

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ НАТРИЯ В МОДЕЛИ ТВС В ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНОГО РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Р.Р. Хафизов, В.М. Поплавский, В.И. Рачков, А.П. Сорокин,

А.А. Труфанов, Ю.М. Ашурко, А.В. Волков, Е.Ф. Иванов,

В.В. Привезенцев

*АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», пл. Бондаренко, 1, г. Обнинск, Калужской обл., 249033*



Численное моделирование развития аварийной ситуации типа ULOF в реакторе на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, выполненное с использованием кода COREMELT, указывает на возникновение и развитие кипения натрия в активной зоне, сопровождающееся колебаниями технологических параметров реакторной установки. Существенное влияние на результаты расчетов оказывает используемая в коде модель двухфазного потока теплоносителя, которая требует экспериментального подтверждения. Для исключения развития аварийной ситуации, приводящей к разрушению элементов активной зоны, предложено конструктивное решение, заключающееся в использовании «натриевой полости» над активной зоной реактора. В результате проведенных экспериментальных исследований теплообмена при кипении натрия в модельной тепловыделяющей сборке реактора на быстрых нейтронах с «натриевой полостью» на стенде AP-1 в режиме естественной циркуляции показано, что существует возможность обеспечения длительного охлаждения ТВС. Представлена картограмма режимов течения двухфазного потока жидкометаллических теплоносителей в сборках твэлов, приведены и анализируются данные по теплоотдаче при кипении ЖМТ в ТВС. Полученные данные используются для уточнения расчетной модели процесса кипения натрия в ТВС и верификации расчетного кода COREMELT.

**Ключевые слова:** реактор на быстрых нейтронах, натрий, модель тепловыделяющей сборки, экспериментальные исследования, кипение, картограмма режимов течения двухфазного потока, теплоотдача.

### ВВЕДЕНИЕ

Опыт эксплуатации быстрых реакторов (БН-350, БН-600, Феникс, PFR) подтвердил их удобство при эксплуатации благодаря хорошей самоуправляемости и устойчивости [1].

© *Р.Р. Хафизов, В.М. Поплавский, В.И. Рачков, А.П. Сорокин, А.А. Труфанов, Ю.М. Ашурко, А.В. Волков, Е.Ф. Иванов, В.В. Привезенцев, 2015*

Принимаемые конструктивные и технологические решения, касающиеся перспективных реакторных установок, должны исключать развитие аварийных ситуаций, приводящих к разрушению элементов активной зоны. Так, в случае вскипания натриевого теплоносителя конструктивное устройство реактора должно предотвращать возможное наступление кризиса теплообмена с последующим разрушением оболочек твэлов.

Расчетные исследования с применением кода COREMELT [2] для наиболее неблагоприятного сценария запроектной аварии, связанной с одновременным прекращением электроснабжения всех главных циркуляционных насосов с совместным отключением органов аварийного останова реактора (авария типа ULOF), подтвердили эффективность организации в ТВС так называемой «натриевой полости», расположенной перед верхним торцевым экраном, с целью обеспечения самозащитенности реактора большой мощности с натриевым теплоносителем [3]. Наличие «натриевой полости» позволяет компенсировать положительный натриевый пустотный эффект реактивности (НПЭР) вследствие того, что при попадании паровой фазы из верхней части активной зоны в эту полость увеличивается вклад утечки нейтронов в общий баланс реактивности, и мощность реактора начинает снижаться, что приводит к снижению интенсивности парообразования.

Расчетные исследования, выполненные по коду COREMELT, указывают на колебания технологических параметров реакторной установки во время развития аварийной ситуации типа ULOF с возникновением кипения натрия в активной зоне, которые могут продолжаться в течение нескольких десятков секунд [3]. При этом возможна реализация устойчивого режима отвода остаточного энерговыделения без кризиса теплообмена. Поскольку результаты расчетов существенно зависят от используемой в коде модели двухфазного потока теплоносителя, необходимо ее экспериментальное подтверждение.

В 1970-80 гг. в различных странах, например, в Японии [4, 5], Германии [6], США [7], Франции [8], в 1990-х и начале 2000-х гг. в России [9 – 13] были проведены исследования кипения жидкометаллических теплоносителей в модельных ТВС классической конструкции без «натриевой полости». Особый интерес представляют результаты экспериментальных исследований кипения натрия в условиях естественной конвекции при малых скоростях натриевого теплоносителя, характерных для аварии типа ULOF. Данные по кипению натрия при наличии «натриевой полости» в ТВС для этих режимов отсутствуют.

Таким образом, задачами исследований являются изучение особенностей развития кипения натрия; определение границ устойчивого течения двухфазного потока натрия в режимах с малыми массовыми скоростями, характерными для ULOF, в модели ТВС активной зоны реактора на быстрых нейтронах с «натриевой полостью»; получение данных для верификации кода COREMELT.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ. СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ И УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОМ**

Экспериментальная установка состоит из двух циркуляционных контуров основного контура с натриевым теплоносителем и вспомогательного – с натрий-калиевым теплоносителем [14]. Основной контур представлен подъемным участком с моделями ТВС и верхнего торцевого экрана, расширительным баком, опускной линией, электромагнитным насосом индукционного типа и подогревателем прямого накала, установленным в начале подъемной ветви. Кроме того, контур снабжен параллельной укороченной веткой с малым гидравлическим сопротивлением, которая минует подогреватель прямого накала. Для нее предусмотрен электромагнитный

насос кондуктивного типа на основе постоянного магнита. Вспомогательный контур служит для охлаждения теплоносителя в натриевой петле. Отвод тепла от натриевой петли осуществляется через рубашку-холодильник, которая установлена на внешней поверхности расширительного бака. В расширительный бак натрий попадает из экспериментальной модели, после чего охлажденный до 550°C поступает в опускной участок. Тепловая энергия от натрий-калиевой петли отводится воздушным теплообменником.

