

ВЕРИФИКАЦИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОДА ЕВКЛИД/V2 НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, УЧИТЫВАЮЩИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПО СЕЧЕНИЮ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ

© 2021 г. А. А. Бутов^а, И. А. Климонов^а, И. Г. Кудашов^а, В. И. Чухно^а, Т. В. Сычева^а,
Э. В. Усов^{а, *}, Н. А. Мосунова^б, В. Ф. Стрижов^б

^аНовосибирский филиал ИБРАЭ РАН, просп. Академика Лаврентьева, д. 1, г. Новосибирск, 630090 Россия

^бИнститут проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
Большая Тульская ул., д. 52, Москва, 115191 Россия

*e-mail: usovev@gmail.com

Поступила в редакцию 21.12.2020 г.

После доработки 29.01.2021 г.

Принята к публикации 17.02.2021 г.

Для анализа процессов, происходящих во время тяжелых аварий в реакторных установках с натриевым охлаждением и диоксидным топливом, разработана вторая версия интегрального кода ЕВКЛИД/V – ЕВКЛИД/V2. В рамках верификации этой версии с использованием трехмерного теплогидравлического модуля выполнено моделирование и проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными на экспериментальных установках в Германии и Франции, по имитации аварий с частичной и полной блокировкой проходного сечения (первый тип), а также с потерей расхода теплоносителя (второй тип). Эксперименты по имитации аварии с частичной блокировкой проходного сечения в 169-стержневой сборке (KNS 169) и имитации аварии с полной блокировкой проходного сечения в 37-стержневой сборке (SCARABEE-N BE+3) соответствуют первому типу аварий, эксперименты по имитации аварии типа ULOF в 37-стержневой сборке (KNS 37) – второму типу аварий. На основе расчетов, проведенных с учетом имеющихся экспериментальных данных, оценена корректность моделирования с использованием трехмерного теплогидравлического модуля интегрального кода ЕВКЛИД/V2, а также определена погрешность расчета температуры теплоносителя и оболочки твэлов представленного кода.

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах (быстрый реактор), активная зона, жидкий металл, ЕВКЛИД/V2, моделирование, верификация, пространственные эффекты, натрий, кипение, неопределенность исходных данных

DOI: 10.1134/S0040363621090010

Расчет аварийных процессов, происходящих в реакторной установке, – сложная и трудоемкая задача, требующая постоянного развития методов и подходов. Одним из направлений развития расчетных методов является повышение точности расчета и детальности используемых моделей для учета большего числа факторов, которые оказывают влияние на результаты моделирования. Развитие расчетных методик в указанном направлении становится возможным благодаря росту производительности современных ЭВМ и совершенствованию современных программных пакетов для математического моделирования физических процессов.

Для анализа тяжелых аварий в реакторах с жидкометаллическим охлаждением разрабатыва-

ется и верифицируется интегральный код нового поколения ЕВКЛИД/V2. Учет пространственных эффектов при моделировании явлений, которые сопровождают аварии с разрушением активной зоны, проводился путем интеграции трехмерной модели движения и теплообмена теплоносителя и расплава в активную зону [1, 2]. Чтобы убедиться в адекватности созданной модели, нужно выполнить ее верификацию. Для этого должна быть разработана матрица верификации, осуществлено моделирование задач с известным аналитическим решением и проведено сравнение результатов расчета с данными, полученными в экспериментальных исследованиях, в которых изучались отдельные явления, которые сопровождают разрушение активной зоны:

течение и теплообмен теплоносителя в тепло-выделяющей сборке (ТВС) при кипении теплоносителя и без него с учетом градиента температуры вдоль сборки;

кипение и конденсация паров и эволюция области, занятой паром;

пульсации давления при кипении и конденсации;

плавление твэлов и движение расплава внутри ТВС.

Среди экспериментов по анализу аварийных процессов в реакторах с натриевым теплоносителем наиболее известными являются эксперименты, проведенные в Германии в Ядерном исследовательском центре в Карлсруэ и во Франции (IRSN) в Кадараше. Эксперименты охватывают широкий класс явлений, связанных с блокировкой проходного сечения, прекращением циркуляции теплоносителя, перегревом теплоносителя, его закипанием, наступлением кризиса теплообмена и плавлением конструкционных материалов. Верификация таких известных кодов для описания тяжелых аварий, как SIMMER-III/IV [3], COREMELT [4], и теплогидравлического кода TRACE [5] проводилась с использованием результатов этих экспериментов.

