

## УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МОДЕЛЬ КИПЕНИЯ НАТРИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА АВАРИЙ В БЫСТРОМ РЕАКТОРЕ

**А.В. Волков, И.А. Кузнецов**

*ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



Излагается методика расчета нестационарных процессов кипения натрия на основе двухкомпонентной термически неравновесной модели. Решается полная система уравнений двухфазного потока, включающая в себя шесть уравнений сохранения для двумерной расчетной области. Предлагаемая методика реализована в вычислительной программе TWOSB. Работоспособность программы продемонстрирована сравнением расчетных результатов с экспериментальными. Вычислительная программа предназначена для решения прикладных задач, связанных с анализом проектных и запроектных аварий в быстрых реакторах, охлаждаемых натрием.

### ВВЕДЕНИЕ

Необходимость расчетного анализа нестационарных процессов кипения натрия в активной зоне реактора возникает, прежде всего, при обосновании его безопасности, при разработке систем контроля и управления, предназначенных для обнаружения аварийного вскипания натрия в тепловыделяющих сборках и формирования сигнала аварийной защиты. В составе технического обоснования безопасности современных быстрых реакторов рассматриваются проектные и запроектные аварии, сопровождающиеся кипением натрия. В их числе проектные аварии, обусловленные различными блокировками проходного сечения ТВС активной зоны, запроектные аварии, сопровождающиеся нарушениями энергоснабжения главных циркуляционных насосов и одновременными отказами поглощающих стержней аварийной защиты, попаданием замедляющих веществ в активную зону и др. В современном обосновании безопасности предъявляются все более высокие требования к точности расчетного анализа аварийных процессов, к надежности и достоверности получаемых результатов. Это связано, с одной стороны, со стремлением обоснованно снизить консерватизм расчетных оценок, т.к. ориентация на слишком консервативные расчеты ведет к завышению капитальных затрат. С другой стороны, расчетная точность необходима для уверенного определения границ самозащищенности реактора в условиях вскипания натрия в его активной зоне. Самозащищенность в таких условиях вполне возможна, поскольку вскипание натрия в активной зоне реактора не ведет к ее немедленному разрушению, если кипение и частичное удаление натрия из тепловыделяющих сборок сопровождается отрицательными эффектами реактивности и снижением мощности энерговыделения в реакторе. Для расчета двухфазных теплогидравлических процессов в активной зоне при аварийном кипении натрия длительное время использовались гомогенные модели со скольжением паровой фазы отно-

сительно жидкой. На такой модели, в частности, построены вычислительные программы GRIF-SM и BOS, разработанные в 90-х годах в ФЭИ и использовавшиеся авторами для расчета аварийных процессов в быстрых реакторах [1,2]. Но термически равновесные, гомогенные модели со скольжением фаз не могут с достаточной точностью описать все многообразие аварийных процессов [3]. Недостатки гомогенных моделей, описывающих кипения натрия, продемонстрированы в работе [4], в которой сравниваются расчетные обработки одного и того же эксперимента по двум версиям немецкой программы BACCHUS, в которой реализованы как гомогенная, так и негомогенная модели двухфазного потока натрия. Показано преимущество негомогенной модели с точки зрения достоверности получаемых результатов. С другой стороны, показаны некоторые трудности, связанные с неустойчивостью численных решений, характерные для негомогенных моделей. С аналогичными проблемами авторы столкнулись при разработке программы TWOCB (**TWO Component Boiling**). В основе программы двухкомпонентная, термически неравновесная модель двухфазного потока натрия. В итоге в программе TWOCB удалось реализовать численный алгоритм решения уравнений теплогидравлики двухфазного потока, который позволил получать устойчивые решения практически в широком диапазоне режимов кипения натрия в быстром реакторе. Программа разрабатывалась для персонального компьютера, поэтому ее отличает простота карты режимов, в ней применяется упрощенный подход при построении системы замыкающих соотношений математической модели. На результатах обработки ряда экспериментов показано хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В основу математической модели программы TWOCB положена система дифференциальных уравнений, которая состоит из шести базисных уравнений сохранения массы, импульса и энергии для двух компонент – жидкости и пара, сформулированная в рамках модели пористого тела. Базисная система уравнений сохранения решается для двумерной интегральной расчетной области в цилиндрической системе координат.

Уравнения сохранения массы:

$$\frac{\partial(\varphi_j \rho_j)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi_j \rho_j \mathbf{u}_j) = \Gamma_j. \quad (1)$$

Уравнения сохранения импульса:

$$\frac{\partial(\varphi_j \rho_j \mathbf{u}_j)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi_j \rho_j \mathbf{u}_j \mathbf{u}_j) = -\varphi_j \nabla p + \varphi_j \rho_j \mathbf{g} - F_{wj} - F_{ij} - F_{\Gamma j}. \quad (2)$$

Уравнения сохранения энергии:

$$\frac{\partial(\varphi_j \rho_j e_j)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi_j \rho_j e_j \mathbf{u}_j) = -p \left[ \frac{\partial \varphi_j}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi_j \mathbf{u}_j) \right] + Q_{wj} + Q_{kj} + Q_{ij}. \quad (3)$$

