

3. Мероприятия, направленные на сокращение продолжительности выполнения работ, — использование дистанционно управляемых инструментов при проведении работ по техническому обслуживанию, ремонту и легкоосъемной теплоизоляции, автоматизация контроля металла, оснащение работ надежным освещением, оптимальное использование лесов и переходных настилов, организация тренировок на стендах-имитаторах оборудования, разработка и внедрение обучающих компьютерных программ.

Реализация части намеченных мероприятий привела к снижению облучения персонала АЭС в 1996—1998 гг. Дальнейшее продвижение по пути внедрения принципа ALARA требует от АЭС:

создания специальной структуры (комитета ALARA, инженерной группы ALARA); разработки специальной программы снижения облучения персонала и методических документов станционного уровня по реализации принципа ALARA;

внедрения особого порядка организации радиационно опасных работ, включающего вовлечение персонала в планирование и подготовку работ, выбор и планирование, подготовку и выполнение, анализ и оценку работ, учет опыта.

В заключение необходимо отметить, что такая работа на российских АЭС уже начата и ее успешное продолжение позволит удовлетворить более строгим требованиям новых нормативных документов по радиационной безопасности.

Поступила в Редакцию 26.08.99

УДК 621.039.526.034+621.039.546.8:536.26

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В РЕЖИМЕ АВАРИЙНОГО РАСХОЛАЖИВАНИЯ БЫСТРОГО РЕАКТОРА

*Сорокин А.П., Ефанов А.Д., Иванов Е.Ф., Марцинюк Д.Е., Богословская Г.П.,
Рымкевич К.С., Мальков В.Л. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)*

Кипению щелочных металлов на протяжении последних трех десятилетий уделялось большое внимание [1, 2]. Изучали теплоотдачу, режимы течения, гидравлическое сопротивление, кризис теплоотдачи, начальный перегрев, механизм процесса кипения, его устойчивость. Результаты исследований показывают, что в сравнении с водой кипение жидких металлов имеет особенности, к которым относятся следующие:

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

у щелочных металлов образуются пузыри большого размера на ограниченном числе центров парообразования, основная часть времени цикла образования пузыря приходится на период ожидания;

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

основные режимы течения двухфазных потоков щелочных металлов те же, что и обычных теплоносителей: при давлении, близком к атмосферному, преобладает дисперсно-кольцевой режим;

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.

Основное внимание в настоящих исследованиях уделено анализу переходных и аварийных режимов, вызванных резким увеличением мощности и разными блокировками проходного сечения активной зоны, остановкой циркуляционного насоса (при

выбеге ротора и без него). Данных о кипении в пучках в режимах с малой скоростью течения теплоносителя при естественной конвекции мало.

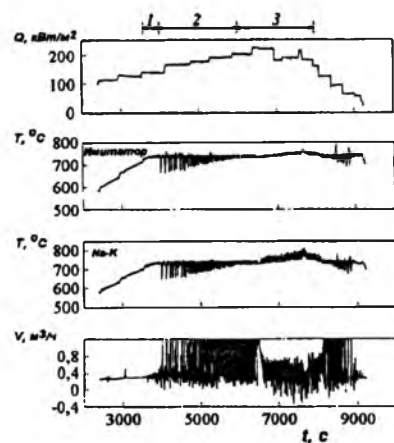
Экспериментальная модель. Установка для проведения исследований кипения эвтектического натриево-калиевого сплава (22% Na + 78% K) в условиях естественной

конвекции (рис. 1) содержит два вертикальных канала высотой 3 м, соединенных между собой вверху и внизу и образующих соответственно опускающую и подъемную ветви контура циркуляции. В нижней части подъемного канала расположен рабочий участок, содержащий 7-стержневую сборку имитаторов твэлов. Сборка состоит из 7 имитаторов и 12 стержней-вытеснителей, расположенных в треугольной решетке с относительным шагом 1,185 и заключенных в трубу из нержавеющей стали размером $50 \times 1,5$ мм, длиной 3 м.

