кипения. 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:

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

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.

Аппроксимация границ режимов, приведенная на рис. 4, выполнена по этой зависимости. Данные японских специалистов [4] в области низких массовых скоростей теплоносителя хорошо согласуются с данными ГНЦ РФ-ФЭИ (см. рис. 4).

Полученная авторами настоящей работы картограмма режимов, подобная картограмме для паровых потоков воды высокого давления в вертикальных трубах Беннета [11], существенно отличается от картограммы режимов при кипении воды [12], границы режимов в которой описываются следующими формулами для определения массового расходного паросодержания (рис. 5):

$x = 0.01$ — для границы пузырькового и снарядного режимов;

$x = (4.5 + 1.5) \times 10^{-2} \left[\frac{(\rho w)^2}{\rho_{ж}^2 g d_r} \right]^{-0.25}$ — для верхней границы снарядного режима.

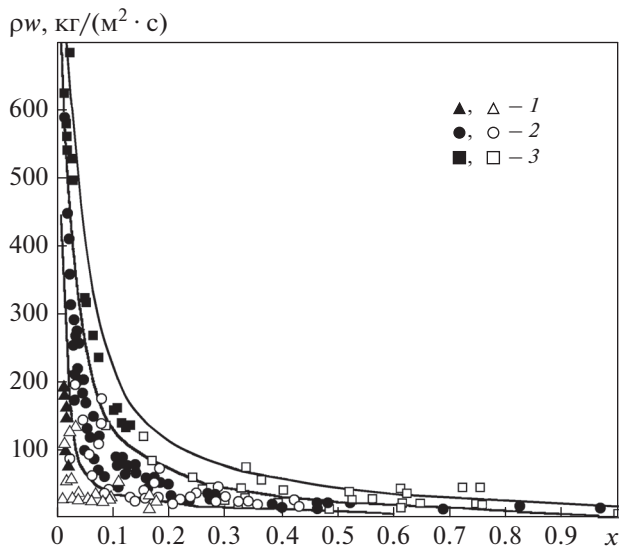


Рис. 4. Зависимость массовой скорости ρw от массового расходного паросодержания x (темные маркеры — данные ГНЦ РФ-ФЭИ [5], светлые — [4]). Режим кипения: 1 — пузырьковый; 2 — снарядный; 3 — дисперсно-кольцевой; сплошные линии — аппроксимация границ режимов

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, в котором размещен холодильник [6]. 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.

Экспериментальные исследования кипения натрий-калиевого сплава в системе двух параллельных модельных ТВС в контуре с естественной циркуляцией сплава показали следующее:

при плотности теплового потока имитаторов твэлов около 130 кВт/м^2 пузырьковый режим кипения теплоносителя в ТВС переходит в развитый снарядный режим, характеризующийся колебаниями теплогидравлических параметров теплоносителя большой амплитуды;

возникновение колебательного процесса при кипении теплоносителя в одной из параллельных ТВС приводит к противофазному колебательному процессу в параллельной ТВС, в дальнейшем колебания теплогидравлических параметров в различных контурах происходят в противофазе;

гидравлическое взаимодействие системы параллельных контуров в снарядном режиме течения на участках энерговыделения с течением времени приводит к значительному увеличению амплитуды колебаний в них расхода теплоносителя (“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 ТВС и в системе параллельных ТВС развита версия кода SABENA [7, 8], разработанного ранее для теплогидравлического анализа кипения натрия в ТВС быстрых реакторов, реализующая двухфазную модель двухфазного потока жидкого ме-

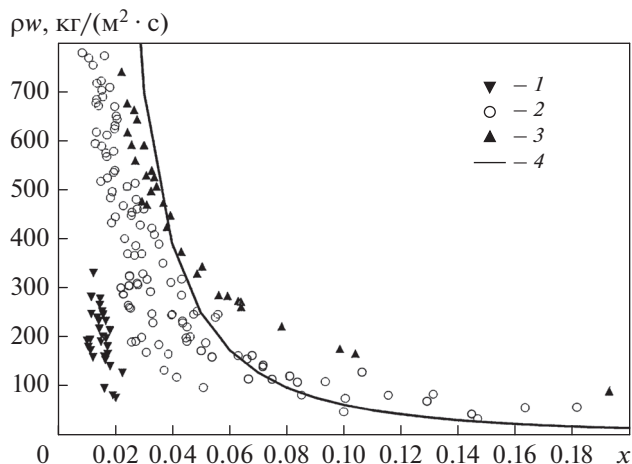


Рис. 5. Экспериментальные данные ГНЦ РФ-ФЭИ для режимов течения при кипении жидких металлов в сборках твэлов.