Условия сохранения массы, импульса и энергии на границе раздела фаз:

$$\sum_j \Gamma_j = 0, \quad \sum_j F_{ij} = 0, \quad \sum_j Q_{ij} = 0. \quad (4)$$

Здесь  $\varphi$  – объемное содержание фазы  $j$ ,  $\rho$  – плотность,  $t$  – время,  $\mathbf{u}$  – вектор скорости,  $\Gamma$  – интенсивность изменения массы фазы в единице объема,  $p$  – давление,  $F_{wj}$  – трение фазы на стенке канала,  $F_{ij}$  – межфазное трение,  $e$  – энтальпия,  $Q_{wj}$  – тепловой поток от стенки канала к фазе;  $Q_{ij}$  – межфазный тепловой поток,  $Q_{kj}$  – тепловой поток за счет теплопроводности.

Соотношения для потока энергии через межфазную поверхность  $Q_{if}$ ,  $Q_{ig}$  записываются в виде

$$Q_{if} = q_{if} - \Gamma_f \cdot e_{fs}, \quad (5)$$

$$Q_{ig} = q_{ig} - \Gamma_g \cdot e_{gs}, \quad (6)$$

где  $e_{fs}$ ,  $e_{gs}$  – энтальпия жидкости и пара на линии насыщения;  $q_{if}$  и  $q_{ig}$  – плотность теплового потока на межфазной поверхности к жидкости и пару.

Интенсивность фазового перехода следует из соотношения

$$\Gamma_{fg} = -\frac{q_{if} + q_{ig}}{h}, \quad (7)$$

где  $h$  – скрытая теплота фазового перехода.

### КАРТА РЕЖИМОВ КИПЕНИЯ НАТРИЯ

Для расчетного моделирования кипения натрия в быстром реакторе необходима карта режимов, которая бы описывала двухфазный поток натрия как в достаточно затесненных пучках твэлов, так и в больших объемах, например, в верхней камере реактора. В этой связи в программе используются две карты режимов: для пучков твэлов (вертикальных труб) и для больших объемов. Что касается кипения натрия в пучках твэлов, то к настоящему времени выполнено достаточно много экспериментов в имитаторах тепловыделяющих сборок быстрого реактора [5, 6, 7, 8] или в трубах с эквивалентным гидравлическим диаметром [9, 10]. На основе этих и других экспериментальных материалов подбор эмпирических соотношений осуществлялся таким образом, чтобы с учетом принятых допущений получить наиболее достоверные расчетные результаты. Так анализ экспериментов по стационарному кипению натрия в трубах в работе [9] показал, что преобладающими в условиях кипения натрия в каналах при вынужденной конвекции являются снарядный, кольцевой и дисперсно-кольцевой режимы. В стационарных экспериментах длительного кипения натрия в пузырьковом режиме практически не наблюдалось, поскольку образующиеся пузыри пара постепенно увеличивались в размерах и пузырьковый режим переходил в снарядный. Образующийся снаряд или большой пузырь вносил возмущение в поток натрия, происходил скачок давления, отчего двухфазный поток ускорялся, и количество пара вновь уменьшалось. Возникающие при этом достаточно заметные пульсации расхода объяснялись неустойчивой природой кипения натрия. С другой стороны, очевидно, что в переходных процессах пузырьковый режим играет важную роль, особенно на начальной стадии вскипания натрия.

В программе TWOCB представлены три основных режима: пузырьковый ( $\phi < 0.3$ ), кольцевой ( $0.6 \leq \phi \leq 0.9$ ) и дисперсный ( $\phi > 0.98$ ). Такой подход соответствует традиционным картам режимов кипения натрия [11]. Вследствие неточного знания границ между режимами введены два переходных режима: от пузырькового к кольцевому ( $0.3 \leq \phi < 0.6$ ) и от кольцевого к дисперсному ( $0.9 < \phi \leq 0.98$ ).

Экспериментов по кипению натрия при свободной конвекции в больших объемах значительно меньше. Практически отсутствует информация о размерах всплывающих пузырей в большом объеме натрия, например, при выходе пара из твэльного пучка в верхнюю смесительную камеру реактора. В этом случае пузыри пара попадают в область недогретой жидкости, что приводит к их интенсивному «схлопыванию». При «схлопывании» пузырей импульсы давления распространяются в виде волн по контуру циркуляции и влияют на расход теплоносителя. Для описания пузырькового режима в большом объеме задается величина максимально возможного диаметра парового пузыря. В зависимости от паросодержания диаметр пузыря пересчитывается, соответственно можно вычислить количество пузырей в расчетной ячейке.

**ЗАМЫКАЮЩИЕ СООТНОШЕНИЯ**

Для замыкания базисной системы дифференциальных уравнений (1–3) математической модели двухфазного потока помимо уравнений состояния необходимы соотношения для определения величин межфазного механического и теплового взаимодействия фаз, взаимодействия двухфазного потока со стенками канала, теплообмена двухфазного потока со стенками канала. Скорость генерации паровой фазы определялась из соотношения (7), для чего необходимо вычислить теплоотдачу от межфазной поверхности к жидкости и пару.