Имитаторы твэлов представляют собой калиброванные трубки заводского изготовления из нержавеющей стали марки X18H10 диаметром 8, толщиной 1 мм, внутри которых установлены спиральные нагреватели из молибденовой проволоки диаметром 1 мм. Диаметр спирали 4, длина 420 мм. Зазор между нагревателями и оболочками имитаторов заполнен порошком из плавленного оксида магния. Модельная сборка оснащена большим числом измерительных каналов, содержащих разные первичные преобразователи (датчики), что позволило получить обширный экспериментальный материал для исследования кипения жидкометаллического теплоносителя в сборке электрообогреваемых имитаторов твэлов.

Р и с. 1. Экспериментальная модель: 1 — активная зона; 2 — расходомеры; 3 — компенсатор давления; 4 — холодильник; 5 — магазин сопротивлений

Экспериментальные исследования. Проведена серия экспериментов по исследованию кипения эвтектического натриево-калиевого сплава в модели ТВС быстрого реактора в режиме естественной конвекции при разной массовой скорости потока вследствие изменения гидравлического сопротивления контура циркуляции с использованием дроссельного устройства. Методика проведения экспериментов состояла в том, что при неподвижном теплоносителе в контуре увеличивалась тепловая мощность ТВС и начиналось естественное движение теплоносителя. По мере роста тепловой мощности повышалась температура теплоносителя, до тех пор пока не достигалась температура насыщения в зоне обогрева и начинался процесс кипения (рис. 2). Наблюдали три режима кипения:



пузырьковый в начальной стадии процесса. Его особенность — устойчивая температура теплоносителя имитаторов, перепад давления на сборке, расход теплоносителя на входе и выходе из зоны обогрева. Увеличение мощности энерговыделения приводило к переходу пузырькового кипения в снарядное;

снарядный при плотности теплового потока от 125 до 170 кВт/м². Особенность этого режима — пульсационный характер. Отмечено образование

Р и с. 2. Изменение плотности теплового потока, температуры имитатора и теплоносителя в сечении на выходе из зоны энерговыделения и объемного расхода теплоносителя в контуре в эксперименте с дроссельной шайбой диаметром 20 мм: 1, 2, 3 — пузырьковый, снарядный, дисперсно-кольцевой режим соответственно

крупных паровых пузырей (снарядов) с интервалом 40 с и более, которые в момент всплывания вызвали резкое увеличение расхода теплоносителя на входе и значительные колебания измеряемых параметров. Колебания параметров имели гидродинамическую природу и определялись не только процессом непосредственно кипения теплоносителя в ТВС, но и комплексом процессов, происходящих и в сборке, и в циркуляционном контуре. Температура оболочки имитаторов твэлов не превышала температуру насыщения, что свидетельствовало о наличии пленки жидкости на поверхности имитаторов. Увеличение мощности сборки приводило к росту частоты образования снарядов и уменьшению амплитуды пульсаций температуры. При тепловом потоке от 210 до 230 кВт/м² наблюдали переход от снарядного к дисперсно-кольцевому режиму;

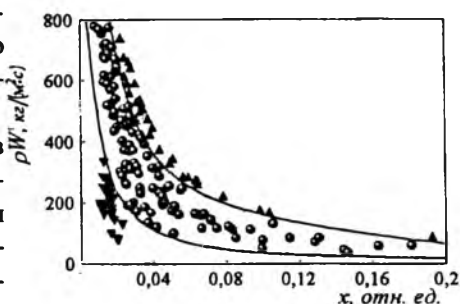
дисперсно-кольцевой, характеризуемый устойчивым поведением измеряемых параметров. Испарение жидкости и унос капель с поверхности имитаторов приводило к осушению поверхности — кризису теплообмена, плавлению оболочки имитаторов и переходу к тяжелой аварии. Поэтому дисперсно-кольцевой режим — предельный режим кипения, который обеспечивает достаточное охлаждение ТВС.