Режим кипения жидкого металла: 1 — пузырьковый; 2 — снарядный; 3 — дисперсно-кольцевой; 4 — аппроксимация границ снарядного режима течения при кипении воды по [12]

талла в приближении равных давлений в паровой и жидкой фазах. В развитой версии кода SABENA 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 развитой версии кода SABENA численная процедура решения системы уравнений сохранения методом конечных разностей позволила выполнить численное моделирование теплогидравлических процессов в циркуляционном контуре как для одиночной ТВС, так и для системы параллельных сборок.

Результаты численного моделирования гидродинамики и теплообмена для условий эксперимента для одиночной ТВС в контуре циркуляции показали:

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

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.

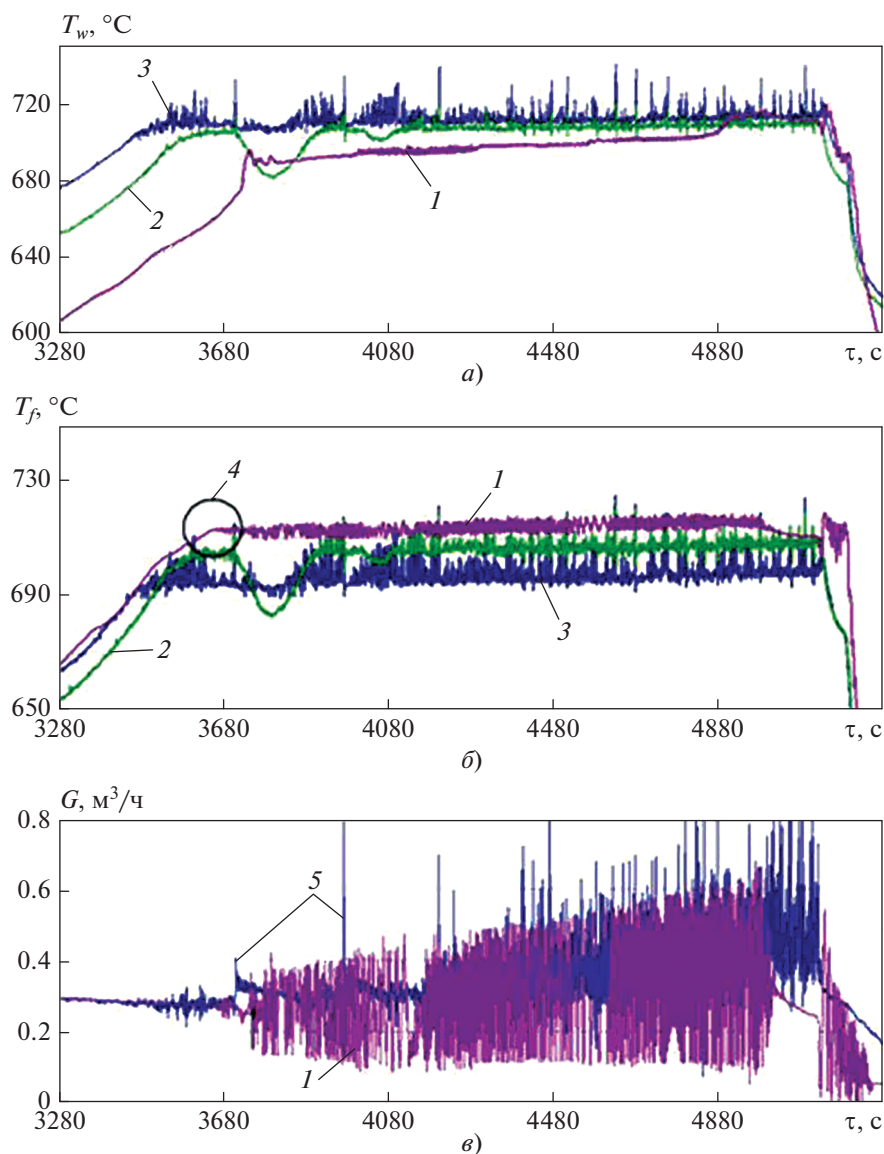


Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных распределений во времени температуры поверхности имитаторов твэлов (а), температуры теплоносителя (б) и расхода теплоносителя (в) в одной из ТВС при параллельной работе ТВС с одинаковым энерговыделением.