Площадь межфазной поверхности, приходящейся на единицу объема потока  $A_i$ , определялась из достаточно простых соотношений [3]. Для пузырькового режима площадь межфазной поверхности равна

$$A_i = 3\varphi / r^b, \quad (8)$$

где  $r^b$  – радиус пузырька.

Для кольцевого режима течения, при котором вся жидкость сосредоточена в пристеночной пленке, площадь межфазной поверхности равна

$$A_i = 4\varphi \sqrt{D}. \quad (9)$$

После полного испарения пленки начинается дисперсный режим, т.е. вся жидкость распределена в паровой фазе в виде капелек. При этом площадь межфазной поверхности равна

$$A_i = 3(1-\varphi) / r^d, \quad (10)$$

где  $r^d$  – радиус капли жидкости.

Трение на межфазной поверхности представляется в виде

$$F_{if} = -F_{ig} = \xi_i \rho_c (w_g - w_f) |w_g - w_f| / 8. \quad (11)$$

Здесь  $\xi_i$  – коэффициент межфазного трения.

В области малых  $Re$  определяющую роль играет вязкое трение, поэтому коэффициент межфазного трения равен

$$\xi_i = 64 / Re_{gl} \quad Re_{gl} < 500. \quad (12)$$

В области больших  $Re$  основное влияние на процесс оказывают «гребни волн» на межфазной поверхности, что дает основание записать

$$\xi_i = \gamma \left[ 1 + 150(1 - \sqrt{\varphi}) \right], \quad Re_{gl} > 1500, \quad (13)$$

где  $\gamma$  – эмпирическая константа.

Здесь  $Re_{gl} = \frac{2r_e(w_g - w_f) \cdot \rho_g}{\mu_g}$ , а эквивалентный радиус равен  $r_e = \sqrt{\varphi} r$ .

Обмен теплом между фазой « $k$ » и межфазной поверхностью  $i$  в единице объема описывается следующим соотношением

$$q_{ki} = \alpha_{ki} (T_s - T_k) \cdot A_i, \quad k = f, g, \quad (14)$$

где  $\alpha_{ki}$  – коэффициент теплоотдачи со стороны « $k$ » фазы,  $T_k$  и  $T_s$  – температура фазы « $k$ » и насыщения.

Интенсивность межфазного теплообмена влияет на скорость генерации паровой фазы или, наоборот, на скорость конденсации пузырей пара. Например, как отмечалось в работе [13], схлопывание пузырей пара в области холодного натрия верхней смесительной камеры приводит к сильным пульсациям давления, которые вызывают колебания расхода в контуре циркуляции, что может спровоцировать кризис тепло-

обмена. В свою очередь, амплитуда пульсаций зависит от того, насколько далеко может проникнуть паровой пузырь в область недогретой жидкости, а это определяется размером пузыря и интенсивностью теплоотдачи на межфазной поверхности. В настоящее время имеется мало сведений о межфазном теплообмене для натрия. Поэтому распространена практика, когда величина коэффициента теплоотдачи  $\pm k_i$  подбирается путем достижения максимального подобия расчетных и экспериментальных данных, как это сделано, например, в работе [12].

Для расчета силы трения на стенках канала используются следующие допущения. Прежде всего, при описании силы трения до момента срыва пленки жидкости со стенки канала все режимы двухфазного потока сводятся к кольцевому режиму. Полагается, что в контакте со стенкой находится только жидкость. Соответственно число Рейнольдса эквивалентного потока определяется из соотношения

$$\text{Re}_f = \frac{(1-\varphi)D(w_f) \cdot \rho_f}{\mu_f}. \quad (15)$$

После срыва пленки все режимы двухфазного потока сводятся к дисперсному режиму. Согласно такому представлению в контакте со стенкой находятся обе фазы пропорционально их объемной концентрации. При этом  $\text{Re}$  для течений фаз определяется из соотношений

$$\text{Re}_f = \frac{D(w_f) \cdot \rho_f}{\mu_f}; \text{Re}_g = \frac{D(w_g) \cdot \rho_g}{\mu_g}. \quad (16)$$

Правильность этих допущений проверялась расчетной обработкой различных экспериментов. Наиболее показательны эксперименты по стационарному кипению натрия в трубах или кольцевых каналах [9], которые специально рекомендованы для проверки закона трения.

## ПРИМЕРЫ ТЕСТОВЫХ РАСЧЕТОВ

Для демонстрации работоспособности программы TWOCB ниже приведены результаты расчетной обработки нескольких экспериментов, выполненных в исследовательском центре FZK в Германии, которые моделируют различные аварии для быстрого реактора, сопровождающиеся кипением натрия. Представлена расчетная обработка нескольких экспериментов, которые имитируют такие аварии как ULOF, LOHS и аварию, вызванную полной блокировкой проходного сечения тепловыделяющей сборки в режиме аварийного охлаждения реактора. Следует отметить, что эксперимент L22 [6, 7] по нестационарному кипению натрия в сборке, имитирующий аварию ULOF, обрабатывался многими зарубежными кодами и был рекомендован международной рабочей группой (LMBWG) в качестве эталона для проверок двухфазных методик. Поэтому имеется возможность сравнить результаты расчета эксперимента, полученные с помощью вычислительных кодов, в основе которых положены различные математические модели двухфазного потока.