Эксперименты показали, что при переходе от пузырькового к дисперсно-кольцевому режиму увеличивается расход теплоносителя в контуре примерно в 3 раза. Это объясняется тем, что при малом массовом паросодержании потери на трение двухфазного потока еще относительно невелики и незаметны на фоне выталкивающей силы, действующей на паровую фазу. При тепловом потоке свыше 250 кВт/м² наблюдали уменьшение расхода теплоносителя в контуре циркуляции и переход от дисперсно-кольцевого к дисперсному режиму кипения (закризисный теплообмен), поскольку истинное объемное паросодержание увеличилось незначительно, а трение двухфазного потока (как и паросодержание) становилось существенным.

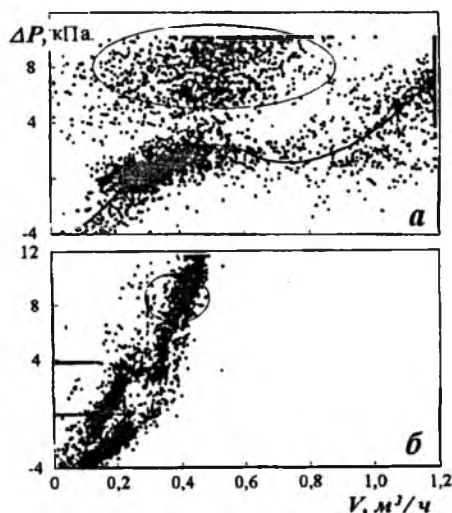
Экспериментальные данные представлены в виде зависимости массовой скорости жидкого металла от паросодержания режимов кипения (рис. 3): устойчивого пузырькового, неустойчивого снарядного, устойчивого дисперсно-кольцевого. Между ними проведены приближенные аппроксимирующие линии.

Кривая устойчивости. При обработке данных важным этапом являлось построение гидравлических характеристик для каждого эксперимента в отдельности. Получены точечные картограммы зависимости перепада давления в рабочем участке контура от объемного расхода (рис. 4). Расположение точек на картограммах позволило провести аппроксимирующие линии, которые схожи с гидравлической характеристикой, соответствующей неустойчивому режиму кипения. Наряду с множеством точек, характеризующих пульсационный режим кипения, есть обособленное множество точек, относящихся к режиму устойчивого кипения, которое выделено овалом.

Р и с. 4. Теплогидравлические характеристики контура для эксперимента с дроссельной шайбой диаметром 20 мм (а) и 12 мм и дополнительным сопротивлением поджатого вентиля (б)



Р и с. 3. Картограмма режимов кипения: устойчивое пузырьковое (▼), неустойчивое снарядное (●), устойчивое дисперсно-кольцевое (▲)



Расположение и размеры области устойчивости относительно кривой гидравлической характеристики зависят от суммарного гидравлического сопротивления контура. Эти области выделялись в верхней части картограммы, соответствующей максимальному перепаду давления, и располагались тем ближе к аппроксимирующей линии, чем больше общее гидравлическое сопротивление. В эксперименте с дроссельной шайбой диаметром 20 мм (см. рис. 4, а) область устойчивого кипения выделяется особенно четко. При малом расходе (дроссельная шайба диаметром 12 мм и добавочное сопротивление зажатого вентиля, см. рис. 4, б) эта область относительно невелика и теряется среди точек неустойчивого режима. Отчетливо прослеживается спрямление аппроксимирующей кривой при увеличении гидравлического сопротивления контура, когда гидравлическая характеристика становится однозначной. При большом гидравлическом сопротивлении вероятность возникновения неустойчивого режима кипения мала и гидравлическая характеристика находится в области устойчивого кипения.