1 – расчет; 2, 3 – показания термпар; 4 – расчетное время начала кипения; 5 – эксперимент

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

воспроизводят ход температуры, развитие режимов течения двухфазного потока (пузырькового, снарядного), пульсации расхода жидкого металла;

демонстрируют противофазные пульсации расхода теплоносителя в параллельных ТВС и межканальную неустойчивость, характеризующуюся значительным возрастанием амплитуды пульсаций расхода теплоносителя в параллельных ТВС по сравнению с одиночными ТВС, периодиче-

ским падением (практически до нуля) расхода теплоносителя в ТВС и возможным осушением поверхности сборки.

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ НАТРИЯ В МОДЕЛЬНОЙ СБОРКЕ ТВЭЛОВ С НАТРИЕВОЙ ПОЛОСТЬЮ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НАД УЧАСТКОМ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

Модель активной зоны состоит из семи имитаторов твэлов диаметром около 9 мм и длиной 1200 мм, упакованных в треугольную решетку с

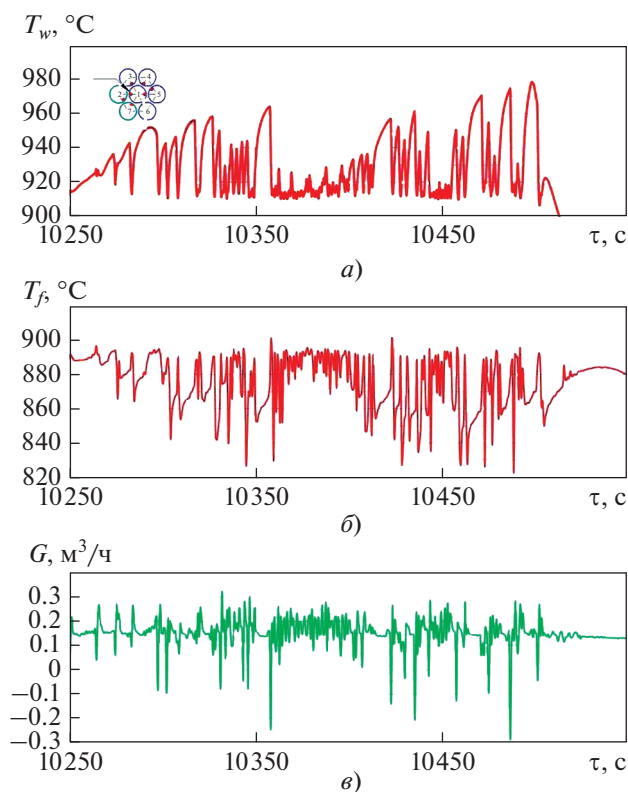


Рис. 7. Изменение температуры стенки центрального имитатора (Т701) (а), температуры теплоносителя в НП (б) и расхода (в) при кипении натрия в диапазоне теплового потока от 120 до 135 кВт/м²

относительным шагом 1.11 и дистанционированием проволочной навивкой с шагом 180 мм. Сборка помещена в шестигранный чехол из жаропрочной стали, который выполняет функцию корпуса 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 экспериментального участка, затем в область модели активной зоны, где осуществляется его подогрев имитаторами твэлов. Далее натрий проходит через область, затесненную имитатором верхнего торцевого экрана, который вместе с корпусом участка образует узкий кольцевой зазор [9].

Вскипание теплоносителя зафиксировано в момент времени 9799 с после начала разогрева имитаторов твэлов по показаниям расходомера-индикатора кипения, расходомера в однофазной области, сигналам акустической системы и пульсации давления. В этот момент расход натрия упал до нулевого значения. Через 0.5 с после момента вскипания натрия был зафиксирован кратковременный скачок температуры стенки центрального

имитатора. Этот скачок связан с падением расхода теплоносителя, температура жидкости в начальной области “натриевой полости” повысилась на 6°C, далее расход увеличился до 0.3 м³/ч и температура стенки имитатора снизилась до 911°C за 3 с. Такой процесс повторялся неоднократно в течение эксперимента и представлял собой интенсивное вскипание и затухание кипения натрия вследствие увеличения расхода. Далее превалировал пузырьковый режим с переменной интенсивностью, то полностью затухавший, то значительно интенсифицировавшийся и сопровождавшийся увеличением расхода с периодичностью 10 с.