Сборка имитаторов твэлов состоит из семи элементов с электрическим обогревом, упакованных в треугольную решетку с относительным шагом 1,11 и дистанционированием проволоочной навивкой, которая помещена в шестигранный чехол из жаропрочной стали, выполняющий функцию корпуса. Его внешняя поверхность снабжена потенциометрическими датчиками, термопарами, охранным подогревателем и заключена в слой теплоизоляции.

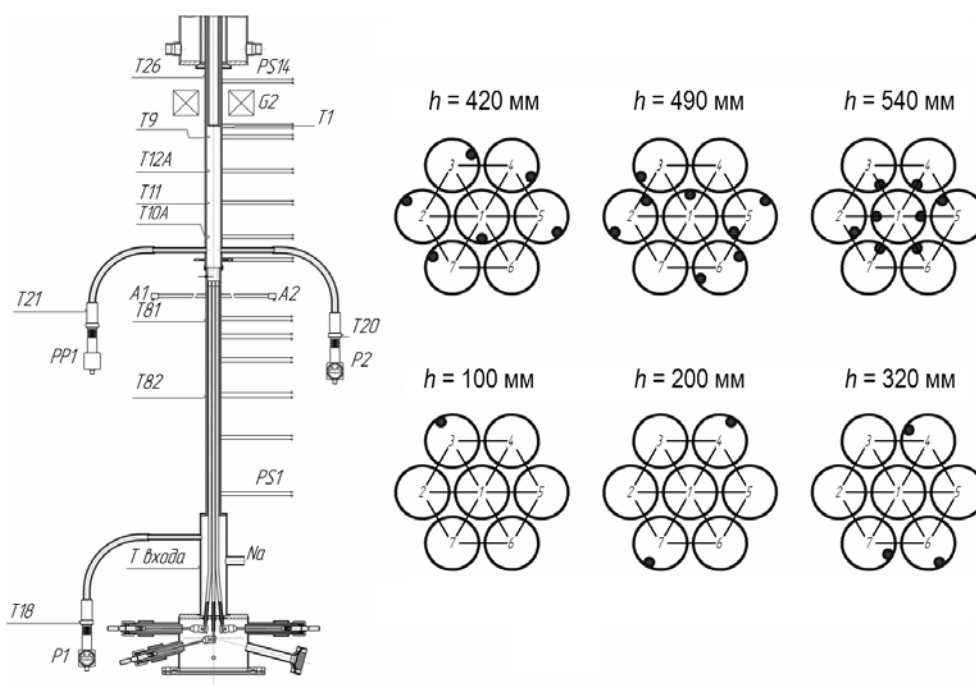


Рис. 1. Расположение датчиков на рабочем участке и в пучке имитаторов

Имитаторы твэлов состоят из цилиндрической оболочки с внешним диаметром около 9 мм и длиной 1200 мм, внутри которой расположена спираль из тугоплавкого металла длиной 600 мм. Пространство между спиралью и оболочкой заполнено высокотемпературной электроизоляционной засыпкой и гелием. Оболочка состоит из двух коаксиальных труб из жаропрочной стали. В трубе меньшего диаметра организованы продольные пазы для установки четырех термопар, распределенных по длине зоны энерговыделения.

Перед модельной сборкой натрий подогревается или при прохождении по линии принудительной циркуляции в петлевом подогревателе прямого накала, или на подъемной линии петли естественной циркуляции. После подогрева он сначала попадает во входную камеру экспериментального участка, затем в обогреваемую область модели ТВС. Над моделью активной зоны расположена «натриевая полость» длиной 430 мм, затем натрий проходит через область, затесненную имитатором верхнего торцевого экрана длиной 700 мм, который вместе с корпусом участка образу-

ет кольцевой зазор шириной 4 мм.

Кипение натрия в затесненных каналах ТВС является сложным и динамичным высокотемпературным процессом (температура насыщения натрия при атмосферном давлении – 883°C). Динамика образования паровой фазы может быть взрывной, особенно, с учетом возможного перегрева натрия относительно температуры насыщения при его вскипании. Оперативное управление установкой, запись и обработка данных осуществляются с высокой скоростью непрерывно в реальном времени.

При создании основы программно-измерительного комплекса использована платформа «National Instruments Compact RIO». Программируемый контроллер Compact RIO представляет собой многофункциональную и универсальную систему сбора данных, контроля и управления технологическими процессами, обеспечивающую высокую производительность, точность и надежность работы измерительных систем.