Характеристики 37-стержневого электрообогреваемого пучка и контура циркуляции подбирались максимально приближенными к условиям проекта реактора SNR-300. Схема экспериментальной установки, геометрические размеры и расположение датчиков для измерения температуры, расхода, давления показаны на рис. 1. Более подробно экспериментальная установка описана в [6].

Расчетная область, моделирующая теплогидравлические свойства стержневого пучка и всего контура экспериментальной установки, представлена на рис. 2, из которого видно – наиболее подробно описан имитатор ТВС 4х32 расчетными точками по радиусу и высоте соответственно. Более грубо описан контур циркуляции всей

установки 8x36. Такой подход используется в случаях, когда необходимо максимально подробно описать процессы, например, в активной зоне реактора, а за ее пределами контур циркуляции модулируется менее детальной расчетной сеткой.

При обработке эксперимента L22 наибольшее согласие с результатами измерений было достигнуто с использованием японского кода SABENA. Добиться такого же согласия с помощью кода TWOСВ не удалось, что объясняется отчасти тем, что у кодов, по сути, разное назначение. Код SABENA главным образом нацелен на максимально подробное описание двухфазного потока натрия внутри сборки. Для кода TWOСВ описание кипения натрия внутри сборки – это только часть задачи; не менее важно моделирование теплогидравлики двухфазного потока в рамках всего контура циркуляции. В основе кода SABENA похожая двухкомпонентная, термически неравновесная математическая модель [12], однако реализована она на трехмерной расчетной сетке с использованием поканальной методики. Очевидно, что с помощью более детальной расчетной сетки, моделирующей только ТВС, имеется возможность с большей точностью описывать процессы внутри самой сборки. Однако в коде SABENA подробной трехмерной расчетной сеткой охвачена только сборка, а описать с помощью такой сетки весь контур циркуляции невозможно. Внешний контур описан одномерным

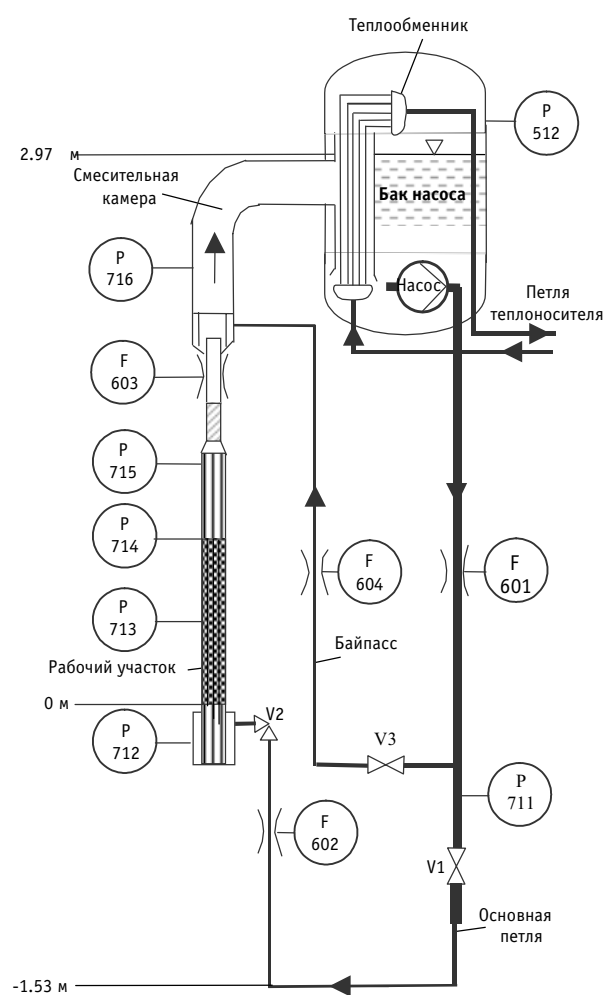


Рис. 1. Упрощенная схема экспериментальной петли KNS



Рис. 2. Расчетная область, моделирующая контур циркуляции экспериментальной петли KNS

контуром, который шит граничными условиями с основной сеткой. Процедура сшивки в работе [12] не описана, но очевидно, что если паровой пузырь достигнет границы трехмерной расчетной области, то моделирование его дальнейшего продвижения по одномерному контуру будет возможно уже с существенно меньшей точностью. И если при моделировании эксперимента L22 это не очень важно, поскольку сразу после возникновения кризиса теплообмена электрообогрев нагревательных элементов был отключен и границы кипения натрия не успели уйти за пределы сборки, то в других экспериментах, например, в эксперименте N25, имитирующем аварию LOHS, паровые пузыри уже всплывали вплоть до верхнего смесительного бака, т.е. за пределы подробной расчетной области. Поэтому при моделировании таких процессов имеет преимущества код TWOCB, т.к. его двумерная расчетная область позволяет охватить весь контур циркуляции.