При увеличении теплового потока имитаторов с 120 до 135 кВт/м² (рис. 7) наступал 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 сопутствовала конденсация паров натрия в натриевой полости с заливом холодной жидкости из верхней части модели. Об этом можно было судить по резкому падению температуры в натриевой полости (до 820°C). Одновременно с конденсацией паров в НП увеличивался расход теплоносителя, что обеспечивало приток более холодной жидкости в модель и прекращение кипения. Далее процесс повторялся. При увеличении теплового потока до 135 кВт/м² пульсации температуры стенки начинали непрерывно развиваться. При достижении температуры стенки имитатора 985°C питание модели автоматически отключалось аварийной системой защиты.

Полученные данные для модели ТВС с натриевой полостью в координатах массовая скорость — массовое расходное паросодержание (рис. 8) удовлетворительно согласуются с результатами серии экспериментов на модели ТВС без НП (без торцевого экрана) в контурах с естественной циркуляцией натрий-калиевого сплава. Для пузырькового режима данные расположены в области массовых расходных паросодержаний от 0.010 до 0.025, для снарядного режима — от 0.025 до 0.90 в диапазоне значений массовой скорости натрия 100–200 кг/(м² · с).

ПЕРЕГРЕВ, НЕОБХОДИМЫЙ ДЛЯ ВСКИПАНИЯ МЕТАЛЛА В СБОРКЕ ТВЭЛОВ

В результате многочисленных исследований установлено, что перегрев металла перед закипанием ΔT является функцией более чем 15 переменных и теоретические расчеты этого показателя оказываются малополезными для практики. По данным для кольцевого зазора [13] существенным фактором является скорость теплоносителя:

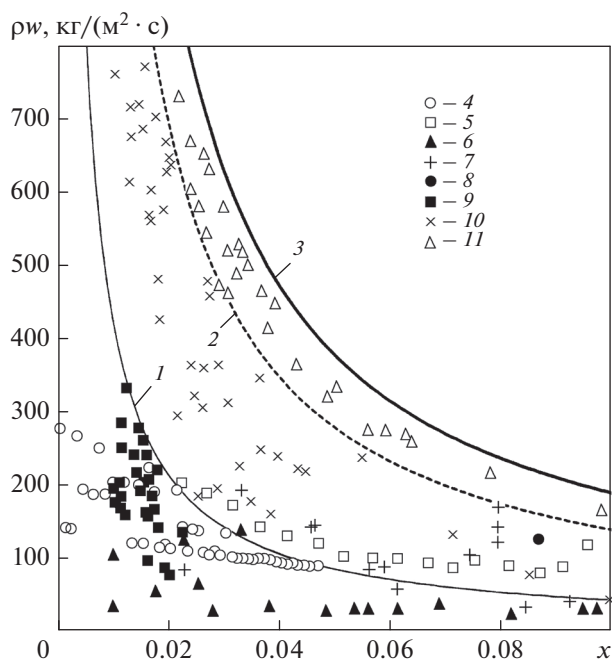


Рис. 8. Картограмма режимов течения двухфазного потока жидкометаллических теплоносителей.

1 — граница пузырькового и снарядного режимов кипения; 2 — граница снарядного и дисперсно-кольцевого режимов кипения; 3 — граница перехода к закризисному теплообмену; 4, 5 — пузырьковый и снарядный режимы (данные по кипению натрия ГНЦ РФ-ФЭИ); 6, 7, 8 — первый стабильный режим, пульсационный и второй стабильный режим по данным [4]; 9, 10, 11 — пузырьковый, снарядный и дисперсно-кольцевой режимы (данные ГНЦ РФ-ФЭИ по кипению натрий-калиевого сплава)

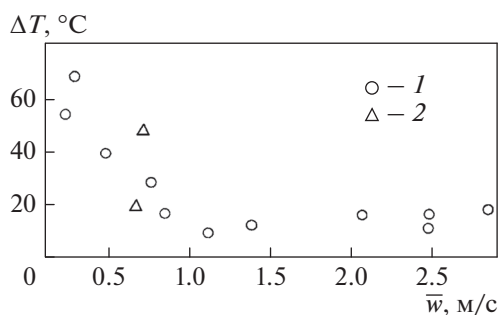


Рис. 9. Зависимость начального перегрева теплоносителя при его вскипании от скорости течения жидкого металла.