Записываются и обрабатываются аналоговые и дискретные сигналы: мощность имитаторов твэлов; температура технологических элементов и в трубопроводах циркуляционных контуров, в потоке теплоносителя, стенок имитаторов твэлов; давление в газовой полости, теплоносителя в контуре, перепад давления в модели ТВС, пульсации давления на выходе из модели ТВС; расход теплоносителя в контуре, пульсации расхода на выходе из модели; регистрация наличия паровой фазы в различных сечениях модели; уровень натрия в дыхательном баке; сигнал акустической эмиссии; напряжение на подогревателях; сигналы протечек теплоносителя, работоспособности электрооборудования и схем управления; регулирование мощности обогрева элементов контура, рабочего участка, системы воздушного охлаждения контура; управление расходом теплоносителя, аварийное отключение питания имитаторов твэлов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выход на режим кипения натрия в модели ТВС осуществляется повышением мощности энерговыделения имитаторов твэлов. Подогретый теплоноситель поднимается в расширительный бак, в котором охлаждается и далее поступает в опускной участок. Мощность имитаторов твэлов повышается дискретно небольшими ступенями вплоть до закипания натрия. Давление в газовой полости, заполненной аргоном, близко к атмосферному.

Тепловой поток изменялся в диапазоне от 110 до 140 кВт/м<sup>2</sup>. При этом подогрев теплоносителя в модельной ТВС составил 260 – 265°C, температура на входе – 636°C, температура насыщения на выходе из зоны обогрева – 890 – 900°C. Зависимости от времени теплового потока, температуры стенки центрального имитатора, температуры жидкости в «натриевой полости» и расхода натрия представлены на рис. 2.

Вскипание теплоносителя зафиксировано в момент времени 9799 секунд по показаниям расходомера – индикатора кипения, расходомера в однофазной области, сигналам акустической системы и пульсациям давления. В этот момент расход падает до нуля. Через половину секунды зафиксирован кратковременный скачок температуры стенки центрального имитатора, который, по-видимому, связан с прекращением расхода теплоносителя. Наблюдается рост температуры натрия в начале «натриевой полости» на 6°C, далее расход увеличивается до 0,3 м<sup>3</sup>/ч и происходит снижение температуры стенки имитатора до 911°C в течение трех секунд. Такой процесс повторяется многократно 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 теплоносителя в периоды до десяти секунд. Воз-

можно, характер этого процесса определяется гидравлическими характеристиками модели ТВС в области «натриевой полости» и имитатора верхнего торцевого экрана, который обуславливает относительно высокое гидравлическое сопротивление, препятствующее свободному продвижению паровой фазы и ее накоплению в «натриевой полости». Данный режим течения двухфазного потока натрия сохранялся длительное время без признаков кризиса теплообмена при уровне теплового потока до  $120 \text{ кВт/м}^2$ .

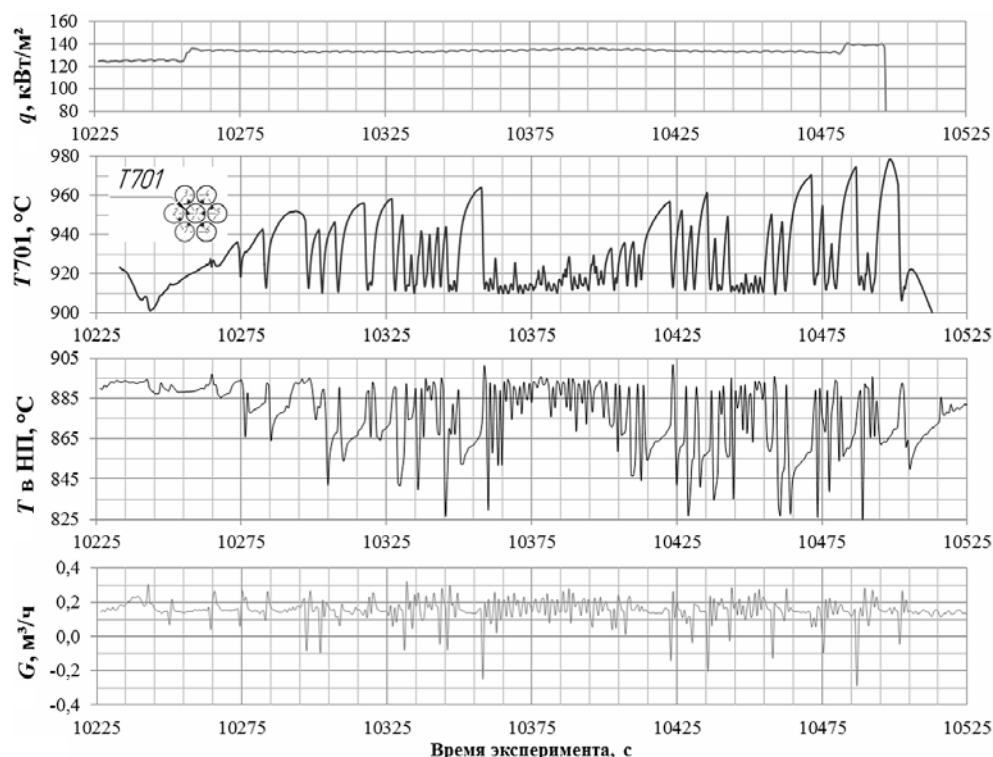


Рис. 2. Изменение температуры стенки центрального имитатора (Т701), температуры потока теплоносителя в «натриевой полости» и расхода теплоносителя в эксперименте с моделью верхнего торцевого экрана и «натриевой полостью» в условиях естественной циркуляции натрия в диапазоне теплового потока от 120 до  $140 \text{ кВт/м}^2$

При увеличении теплового потока имитаторов твэлов до  $135 \text{ кВт/м}^2$  наступил ярко выраженный пульсационный режим течения двухфазного потока (рис. 2) с периодом от трех до 14-ти секунд и амплитудой пульсаций температуры стенок имитаторов до  $55^\circ\text{C}$ .