При моделировании эксперимента L22 наиболее сложно было добиться точности прогнозирования момента наступления кризиса теплообмена. Небольшая ошибка в определении времени, соответствующему началу кризиса, приведет в расчете к существенной разнице температуры нагревательных элементов относительно экспериментальных данных. В данном эксперименте температура стержней в области кризиса теплообмена за 0.1 с увеличивается на  $\sim 50^\circ\text{C}$ . Поэтому погрешность в прогнозе начала кризиса всего на несколько десятых долей секунды приведет к существенной разнице расчетной и экспериментальной температур стержней. Наступление кризиса теплообмена означает срыв пленки жидкости с поверхности нагревательных элементов. В расчетной модели превышение паросодержания значения  $\phi_{\text{кр}}$  означает переход к дисперсному режиму, что фактически определяет наступление кризиса. В разных расчетных кодах используются разные описания перехода к дисперсному режиму, соответственно варьируется величина  $\phi_{\text{кр}}$ , например, в коде SABENA  $\phi_{\text{кр}}=0.999$ , в коде BACCUS  $\phi_{\text{кр}}=0.99$ , а в коде TWOCB  $\phi_{\text{кр}}=0.98$ .

С помощью той же экспериментальной установки моделировалось кипение натрия в условиях естественной циркуляции теплоносителя [8]. Энергонапряженность нагревательных элементов была такова (табл. 1), что соответствовала уровню остаточного энерговыделения быстрого реактора. Целью эксперимента N25 было определение максимальной мощности, при которой существует возможность охлаждения сборки кипящим натрием в условиях естественной циркуляции теплоносителя. Расход естественной циркуляции регулировался вентилем V1 (рис. 1), расположенным на входе в сборку. Для простоты эксперимента байпасная ветка контура перекрывалась вентилем V3. В ходе эксперимента гидравлическое сопротивление вентилей не менялось, а циркуляция в контуре на первой стадии подбиралась таким образом, чтобы при заданной мощности кипение натрия практически отсутствовало. Затем через определенные интервалы времени мощность поднималась, при этом возрастала генерация пара и соответственно увеличивался расход теплоносителя через сборку.

Уже на первой стадии эксперимента начиналось незначительное кипение натрия. После того как образовывался паровой пузырь в наиболее прогретой области модель-

Таблица 1

**Основные стадии эксперимента N25**

Стадия	Средняя линейная нагрузка, Вт/см	Скорость на входе в сборку, м/с
1	10.3	0.046
2	20.2	0.065
3	30.1	0.076
4	40.1	Неустойчивое кипение

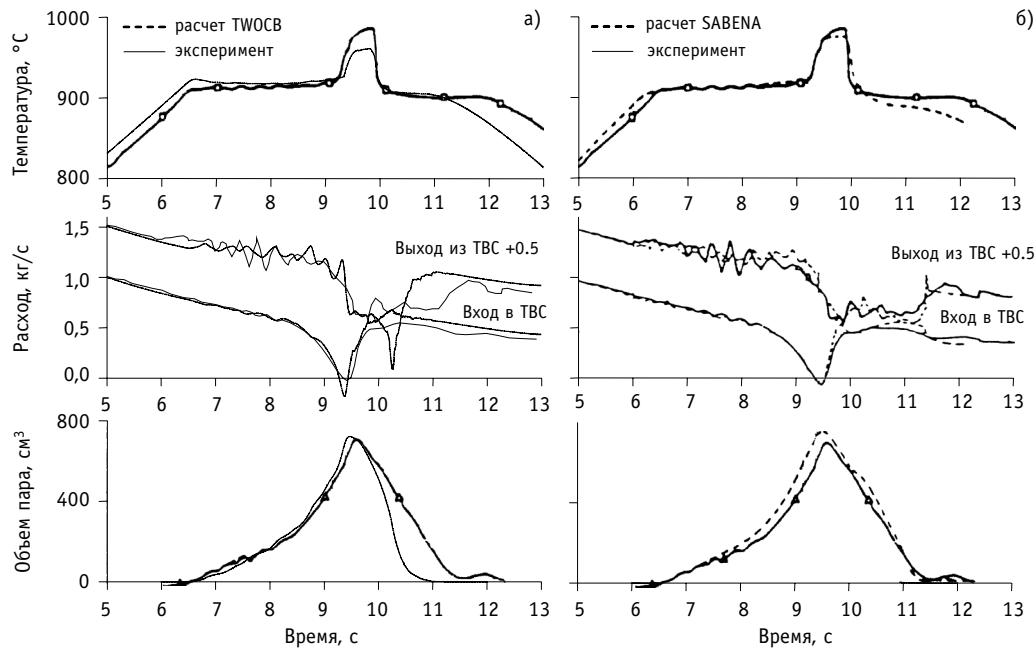


Рис. 3. Основные параметры нестационарного процесса в экспериментальной петле KNS (температура поверхности нагревателя, расход на входе и выходе сборки, суммарный объем пара)