1 — кольцевой зазор [13]; 2 — модельная ТВС (ГНЦ РФ-ФЭИ) [5, 14]

при ее увеличении от 0.2 до 5.0 м/с перегрев снижается с 70 до 20°C. Экспериментальные данные ГНЦ РФ-ФЭИ, полученные в экспериментах на модельной сборке [5, 14], несущественно отличаются от результатов [13] (рис. 9).

В серии экспериментов с имитаторами твэлов с технической шероховатостью при вскипании натрий-калиевого сплава значительного перегрева не наблюдалось — он составил около 20°C. В эксперименте с гладкими имитаторами твэлов при низкой скорости теплоносителя зарегистрирован перегрев при вскипании теплоносителя около 48°C.

Таким образом, по-видимому, в реальных условиях для реакторов на быстрых нейтронах не следует ожидать значительного начального перегрева жидкого металла для его вскипания.

ТЕПЛОТДАЧА 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 около 0.1 МПа) уже при расходе массовом паросодержании 1–5% наступает дисперсно-кольцевой режим, характеризующийся 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. 10).

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 массового расходного паросодержания на теплообмен в этих условиях, по-видимому, несущественно. Эксперименты, проведенные в [14], подтвердили это предположение — коэффициент теплоотдачи при кипении натрия в широком диапазоне плотности теплового потока (0.2–1.1 МВт/м²) оставался практически неизменным и равным $(2.5–4.0) \times 10^5$ 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 [15]. Эта зависимость близка к таковой для теплоотдачи при кипении жидкостей в большом объеме. Совпадение зависимостей $\alpha(q)$ в опытах с кипением жидкого металла в большом объеме и в трубах неслучайно. Аналогичное совпа-

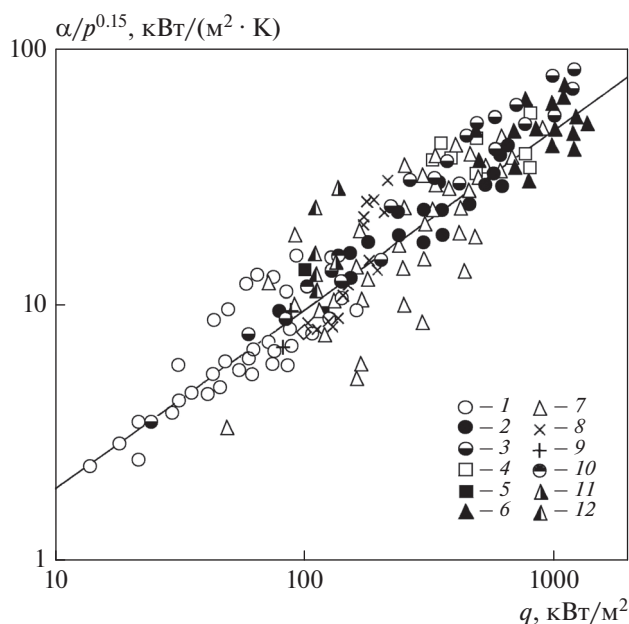


Рис. 10. Сравнение экспериментальных данных различных авторов по теплоотдаче при кипении жидких металлов в трубах с данными ГНЦ РФ-ФЭИ для сборок твэлов.

Данные по кипению калия [15]: 1 – кипение в большом объеме; 2 – труба $\varnothing 10$ мм (электрообогрев); 3 – труба $\varnothing 10$ мм (теплообменник); 4 – труба $\varnothing 8.3$ мм; 5 – труба $\varnothing 22$ мм; 6 – труба $\varnothing 4$ мм (электрообогрев); 7 – труба $\varnothing 6$ мм; данные по кипению натрий-калиевого сплава в ТВС (ГНЦ РФ-ФЭИ): 8 – одиночные ТВС (семь элементов, длина зоны энерговыделения 420 мм) [5]; 9 – параллельные ТВС (семь элементов, длина зоны энерговыделения 840 мм); 10 – параллельные ТВС (одинаковая мощность); 11 – параллельные ТВС (четыре включенных имитатора в левой сборке и семь в правой) [6]; данные по кипению натрия (ГНЦ РФ-ФЭИ): 12 – одиночная ТВС (семь элементов, длина зоны энерговыделения 600 мм) [10]; линия – расчет по формуле В.М. Боришанского [15]

дение 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 скорости $\alpha \sim w^{0.8}$, как это наблюдается при конвективном теплообмене.