Теплообмен при кипении жидких металлов. При кипении идеальных растворов (эвтектического натриево-калиевого сплава) зависимость коэффициента теплообмена α от концентрации низкокипящего компонента C' (в нашем случае это калий с температурой кипения $t_{\text{кип}} = 1033 \text{ K}$) имеет минимум. Коэффициент теплообмена для смеси может быть меньше его аддитивного значения, определяемого соотношением $\alpha_{\text{NaK}} < \alpha_K C'_K + \alpha_{\text{Na}}(1 - C'_K)$, где α_{Na} , α_K — коэффициенты теплообмена при кипении чистых калия и натрия соответственно при одинаковом давлении.

Анализ показывает, что экспериментальные данные кипения калия в большом объеме и трубах [3] и натриево-калиевого сплава в пучках стержней $\alpha = Aq^m p^n$, где A — коэффициент пропорциональности; q — плотность теплового потока; p — давление, согласуются между собой. Здесь $m = 0,7$, $n \approx 0,1-0,15$, $A = 4-7$.

В критериальном виде коэффициенты теплоотдачи при кипении жидких металлов удовлетворительно обобщаются формулой [4]

$$\text{Nu} = 8,7 \cdot 10^{-4} \text{Pe}^{0,7} K_p^{0,7},$$

где $\text{Nu} = \alpha / \lambda' \sqrt{\sigma(\rho' - \rho'')}g$ — критерий Нуссельта; $\text{Pe} = qcp' / rp' \lambda' \sqrt{\sigma(\rho' - \rho'')}g$ — критерий Пекле; $K_p = p / \sqrt{\sigma g(\rho' - \rho'')}$.

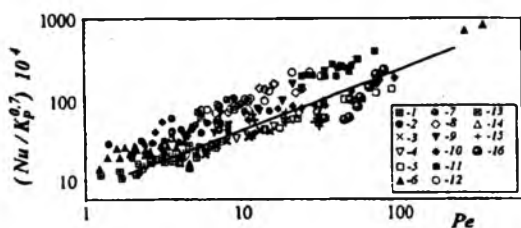


Рис. 5. Кипение калия в большом объеме при давлении 120 (1), 110 (2), 70 (3), 40 (4), 4 КПа (5) [5], натрия при 100 (6), 47,2 (7) [5], 26 (8), 100 кПа (9) [6], в большом объеме (10) [5], со щелью диаметром 2 (11), 4 (12), 1 мм (13) [5], калия в трубе диаметром 22 (14), 8,3 мм (15) [7], 7-стержневой пучок (16) [8]; — — рассчитано по формуле $\text{Nu}/K_p^{0,7} = 8,7 \cdot 10^{-4} \text{Pe}^{0,7}$

Экспериментальные точки, полученные на сплаве натрий—калий, хорошо согласуются с этой зависимостью (рис. 5). Это свидетельствует о подобии кипения сплава натрий—калий и других жидких металлов, следовательно, данные, полученные на сплаве натрий—калий, можно переносить на натрий.

Кризис теплообмена при кипении жидкого металла. Экспериментальные данные о критическом тепловом потоке [9—12], полученные при кипении натрия и калия в трубах и сборке, проанализированы в следующем диапазоне изменения параметров: массовая скорость 1,69—

402 кг/(м²·с), давление 0,001—0,3 МПа, гидравлический диаметр канала 4—9 мм, длина участка энерговыделения 200—1000 мм. Для этой области параметров критический тепловой поток изменялся в пределах 32,3—7370 кВт/м². В результате обобщения имеющихся данных получено со-

отношение $q_{кр} = 0,312 (G^{0,95} / (L/D_p)) r$, которое удовлетворительно описывает данные независимо от условий проведения эксперимента (рис. 6).

Расчетные исследования. Режимы кипения жидкометаллического теплоносителя были смоделированы с помощью кода ТНВ, созданного на основе гомогенной одномерной математической модели со скольжением. Помимо системы дифференциальных уравнений движения и энергии для теплоносителя модель включает в себя уравнение энергии для имитаторов твэлов.