Процесс интенсивного парообразования в сборке сопровождается последующей конденсацией в «натриевой полости» с заливом холодной жидкостью из верхней части модели. Об этом можно судить по крутым скачкам вниз температуры жидкости в натриевой полости (до  $820^\circ\text{C}$ ).

Одновременно с конденсацией в «натриевой полости» увеличивается расход теплоносителя, обеспечивая приток более холодной жидкости в модель активной зоны и прекращение кипения, далее процесс повторяется снова. При увеличении теплового потока до  $140 \text{ кВт/м}^2$  пульсации температуры стенки начинают непрерывно развиваться, и по достижении температуры стенки имитатора  $980 - 985^\circ\text{C}$  питание автоматически отключается аварийной системой защиты имитаторов.

### КАРТОГРАММА РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ В СБОРКАХ ТВЭЛОВ

Полученные в эксперименте данные для натрия нанесены на картограмму режимов течения двухфазного потока жидкометаллических теплоносителей в сборках ТВЭлов (рис. 3), полученную в работах [5, 9 – 13].

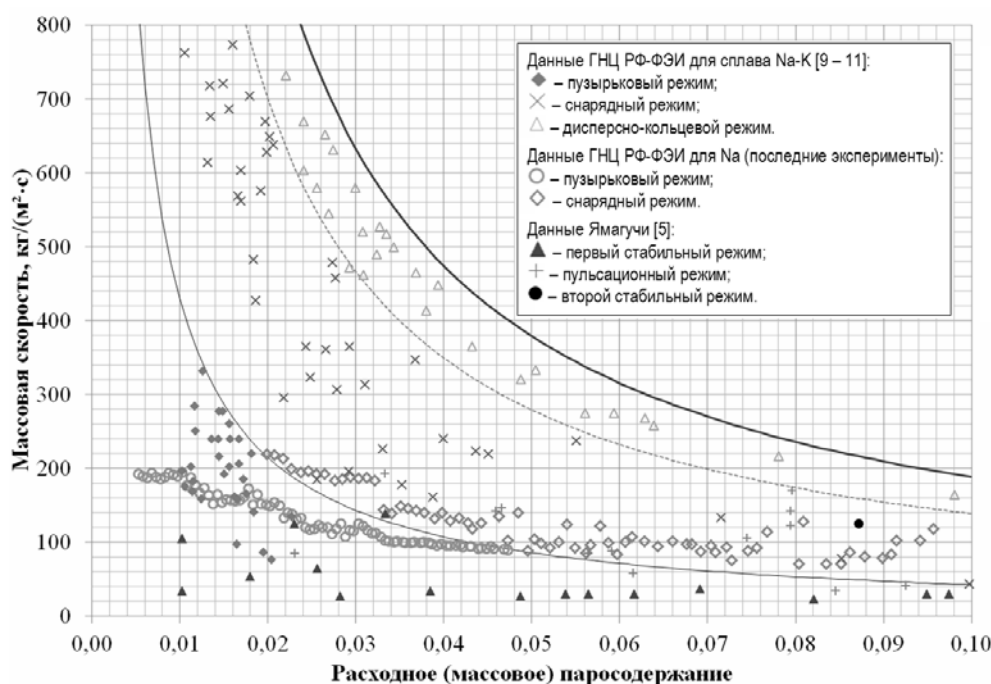


Рис. 3. Картограмма режимов течения двухфазного потока жидкометаллических теплоносителей

Экспериментальные данные для двухфазного потока жидкометаллических теплоносителей в сборках ТВЭлов в координатах массовая скорость – весовое паросодержание для пузырькового режима расположены в области весового паросодержания 0,1 – 2,5%, а для снарядного режима – 2,5 – 9%. Массовая скорость теплоносителя в режимах с кипением жидкого металла находится в диапазоне от 100 до 200 кг/(м²·с). Нанесенные на картограмму режимов экспериментальные данные для модели ТВС с «натриевой полостью» для натрия согласуются с данными, полученными в ГНЦ РФ-ФЗИ в серии экспериментов на модели ТВС без торцевого экрана в контурах с естественной циркуляцией натрий-калиевого сплава [9 – 13].

### ТЕПЛОТДАЧА ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ В КАНАЛАХ И СБОРКАХ ТВЭЛОВ

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

Данные по теплоотдаче жидкометаллических теплоносителей в каналах и пучках ТВЭлов разрозненны и несистематизированны, отсутствует обобщающая зависимость, учитывающая влияние всех факторов. При вынужденном течении парожидкостной смеси металлов в трубе (при давлении 0,1 МПа) уже при массовых паросодержаниях 0,01 – 0,05 наступает дисперсно-кольцевой режим. Он характеризуется тем, что 95 – 99% жидкости находится в виде капель в центральной области потока. Значе-



ние коэффициента теплообмена при этих условиях примерно такое же, как при кипении в большом объеме.