Сопоставление данных по теплоотдаче показывает (см. рис. 10), что теплоотдача при кипении натрий-калиевого сплава в сборках твэлов [5, 6] и калия в трубах [15] при плотности теплового потока свыше 100 кВт/м^2 в среднем в 1.5 раза выше, чем при кипении щелочных жидких металлов в большом объеме [14].

ВЫВОДЫ

1. Кипение жидких металлов в стесненных каналах ТВС является сложным и динамичным высокотемпературным процессом (температура насыщения натрия при атмосферном давлении составляет 883°C). Образование паровой фазы может быть взрывным, особенно в случае 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.

2. Результаты проведенных экспериментальных исследований кипения жидких металлов в модельных ТВС при естественной конвекции показывают:

диапазон начального перегрева при вскипании жидкого металла в сборке составляет $20\text{--}50^\circ\text{C}$, что можно объяснить наличием в потоке пузырьков пара и естественной кюветы под дистанционирующей проволоочной навивкой;

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

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

для имитаторов твэлов с технической 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 обоих 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 твэлов (эффект межканальной неустойчивости) и, в конечном итоге, к возникновению кризиса теплообмена;

значения коэффициента 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.

3. Пилотные экспериментальные исследования нового технического решения (размещение НП между активной зоной и верхним торцевым экраном) показали, что при расположении в ТВС натриевой полости, предназначенной для компенсации положительного натриевого пустотного эффекта реактивности при кипении натрия, не происходит запаривания НП и изменения режима кипения в ТВС. Таким образом, существует возможность продолжительного охлаждения твэлов в ТВС.

4. 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. **Исследование** влияния натриевого пустотного эффекта реактивности на безопасность быстрого натриевого реактора большой мощности / Ю.М. Ашурко, К.А. Андреева, И.В. Бурьевский, А.В. Волков, В.А. Елисеев, А.В. Егоров, И.А. Кузнецов, Л.В. Коробейникова, В.И. Матвеев, Н.В. Соломонова, Ю.С. Хомяков, А.Н. Царапкина // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2014. № 3. С. 5–14.
2. **Влияние** нейтронно-физической модели на расчет тяжелой аварии с кипением натрия в быстром реакторе / Ю.М. Ашурко, А.В. Волков, К.Ф. Раскач, Н.В. Соломонова // Атомная энергия. 2017. Т. 122. Вып. 4. С. 183–189.
3. **Kaizer A., Huber F.** Sodium boiling experimental a low power under natural convection // Nucl. Eng. Des. 1987. V. 100. Is. 3. P. 367–376. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(87\)90086-0](https://doi.org/10.1016/0029-5493(87)90086-0)
4. **Yamaguchi K.** Flow pattern and dryout under sodium boiling conditions // Nucl. Eng. Des. 1987. V. 99. P. 247–263. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0029-5493(87)90125-7)
5. **Исследования** теплообмена и устойчивости кипения жидкометаллического теплоносителя в контуре естественной циркуляции / А.Д. Ефанов, А.П. Сорокин, Е.Ф. Иванов, Г.П. Богословская, В.П. Колесник, Г.А. Сорокин, С.С. Марцинюк, В.Д. Мальков, К.С. Рымкевич // Теплоэнергетика. 2003. № 3. С. 20–26.
6. **Теплообмен** при кипении жидкого металла в системе каналов в режиме естественной конвекции / А.Д. Ефанов, А.П. Сорокин, Е.Ф. Иванов, Г.П. Богословская, В.В. Иванов, А.Д. Волков, Г.А. Сорокин, И.Р. Зуева // Теплоэнергетика. 2007. № 3. С. 43–51. <https://doi.org/10.1134/S0040601507030081>
7. **Sorokin G.A., Sorokin A.P.** Experimental and numerical investigations of liquid metal boiling in fuel subassemblies under natural circulation conditions // Prog. Nucl. Energy. 2005. V. 47. № 1–4. P. 656–663. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2005.05.069>
8. **Numerical study of liquid metal boiling in the system of parallel bundles under natural circulation** / G.A. Sorokin, H. Ninokata, A.P. Sorokin, H. Endo, E.F. Ivanov // J. Nucl. Sci. Technol. 2006. V. 43. Is. 6. P. 623–634. <https://doi.org/10.1080/18811248.2006.9711142>
9. **Сорокин А.П., Кузина Ю.А., Иванов Е.Ф.** Теплообмен при кипении жидкометаллических теплоносителей в ТВС быстрых реакторов в аварийных режимах // ВАНТ. Сер.: Ядерно-реакторные константы. 2018. Вып. 3. С. 176–194. [АО ГНЦ РФ-ФЭИ, Обнинск.] <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2018/3-17.pdf>
10. **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.
11. **Flow visualization studies of boiling water at high pressures** / B.A.W. Bennett, G.F. Hewitt, H.A. Kearsley, R.K.F. Keeys, P.M.C. Lacey // Proc. of the Conf. in Institution of Mechanical Engineers. AERE–R4874, 1965. https://doi.org/10.1243/PIME_CONF_1965_180_119_02
12. **Кузнецов Ю.Н.** Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
13. **Incipient boiling of sodium in single-pin annular channel** / Y. Kikuchi, T. Takahushi, K. Haga, T. Okouchi // J. Nucl. Sci. Technol. 1974. V. 11. Is. 5. P. 172–186. <https://doi.org/10.1080/18811248.1974.9730645>
14. **Теплообмен** жидких металлов при кипении и конденсации / Ю.А. Зейгарник, П.Л. Кириллов, П.А. Ушаков, М.Н. Ивановский // Теплоэнергетика. 2001. № 3. С. 2–8.
15. **Боришанский В.М., Жохов В.А., Андреевский А.А.** Теплоотдача при кипении жидких металлов // Атомная энергия. 1965. Т. 19. Вып. 2. С. 191–193.