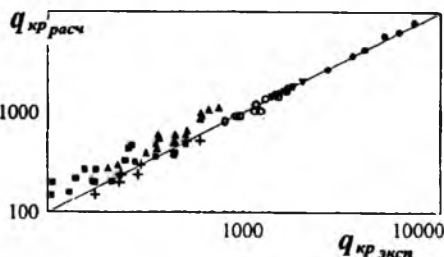
Код ТНВ моделирует естественную циркуляцию и кипение жидкометаллического теплоносителя в замкнутом контуре с дыхательным баком и системой нагревательных элементов. Расчет проводится исходя из начального распределения по длине контура температуры имитаторов и теплоносителя, давления, скорости и подводимой к нагревательным элементам тепловой мощности. Подводимую к имитаторам мощность можно изменять вручную или программно по заданному закону. При расчетах тепловая мощность была взята из файлов, соответствующих изменению плотности тепловыделения во времени в реальных экспериментах.

Изменения температуры имитатора на конце сборки, температуры теплоносителя в том же сечении и объемного расхода теплоносителя в сечении, соответствующем расходу на опускном плече реального контура, позволяют судить о схожести расчетного процесса с ходом эксперимента (рис. 7). Несмотря на очевидную простоту модели, она хорошо отражает главные особенности экспериментов.

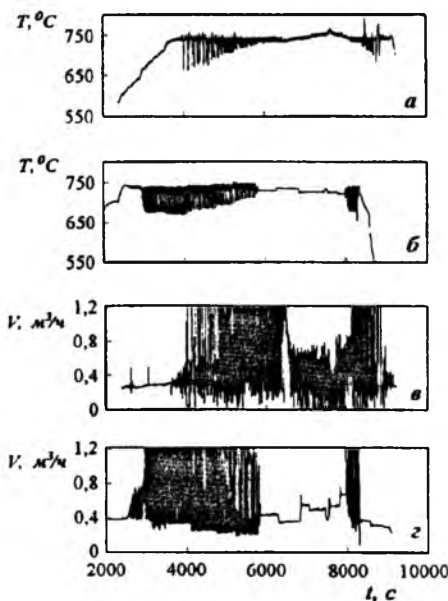
Основными достоинствами кода ТНВ являются:

- описание динамики процесса циркуляции и кипения теплоносителя в реальном времени с совпадением основных числовых характеристик;
- возможность выбора любого жидкометаллического теплоносителя с заранее известными свойствами, любой геометрии контура естественной циркуляции, включая контур реального реактора с жидкометаллическим теплоносителем, закона изменения выделяющейся топливными элементами тепловой мощности.

Закключение. Исследования кипения эвтектического сплава натрия—калий в модели ТВС быстрого реактора в режиме естественной конвекции проведены в диапазоне массовой скорости потока $20\text{—}700 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и плотности теплового потока до $260 \text{ кВт}/\text{м}^2$. Отмечены три режима кипения: пузырьковый, снарядный, дисперсно-кольцевой. Дисперсно-кольцевой является предельным режимом, который обеспечивает достаточное охлаждение ТВС. В снарядном режиме расход теплоносителя изменяется между значениями для пузырькового и дисперсно-кольцевого режима кипения. При переходе от пузырькового к дисперсно-кольцевому режиму происходит увеличение расхода теплоносителя в контуре циркуляции примерно в 3 раза. При тепловом потоке свыше $250 \text{ кВт}/\text{м}^2$ отмечали падение расхода теплоносителя в контуре и переход от дисперсно-кольцевого к дисперсному режиму кипения (закризисный теплообмен).