В дисперсно-кольцевом режиме фазовый переход связан с испарением с поверхности пристенной пленки жидкого металла, имеющей малую толщину и высокую теплопроводность. Влияние массовой скорости и паросодержания на теплообмен, по-видимому, несущественно. Эксперименты [15] подтвердили это предположение – коэффициент теплоотдачи при кипении натрия в широком диапазоне плотностей теплового потока ( $0,2 - 1,1 \text{ МВт/м}^2$ ) оставался неизменным и равным  $(2,5 - 4) \cdot 10^5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ .

Однако в опытах [16] при кипении калия наблюдалась хорошо известная зависимость для теплоотдачи при кипении  $\alpha \sim q^{0,7}$  для неметаллических жидкостей, близкая соответствующей зависимости для теплоотдачи при кипении жидкостей в большом объеме. Совпадение зависимости  $\alpha(q)$ , полученной в опытах с кипением жидкого металла в большом объеме и в трубах, не случайно. Аналогичное совпадение имеет место при кипении воды, а именно, соотношения по теплообмену при кипении воды в каналах при умеренных скоростях смеси соответствуют соотношениям для теплообмена при кипении воды в большом объеме. При малых скоростях пароводяной смеси  $\alpha \sim q^{0,7}$ , а при больших –  $\alpha \sim w^{0,8}$ , как это наблюдается для конвективного теплообмена.

$\alpha/p^{0,15}$ , кВт/(м<sup>2</sup>·К)

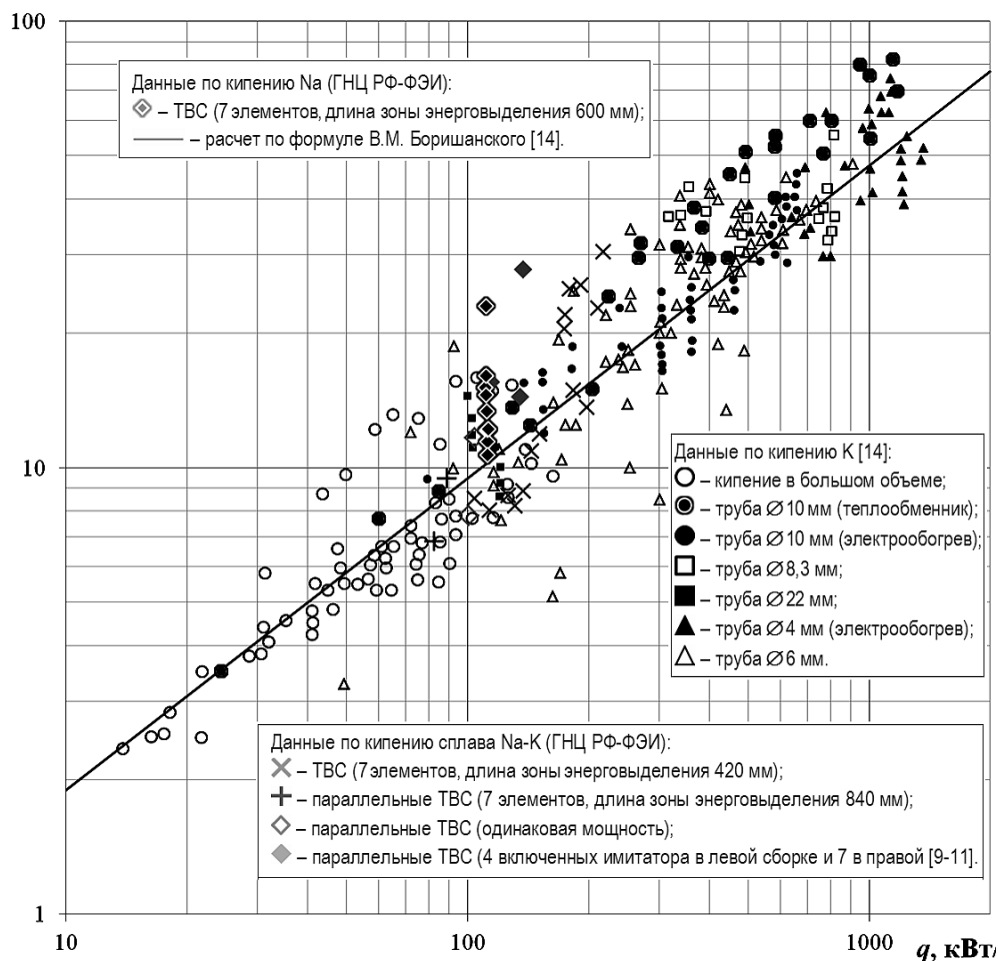


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных различных авторов по теплоотдаче при кипении жидких металлов в трубах с данными ГНЦ РФ-ФЭИ для сборок твэлов

Сопоставление данных по теплоотдаче при кипении натрий-калиевого сплава в сборках твэлов, полученных в экспериментах ГНЦ РФ-ФЗИ [9, 13], с данными по теплоотдаче при кипении калия в трубах [16] (рис. 4) показывает, что теплоотдача при кипении натрий-калиевого сплава в сборках твэлов выше, чем при кипении жидких металлов в трубах и в большом объеме [15, 16].

Поскольку с использованием представлений о термодинамическом подобии щелочных металлов все теплофизические свойства ( $\lambda$ ,  $r$ ,  $\sigma$ ,  $\rho$ ,  $T_s$ ) можно выразить через  $p/p_{кр}$ , формула для теплоотдачи при кипении жидких металлов может быть представлена в простом виде:

$$\alpha = A \cdot q^{2/3} (p/p_{кр})^n. \quad (1)$$

Аналогичные эмпирические соотношения для расчета теплообмена при развитом пузырьковом кипении различных жидкометаллических теплоносителей были предложены в виде следующей формулы [16]

$$\alpha = A \cdot q^m p^n, \quad (2)$$

где  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $p$  – давление, МПа.