ной сборки, расход через сборку резко возрос. Из-за большой разницы в плотности пара и жидкости пузырь выталкивало из зоны пучка стержней в смесительную камеру, где пар, контактируя с относительно холодным натрием, конденсировался. При конденсации пузыри схлопывались, образуя «шум» в показаниях измерительных приборов. Возникающие при этом колебания давления в жидкости передавались по контуру, достигая входа сборки и влияя на расход теплоносителя. Как видно на рис. 4, экспериментальная и расчетная амплитуды и частоты колебаний скорости теплоносителя на входе в сборку в целом согласуются с удовлетворительной точностью. На 4-ой стадии эксперимента объем генерируемых пузырей пара уже таков, что колебания расхода приводят к статической неустойчивости кипения. В результате снижение расхода натрия через модельную сборку приводит к ухудшению теплообмена на поверхности нагревательных элементов и вызывает рост их температуры. Таким образом, можно говорить о корректном моделировании в программе TWOCB всплывающих пузырей пара в свободном пространстве смесительной камеры, поскольку именно эти пузыри создают основной вклад в напор естественной циркуляции, определяя расход натрия в стержневом пучке.

У авторов нет сведений об обработке этого и двух последующих экспериментов с помощью других вычислительных кодов. Тем не менее, результаты экспериментов интересны, поскольку в них определяются границы безопасного теплоотвода для экспериментальной установки в условиях кипения натрия, которые могут быть перенесены на некоторую область анализа безопасности быстрых реакторов, для исследования которой разрабатывалась вычислительная программа TWOCB.

В экспериментах N22 и N23 моделировалась полная блокировка проходного сечения сборки путем перекрытия тракта циркуляции теплоносителя вентилем V1. При уровне мощности нагревательных элементов, определенном в эксперименте N22, имел место режим кипения натрия, при котором в течение продолжительного времени (десятки минут) тепло отводилось от нагревательных элементов без кризиса теплообмена (табл. 2). Поскольку мощность нагревательных элементов в эксперименте не-



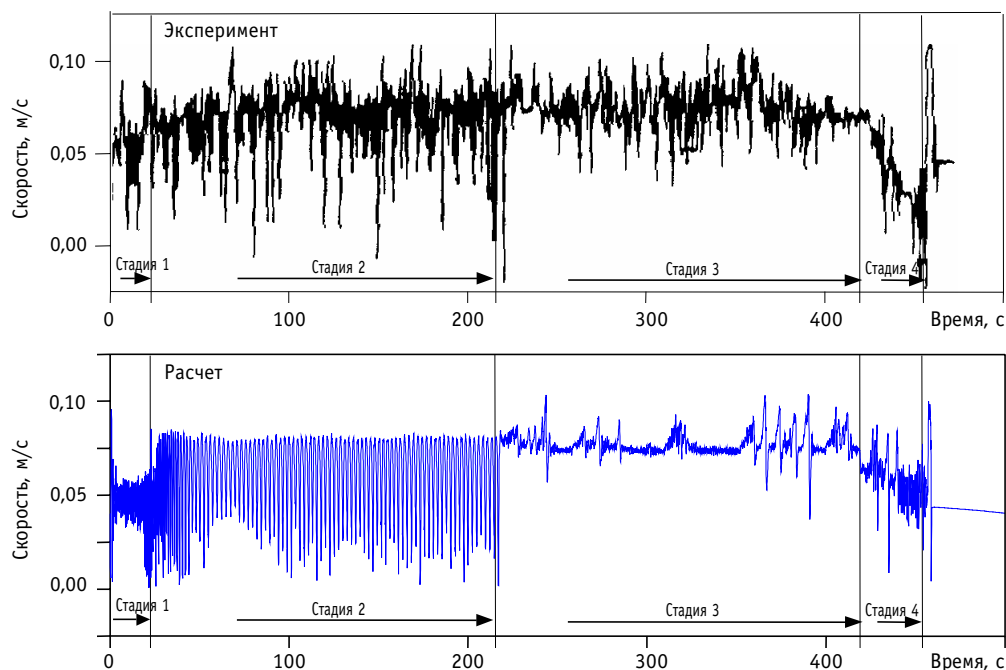


Рис. 4. Скорость натрия на входе в сборку (эксперимент N25)

велика, энергия от них в конечном счете рассеивалась с поверхности экспериментальной установки в окружающее пространство. Увеличение мощности нагревательных элементов в эксперименте N23 уже приводит к повышению температуры нагревательных элементов (рис. 5). Причем наблюдается постоянный рост объема пара, что указывает на возникновение условий кризиса теплообмена.

Следует сказать, что несмотря на кажущуюся простоту последних двух экспериментов, в них наблюдаются достаточно сложные процессы. Всплывающие паровые пузыри увлекает за собой жидкость из центральной части сборки, в то время как на периферии сборки жидкость опускается вниз, навстречу пару. Таким образом, при разомкнутой циркуляции теплоносителя в контуре, всплывающие пузыри образуют сложное вихревое течение жидкости, которое способствует перемешиванию холодных и горячих слоев жидкости по высоте канала, выравнивая тем самым температуру жидкости. Попытка описать эксперимент N22 с помощью программы GRIF-SM, в основе которой гомогенная модель двухфазного потока, не увенчалась успехом. Объясняется это, возможно, тем, что в рамках гомогенной модели невозможно описать встречное движение пара и жидкости. Поэтому невозможно смоделировать контур циркуляции внутри самой сборки, опускным участком которого является периферия сборки, а подъемным – центральная часть сборки.