Р и с. 6. Расчетный и экспериментальный критический тепловой поток при кипении натрия (■ — [9]; ▼ — [10]; ▲ — [11]; + — [12]) и калия (○ — [10]; ● — [11])



Р и с. 7. Экспериментальная (а, в) и расчетная температура (б, г) стенки имитатора и расход теплоносителя для варианта с дроссельной шайбой диаметром 20 мм

Анализ коэффициентов теплообмена и критического теплового потока при кипении, проведенный для натрия, калия и эвтектического натриево-калиевого сплава, показывает, что на современном уровне знаний эти теплофизические характеристики жидких металлов подобны качественно и количественно. Экспериментальные результаты для эвтектического натриево-калиевого сплава могут быть использованы в расчетах теплообмена при кипении для реакторов с охлаждением натрием.

Результаты расчетов показали соответствие экспериментальным данным не только по характеру процесса, но и по основным теплогидравлическим характеристикам.

Следует отметить, что в настоящее время не исследовано влияние многих факторов на процесс кипения и границы между разными режимами (давления, геометрических параметров, например, длины участка энерговыделения, соотношения гидравлического сопротивления разных участков контура циркуляции и др.). Не исследована устойчивость кипения жидкого металла в системе параллельных ТВС.

Авторы выражают благодарность за помощь в работе по подготовке экспериментов, анализу и обсуждению результатов Ю.А. Зейгарнику, П.Л. Кириллову и Л.А. Кочеткову.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зейгарник Ю.А., Литвинов В.Д. Кипение щелочных металлов в каналах. М.: Наука, 1983. 125 с.
2. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М., Новиков И.И., Федынский О.С. Теплопередача в жидких металлах. Жидкометаллические теплоносители. М.: Атомиздат, 1958.
3. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М.: Энергоатомиздат, 1990. 360 с.
4. Минченко Ф.П. К вопросу о теплообмене при пузырьковом кипении. — Энергомашиностроение, 1960, № 6, с. 17—21.
5. Боришанский В.М., Андреевский А.А., Жохов К.А. и др. Теплоотдача при кипении щелочных металлов. — Атомная энергия, 1965, т. 13, вып. 2, с. 191—197.
6. Lyon R., Faust F., Katz F. Heat transfer at liquid metal boiling. — Chemical Engng Progress, 1955, v. 51, № 17, p. 41—54.
7. Brooks K., Sawochka S. Power Systems for Space Flight. New York—London: Acad. Press, 1963, 381 p.
8. Сорокин А.П., Иванов Е.Ф., Мальков В.Л. и др. Экспериментальное исследование теплообмена и устойчивости кипения жидкометаллического теплоносителя в контуре естественной циркуляции: Препринт ФЭИ-2631, 1997. 32 с.
9. Yamaguchi K. Flow pattern and dryout under sodium boiling conditions at decay power levels. — Nuclear Engng Design, 1987, v. 99, № 3, p. 247—263.
10. Chang S., Lee Y. A new critical heat flux model for liquid metals under low heat flux-low flow conditions. — Ibid, 1994, v. 118, № 3, p. 487—498.
11. Kottowski H.M., Savatteri C. Fundamentals of liquid metal boiling thermohydraulics. — Ibid, 1984, v. 82, № 3, p. 281—304.
12. Kaiser A., Peppler W. Type of flow, pressure drop, and critical heat flux of a two-phase sodium flow. — Ibid, 1974, v. 30, № 3, p. 305—315.

Поступила в Редакцию 27.07.99

УДК 621.039.534.25

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИКИ ТВС РЕАКТОРОВ С БЛОКИРОВКАМИ

*Кузина Ю.А., Сорокин А.П., Жуков А.В.
(ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)*

Расчетные исследования теплогидравлики сборок стержней с частичной блокировкой проходного сечения для теплоносителя базируются на двух подходах: показальной методике [1—5] и модели пористого тела [6—10]. Первый из них основывается на решении уравнений сохранения импульса, массы и энергии в каналах (ячейках), образованных соседними твэлами (программы COBRA-3C [11], THJ-3D [12], DECOS