Коэффициенты  $A$ ,  $m$  и  $n$ , описывающие данные различных авторов, принимают значения  $m = 0,7$ ;  $n = 0,1 - 0,15$ ;  $A = 4,5 - 7,5$  как для калия, так и для натрий-калиевого сплава.

Очевидно, что соотношения для теплоотдачи при кипении жидких металлов, задаваемые формулой (2), совпадают с формулами для пузырькового кипения воды и других жидкостей при  $p = 0,1$  МПа. Причиной данного сходства являются близкие величины скорости испарения ( $w_{ev} = q/r \cdot p''$ ), так как значения теплоты испарения на единицу объема разных жидкостей примерно одинаковы. Таким образом, с точностью  $\pm 50\%$  теплообмен при кипении не только термодинамически подобных металлических, но и других жидкостей описывается практически одинаковыми соотношениями. В первом приближении для расчета коэффициентов теплоотдачи при кипении натрия в сборках твэлов можно использовать зависимость (2).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчетных исследований аварии ULOF в реакторе на быстрых нейтронах показывают, что характер режима кипения натрия в активной зоне, особенно, в «натриевой полости», находящейся над активной зоной, оказывает сильное влияние на величину НПЭР и, соответственно, на характер протекания аварийного процесса и его последствия. В связи с этим требуется экспериментальное обоснование влияния «натриевой полости» на характер режима течения двухфазного теплоносителя как в активной зоне, так и в самой «натриевой полости». Для проведения экспериментов на теплогидравлическом стенде АР-1 в ГНЦ РФ-ФЗИ был создан высокотемпературный натриевый контур и выполнены исследования по кипению натрия в модели ТВС с «натриевой полостью». Впервые в результате проведенных экспериментальных исследований кипения натрия в модели ТВС реактора на быстрых нейтронах при наличии «натриевой полости» показано, что обеспечивается длительное охлаждение ТВС при плотности теплового потока на поверхности имитаторов твэлов до 140 кВт/м<sup>2</sup> в режиме естественной конвекции при массовых скоростях 100 – 200 кг/(м<sup>2</sup>·с).

Показано, что при кипении натрия в ТВС с «натриевой полостью» и верхним торцевым экраном может быть использована картограмма режимов течения двухфазного потока жидкометаллических теплоносителей в ТВС, полученная в работах [9 – 12].

Коэффициенты теплоотдачи при кипении жидких металлов в ТВС оказались не-



сколько выше, чем при кипении жидких металлов в трубах и большом объеме. В первом приближении для оценки коэффициентов теплоотдачи при кипении натрия в ТВС можно использовать зависимость (2), предложенную для кипения жидких металлов в большом объеме [15, 16].

### Литература

1. Багдасаров Ю.Е., Кузнецов И.А. Расчетные исследования нестационарных и аварийных режимов работы и их роль в обеспечении безопасности // Атомная энергия. – 1982. – Т. 52. – Вып. 1. – С. 3-10.
2. Волков А.В., Кузнецов И.А. Усовершенствованная модель кипения натрия для анализа аварий в быстром реакторе // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – №2. – С. 101-111.
3. Ашурко Ю.М., Андреева К.А., Бурьевский И.В. и др. Исследование влияния натриевого пустотного эффекта реактивности на безопасность быстрого натриевого реактора большой мощности // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – №3. – С. 5-13.
4. Haga K. Loss of flow experiment in a 37 pin bundle LMRBR Fuel assembly // Nuclear Engineering and Design. 1984. Vol. 82. – PP. 305-318.
5. Yamaguchi K. Flow pattern and dryout under sodium boiling conditions at decay power levels // Nuclear Engineering and Design. 1987. Vol. 99. N 3. – PP. 247-263.
6. Huber F., Kaiser A., Mattes K. and Peppler W. Steady State and Transient sodium boiling experiments in a 37 pin bundle // Nuclear Engineering and Design. 1987. Vol. 100. – PP. 377-386.
7. Gnatt P.A., Carbajo J.J., Dearing J.F. Sodium boiling experiments in the THORS Facility // Nuclear Engineering and Design. 1984. V. 82. – P. 241-280.
8. Seiler J.M. Studies on sodium boiling phenomena in out-of-pile rod bundles for various accidental situation in LMFBR: experiments and interpretations // Nuclear Engineering and Design. 1986. Vol. 82. – PP. 227-239.
9. Сорокин А.П., Ефанов А.Д., Иванов Е.Ф. и др. Теплообмен при кипении жидкого металла в режиме аварийного расхолаживания быстрого реактора // Атомная энергия. 1999. – Т. 87. – Вып. 5 – С. 337-342.
10. Сорокин А.П., Ефанов А.Д., Иванов Е.Ф. и др. Расчетно-экспериментальные исследования условий устойчивого теплообмена при возникновении кипения жидкого металла в режиме аварийного расхолаживания быстрого реактора // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1999. – № 2. – С. 59-70.
11. Ефанов А.Д., Сорокин А.П., Иванов Е.Ф. и др. Исследования теплообмена и устойчивости кипения жидкометаллического теплоносителя в контуре естественной циркуляции // Теплоэнергетика. – 2003. – №3. – С. 20-26.
12. Сорокин Г.А., Ниноката Х., Эндо Х. и др. Экспериментальное и расчетное моделирование теплообмена при кипении жидкого металла в системе параллельных тепловыделяющих сборок в режиме естественной конвекции // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2005. – №4. – С. 92-106.
13. Ефанов А.Д., Сорокин А.П., Иванов Е.Ф. и др. Теплообмен при кипении жидкого металла в системе каналов в режиме естественной циркуляции // Теплоэнергетика. – 2007. – №3. – С. 43-51.
14. Хафизов Р.Р., Ашурко Ю.М., Волков А.В. и др. Подготовка экспериментального стенда АР-1 и экспериментальной модели к проведению исследований кипения натрия в модели ТВС в обоснование безопасности быстрого реактора нового поколения // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – №1. – С. 77-87.
15. Зейгарник Ю.А., Литвинов В.Д. Кипение щелочных металлов в каналах. М.: Наука, 1983.
16. Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федынский О.С. Жидкометаллические теплоносители. – М.: Атомиздат, 1976.