Таблица 2

**Основные параметры и результаты экспериментов N22 и N23**

Номер эксперимента	Средняя линейная нагрузка, Вт/см	Мощность одного нагревательного элемента, Вт	Время до закипания, мин
N22	3	270	5 (нет кризиса теплообмена)
N23	4	360	3 (кризис теплообмена)

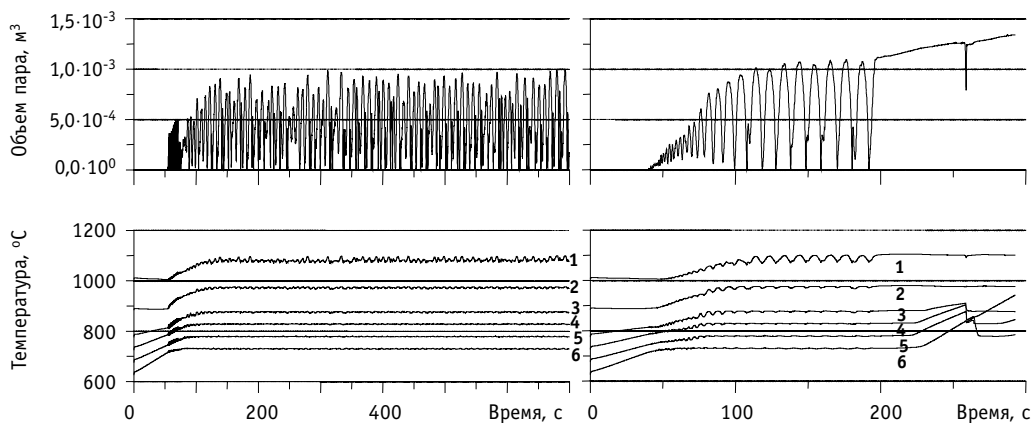


Рис. 5. Расчетные параметры нестационарного процесса в экспериментах N22 (а), N23 (б) (суммарный объем пара, температура поверхности нагревателей на разных высотах): 1 –  $T=100^{\circ}\text{C}$  ( $z = 1060$  мм); 2 –  $T = 820$  мм); 3 –  $T=50^{\circ}\text{C}$  ( $z = 770$  мм); 4 –  $T=100^{\circ}\text{C}$  ( $z = 670$  мм); 5 –  $T=150^{\circ}\text{C}$  ( $z = 620$  мм); 6 –  $T=200^{\circ}\text{C}$  ( $z = 450$  мм)

Следует отметить, что описанные выше эксперименты не отражают полный перечень тестов, которые были выполнены с помощью программы TWOCB. Однако эти эксперименты соответствуют тем наиболее важным задачам, для решения которых разрабатывалась программа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Расчет экспериментов с помощью вычислительной программы TWOCB показывает, что изложенная выше методика удовлетворительно описывает изменения во времени как интегральных величин (расходов, общего количества пара), так и динамику изменения локальных параметров (температуры в точках измерения, координат фронта кипения в каналах сборки).

2. Диапазон использования программы TWOCB для реакторов БН достаточно велик – от моделирования запроектных аварий типа ULOF, UTOP, LOHS и других аварий с кипением натрия, до проектной аварии с блокировкой проходного сечения ТВС. Важной задачей расчетных исследований является определение границ безопасного теплоотвода от реактора в условиях кипения натрия.

3. Использование в программе TWOCB более совершенной двухкомпонентной термически неравновесной математической модели по сравнению с разработанной ранее в программах GRIF-SM и BOS гомогенной термически равновесной моделью позволяет более достоверно описывать неустойчивую природу кипения натрия и точнее предсказывать кризис теплообмена на поверхности нагревательных элементов.

## Литература

1. Chvetsov I., Kouznetsov I., Volkov A. GRIF-SM-the Computer Code for Analysis of the Severe Beyond Design Basis Accidents in Sodium Cooled Reactors. – International Topical Meeting «Sodium Cooled Fast Reactor Safety» (October 3-7, 1994, Obninsk, Russia). – V. 2. – P. 83-101,
2. Волков А.В., Кузнецов И.А., Швецов Ю.Е. Расчет кипения натрия при аварии быстрого реактора с учетом распределенности параметров по сечению ТВС. – ФЭИ-2787. – Обнинск, 1999.
3. Кузнецов Ю.Н. Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. Bottoni M., Dorr B., Homann Ch., Struwe D. State of Development of the Computer Programme BACCHUS-3D/TP for the Description of Transient Two-Phase Flow condition in LMFBR Fuel Pin Bundles// Nuclear Engineering and Design. – 1987. – V. 100. – P. 321-349.
5. Haga K. Loss-of-Flow Experiment in a 37-pinundle LMFBR Fuel Assembly Simulator// Nuclear Engineering and Design. – 1983. – V. 82. – P. 305-318.