Experimental and Numerical Investigations into Heat Exchange and Stability of Circulation during Liquid Metals' Boiling in Assemblies of Fast Neutron Reactors in Accident Regimes

A. P. Sorokin^{a, *}, Eu. F. Ivanov^a, Ju. A. Kuzina^a, N. A. Denisova^a,
A. A. Nizovcev^a, V. V. Privezenцев^a, and G. A. Sorokin^b

^a *Institute for Physics and Power Engineering, Obninsk, Russia*

^b *MIPT, Moscow, Russia*

*e-mail: sorokin@ippe.ru

Abstract—Cooling of the core in fast neutron reactors in accident conditions (ULOF, UTOP) leads to the study of regimes with reduced coolant flow rates or during natural convection in fuel assemblies. The results of experiments on heat exchange and the stability of circulation during boiling of a sodium and sodium-potassium alloy on the models of single and in a system of parallel fuel assemblies with natural coolant circulation are presented. It is shown that the boiling process of liquid metals in fuel assemblies has a complex structure, is characterized by both stable and pulsating regimes with significant fluctuations in flow rate, pressure, temperature, and the occurrence of a heat exchange crisis. The hydrodynamic interaction of the circulation contours can lead to a significant increase in the amplitude of fluctuations in the coolant flow rate in them (“resonance” of flow rate pulsations) and a possible “blocking” or inversion of the coolant flow rate, an increase in the temperature of the coolant, and the cladding of the fuel elements (interchannel instability effect) and crisis. The data of calculated and experimental studies of the liquid metal boiling in FA models are compared. The effect of the surface roughness of the fuel rods on the heat exchange and flow regimes during a liquid metal boiling in bundles is demonstrated. It has been shown experimentally that there is no steaming of the sodium cavity and no change in the boiling regime in the fuel assembly when a sodium cavity is located in a fuel assembly designed to compensate for the positive sodium void reactivity effect during sodium boiling. There is the possibility of continued cooling of the fuel elements in the fuel assembly. The data on heat exchange during boiling of liquid metals in bunches are generalized, and a cartogram of the flow regimes of a two-phase flow of liquid metals in bundles is constructed that differs significantly from the cartogram for water. The boundaries between flow regimes are approximated by simple dependencies.

Keywords: fast reactor, liquid metal, boiling, natural convection, accident regimes, experiment, calculation, heat exchange, fuel assembly, fuel element, vapor content, roughness, cartogram of the flow regimes, overheating during boiling-up, circulation stability, heat exchange crisis