Поступила в редакцию 24.04.2015 г.

**Авторы**

Хафизов Руслан Рашитович, инженер-исследователь

E-mail: rhafizov@ippe.ru

Поплавский Владимир Михайлович, зам. генерального директора, доктор техн. наук, профессор

E-mail: vmpropl@ippe.ru

Рачков Валерий Иванович, научный руководитель, доктор техн. наук, профессор, член-корр. РАН,

E-mail: vrachkov@ippe.ru

Сорокин Александр Павлович, заместитель директора, доктор техн. наук

E-mail: sorokin@ippe.ru

Труфанов Александр Анатольевич, первый заместитель директора,

E-mail: privezentsev@ippe.ru

Ашурко Юрий Михайлович, начальник лаборатории, канд. техн. наук

E-mail: ashurko@ippe.ru

Волков Андрей Викентьевич, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук

E-mail: volkov@ippe.ru

Иванов Евгений Федорович, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук

Привезенцев Виталий Владимирович, начальник лаборатории, канд. техн. наук

E-mail: privezentsev@ippe.ru

UDC 621.039.526.034+621.039.546.8:536.26

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SODIUM BOILING HEAT EXCHANGE IN FUEL SUBASSEMBLY MOCKUP FOR PERSPECTIVE FAST REACTOR SAFETY JUSTIFICATION**

Khafizov R.R., Poplavsky V.M., Rachkov V.I., Sorokin A.P., Ashurko Yu.M., Volkov A.V., Ivanov E.F., Privezentsev V.V.

JSC «SSC RF-IPPE» n.a. A.I. Leypunsky

Bondarenko sq., 1, Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

**ABSTRACT**

ULOF accident calculations for sodium fast reactor, carried out using COREMELT code, indicate sodium boiling in the core. The process is accompanied with reactor technological parameters oscillations over a period of several tens of seconds. In this case, it is possible the implementation of sustainable decay heat removal. Since the two-phase model implemented in the code has significant influence on calculations, the model need to be experimentally verified.

Obtained experimental data on coolant flow, pressure, sodium and cladding temperatures and oscillations of parameters for sodium boiling process in a fuel subassembly mockup under natural and forced coolant circulation with sodium plenum and upper axial blanket model.

The results showed possibility of long residual heat removal by means of boiling sodium in case of sodium plenum presence in the experimental model under pins heat fluxes up to 140 kW/m<sup>2</sup> in natural circulation conditions and up to 170 kW/m<sup>2</sup> in forced circulation.

**Key words:** fast reactor, liquid metal coolant, sodium, boiling, two-phase flow, fuel subassembly mockup, experimental investigation, sodium void reactivity effect.