6. *Huber F., Kaiser A. et al.* Loss of flow simulation experiments with the KNS 37 pin bundle. – Proc. 10th Meeting of the Liquid Metal Boiling Working Group, 1982. Karlsruhe.
7. *Huber F., Kaiser A., Mattes K., Pepler W.* Steady State and Transient Sodium Boiling Experiments in a 37-pin-bundle//Nuclear Engineering and Design. – 1987. – V. 100. – P. 377-386.
8. *Kaiser A., Huber F.* Sodium Boiling Experiments at Low Power Under Natural Convection Conditions//Nuclear Engineering and Design. – 1987. – V. 100. – P. 367-376.
9. *Kottowski H.M. and Savatteri C.* Fundamentals of Liquid Metal Boiling Thermohdraulics//Nuclear Engineering and Design. – 1984. – V. 82. – P. 281-304.
10. *Qio S., Takahashi M., Jia D. and Su G.* Density Wave Instability of Sodium Boiling Two-phase Flow in a Vertical Annulus at Low Pressure//Journal of Nuclear Science and Technology. – 2003. – V. 40. – P. 493-500.
11. *Schor A.L., Kazimi M.S., Todreas N.E.* Advances in Two-Phase Flow Modeling For LMFBR Applications//Nuclear Engineering and Design. – 1982. – P. 127-155.
12. *Ninokata H., Okano T.* SABENA: subassembly boiling evolution numerical analysis//Nuclear Engineering and Design. – 1990. – V. 120. – P. 349-367.
13. *Kikuchi Y. and Haga K.* Sodium Boiling Experiments in a 19-pin Bundle under Loss-of-flow Conditions//Nuclear Engineering and Design. – 1981. – V. 66. – P. 357-366.

Поступила в редакцию 08.08.2005

In the article the procedure of the investigation of the point model of xenon fluctuations taking into account power reactivity coefficient is presented. The dimensionless equations of the decay of xenon and iodine are built. It turned out that the qualitative behavior of system in the utilized approximation is determined by two dimensionless criteria. On the coordinate plane, given to this criteria, built the regions of the qualitatively different behavior of model. Formulas for the position of equilibriums of system and natural vibration frequencies are obtained.

**УДК 621.039.516.4**

*Comparative Analysis of Methods and Tools for Open and Closed Fuel Cycles Modelling: MESSAGE and DESAE* \ A.A. Andrianov, Yu.A. Korovin, V.M. Murogov, E.V. Fedorova, G.A. Fesenko; – Obninsk, 2006. – 8 pages, 8 illustrations, 1 table. – References, 7 titles.

Comparative analysis of optimization and simulation methods by the example of MESSAGE and DESAE programs was carried out for nuclear prospects and advanced fuel cycles modeling. Test calculations for open and two-component nuclear system closed fuel cycle were performed. Auxiliary simulation-dynamic model was developed to specify MESSAGE and DESAE modeling approaches difference. The model description is given.

**УДК 621.039.516.4**

*Optimization of Transition to Two-Componental Nuclear Power by Plutonium Proliferation Risk Exposure Minimization Criterion* \ A.A. Andrianov, G.A. Fesenko; – Obninsk, 2006. – 9 pages, 8 illustrations, 1 table. – References, 13 titles.

The structure of global nuclear power on the phase of transition from present unicomponent nuclear power with the collected plutonium in different forms up to the established development of two-component nuclear power with fast reactors and lack of plutonium in an external fuel cycle by criterion of minimization of potential plutonium proliferation risk is optimized. The cumulative proliferation risk exposure for various scenarios of global nuclear power development is calculated.

**УДК 621.039.586: 621.039.526**

*Failure of Fuel Element Cladding of Fast Reactor Causing Release of Gas Fission Products into Sodium Coolant* \ A.V. Volkov, I.A. Kuznetsov; – Obninsk, 2006. – 11 pages, 6 illustrations, 1 table. – References, 6 titles.

The computer code TWOCOM simulating the fission gas jet from pin failure in subassembly of fast reactor are described. The mathematical model of the computer code in which basis a fully system of conservation equations two component flow for liquid sodium and gas is put is briefly stated. Test calculations of steady and transient experiments on studying gas release into sodium circulation loop are resulted. Some results of the parametric study due to pin failure and gas release for subassembly of BN-600 reactor are resulted.

**УДК 621.039.586: 621.039.526**

*The Advanced Sodium Boiling Model for the Analysis of Accidents within Fast Reactors* \ A.V. Volkov, I.A. Kuznetsov; – Obninsk, 2006. – 11 pages, 5 illustrations, 2 table. – References, 13 titles.

Method of calculation for transient conditions of sodium boiling used two-component non-equilibrium model. For this purpose is solved a fully model of two-phase flow using six conservation equations for 2D integral calculation domain. Proposed method has been designed calculation code called TWOCB. Reliability of code has been verified on calculation tests. Code is proposed for solving applied tasks of the analysis of design and beyond design accidents in sodium cooled reactors.