## REFERENCES

1. Bagdasarov Yu.E., Kuznetsov I.A. Nonsteady and emergency conditions of fast-reactor operation and their role in safety. *Atomic Energy*. 1982, v. 52, no. 1, pp. 3-10.
2. Volkov A.V., Kuznetsov I.A. Uovershenstvovannaja model' kipenija natrija dlja analiza avarij v bystrom reaktore [The advanced sodium boiling model for the analysis of accidents within fast reactors]. *Izvestia vuzov. Yadernaya energetika*. 2006, v. 2, pp. 101-111 (in Russian).
3. Ashurko Yu.M., Andreeva K.A., Bur'evsky I.V., Volkov A.V., Egorov A.V., Kuznetsov I.A., Korobeynikova L.V., Matveev V.I., Solomonova N.V., Khomyakov Yu.S., Tsarapkina A.N. Issledovanie vlijaniya natrievogo pustotnogo jeffekta reaktivnosti na bezopasnost' bystrogo natrievogo reaktora bol'shoj moshhnosti [Investigation of the SVRE influence on the safety of large size sodium fast reactor]. *Izvestia vuzov. Yadernaya energetika*. 2014, v. 3, pp. 5-13 (in Russian).
4. Haga K. Loss of flow experiment in a 37 pin bundle LMRBR Fuel assembly. *Nuclear Engineering and Design*. 1984, v. 82, pp. 305-318.
5. Yamaguchi K. Flow pattern and dryout under sodium boiling conditions at decay power levels. *Nuclear Engineering and Design*. 1987, v. 99, no. 3, pp. 247-263.
6. Huber F., Kaiser A., Mattes K. and Peppler W. Steady state and transient sodium boiling experiments in a 37 pin bundle. *Nuclear Engineering and Design*. 1987, v. 100, pp. 377-386.
7. Gnatt P.A., Carbajo J.J., Dearing J.F. Sodium boiling experiments in the THORS Facility. *Nuclear Engineering and Design*. 1984, v. 82, pp. 241-280.
8. Seiler J.M. Studies on sodium boiling phenomena in out-of-pile rod bundles for various accidental situations in LMFBR: experiments and interpretations. *Nuclear Engineering and Design*. 1986, v. 82, pp. 227-239.
9. Efanov A.D., Sorokin A.P., Ivanov E.F., Bogoslovskaya G.P., Kolesnik V.P., Martsinyuk S.S., Mal'kov V.L., Sorokin G.A., Rymkevich K.S. An investigation of the heat transfer and stability of liquid-metal coolant boiling in a natural circulation circuit. *Atomic Energy*. 1999, v. 87, iss. 5, pp. 337-342 (in Russian).
10. Sorokin A.P., Efanov A.D., Ivanov E.F., Martsiniouk D.Ye., Bogoslovskaya G.P., Rymkevich K.S., Mal'kov V.L.. Raschyotno-eksperimental'nye issledovaniya uslovij ustojchivogo teploobmena pri vozniknovenii kipenija zhidkogo metalla v rezhime avarijnogo rasholazhivaniya bystrogo reaktora. [Numerical and experimental investigations of stable heat-exchange conditions with liquid metal boiling under fast reactor accident heat removal regime]. *Izvestia vuzov. Yadernaya energetika*. 1999, no. 2, pp. 59-70 (in Russian).
11. Efanov A.D., Sorokin A.P., Ivanov E.F., Bogoslovskaya G.P., Kolesnik V.P., Martsinyuk S.S., Mal'kov V.L., 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, no. 3, pp. 20-26.
12. Sorokin G.A., Ninokata X., Endo X., Efanov A.D., Sorokin A.P., Ivanov E.F., Bogoslovskaya G.P., Ivanov V.V., Volkov A.D., Zueva I.R. Eksperimental'noe i raschetnoe modelirovanie teploobmena pri kipenii zhidkogo metalla v sisteme parallel'nyh teplovydeljajushhih sborok v rezhime estestvennoj konvekcii [Experimental and numerical modeling of liquid metal boiling heat transfer in a system of parallel fuel subassemblies under conditions of natural convection]. *Izvestia vuzov. Yadernaya energetika*. 2005, no. 4, pp. 92-106 (in Russian).
13. Efanov A.D., Sorokin A.P., Ivanov E.F., Bogoslovskaya G.P., Ivanov V.V., Volkov A.D., Sorokin G.A., Zueva I.R. Heat transfer under natural convection of liquid metal during its boiling in a system of channels. *Thermal engineering*. 2007, no. 3, pp. 43-51.
14. Khafizov R.R., Ashurko J.M., Volkov A.V., Ivanov E.F., Privezentsev V.V., Sorokin A.P., Kumskey V.V. Podgotovka jeksperimental'nogo stenda AR-1 i jeksperimental'noj modeli k provedeniju issledovaniy kipenija natrija v modeli TVS v obosnovanie bezopasnosti bystrogo reaktora novogo pokolenija [AR-1 experimental model and facility preparation for the purpose of experimental investigation of sodium boiling in fuel subassembly mockup for new generation fast reactor safety justification]. *Izvestia vuzov. Yadernaya energetika*. 2014,

no. 1, pp. 77-87. (in Russian)

15. Zeigarnik Yu.A. Litvinov V.D. Kipenie shhelochnyh metallov v kanalah [Alkali metal boiling in channels]. Moscow. Nauka Publ., 1983. (in Russian)

16. Borishanskij V.M., Kutateladze S.S., Novikov I.I., Fedynskij O.S. Zhidkometallicheskie teplonositeli [Liquid metal coolants]. Moscow. Atomizdat Publ., 1976 (in Russian).

#### Authors

Khafizov Ruslan Rashitovich, Research Engineer

Tel.: (484) 399-54-03, e-mail: rhafizov@ippe.ru

Poplavsky Vladimir Mikhaylovich, Deputy General Director, Dr. Sci. (Engineering), Professor

Tel.: (484) 399-87-92, e-mail: vmpopl@ippe.ru

Rachkov Valery Ivanovich, Research Supervisor, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Science

Tel.: (484) 399-81-14, e-mail: vrachkov@ippe.ru

Sorokin Aleksandr Pavlovich, Deputy Director, Dr. Sci. (Engineering)

Tel.: (484) 399-84-47, e-mail: sorokin@ippe.ru

Ashurko Yuriy Mikhaylovich, Head of Laboratory, Cand. Sci. (Engineering)

Tel.: (484) 399-50-53, e-mail: ashurko@ippe.ru

Volkov Andrey Vikent'evich, Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

Tel.: (484) 399-48-29, e-mail: volkov@ippe.ru

Ivanov Evgeny Fyodorovich, Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

Tel.: (484) 399-84-67

Privezentsev Vitaliy Vladimirovich, Head of Laboratory, Cand. Sci. (Engineering)

Tel.: (484) 399-56-57, e-mail: privezentsev@ippe.ru