Для валидации интегрального кода ЕВКЛИД/V2 были выбраны эксперименты по блокировке проходного сечения в 169-стержневой сборке (Германия) [6], по имитации аварии типа ULOF (авария с прекращением циркуляции теплоносителя при отсутствии срабатывания систем защиты) в 37-стержневой сборке (Германия) [7] и по разрушению ТВС SCARABEE (Франция) [8, 9]. При сравнении результатов расчетов с экспериментальными данными теплообмен излучением между твэлами не учитывался.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ, ТВЭЛЕ И ЧЕХЛЕ ТВС В ИНТЕГРАЛЬНОМ КОДЕ ЕВКЛИД/V2

Основные подходы к расчету процессов, происходящих в реакторной установке во время аварии, с помощью интегрального универсального кода ЕВКЛИД/V2 представлены в работе [10]. Базовые модели для расчета плавления твэла и движения расплава по его поверхности приведены в [11, 12]. Для расчета плавления и затвердевания материалов в твэле и на чехле ТВС решается уравнение теплопроводности в энтальпийной формулировке. Движение расплава по поверхности твэла и внутри него моделируется на основе решения системы уравнений сохране-

ния массы, энергии и импульса. Учитываются трение и теплообмен расплава с поверхностью твэла и теплоносителем. Рассматриваются три режима стекания расплава: сплошное, пленочное и ручейковое.

Первый режим реализуется при движении расплава оксидного топлива по центральному отверстию и может происходить при аварии типа УТОР (авария с резким ростом мощности вследствие извлечения стержней из активной зоны при отсутствии срабатывания систем защиты). Второй и третий режимы соответствуют движению расплава оболочки или топлива по поверхности твэла и могут реализоваться при аварии типа ULOF. Каждый из режимов, в свою очередь, разбивался еще на два режима течения: ламинарный и турбулентный. Для повышения точности и детализации расчетов активно развиваются подходы, при которых учитываются пространственные эффекты. Описание таких подходов представлено в [1, 2].

Пространственная модель реализована для расчета движения расплава и теплоносителя в стержневом затесненном канале и в канале обычной формы типа “круглая труба”, поэтому уравнения модели записаны в цилиндрической системе координат, что, в частности, позволяет упростить учет геометрических размеров и параметров конкретной ТВС (количество стержней, шаг решетки, диаметр стержней и т.п.). В стержневом канале для каждого радиального слоя проводится усреднение параметров по сечению. Для этого рассчитываются площади перекрытия стержнями площади проходного сечения для каждого из направлений (аксиального, радиального и углового). На рис. 1 серым цветом показаны площади перекрытия в аксиальном направлении для центрального кольцевого слоя между радиусами R_1 и R_2 . После того как рассчитана полная площадь перекрытия, площадь каждой грани в аксиальном направлении вычисляется по формуле

$$S_z = \frac{S_{ring} - S_{overlap}}{N_\theta},$$

где S_{ring} — площадь поверхности кольца; $S_{overlap}$ — полная площадь перекрытия кольца стержнями; N_θ — количество ячеек по углу.

Подобным же образом проводится вычисление площадей и смоченных периметров для каждого направления. Далее для каждого слоя и направления рассчитывается соответствующий гидравлический диаметр. Все полученные пара-

метры используются для расчета соответствующих коэффициентов теплообмена и трения. Напряжения трения со стенкой определяются по формуле для коэффициента трения в зависимости от ориентации грани. Для граней перпендикулярных радиальной оси и оси по углу, применяется формула для расчета коэффициентов сопротивления при поперечном обтекании пучков стержней [13]. Для граней, перпендикулярных аксиальной оси, применяется набор формул для определения коэффициентов сопротивления при продольном обтекании пучков стержней с треугольной упаковкой. Для пучков гладких стержней используются формулы из [14]. При этом количества радиальных и угловых слоев ограничены некоторыми максимальными числами, значения которых определяются условием попадания в каждый слой ненулевого числа твэлов, для того чтобы корректно работали используемые соотношения для трения и теплообмена в пучках стержней.

Для расчета течения теплоносителя используются фундаментальные законы сохранения массы, энергии и импульса, а также уравнение, определяющее, что сумма объемных долей компонентов должна быть равна единице. Жидкость предполагается сжимаемой. Давление является одной из независимых переменных, относительно которых линеаризуется система уравнений сохранения массы, энергии и импульса. Исходные системы уравнений для каждой ячейки линеаризуются и собираются в общую систему линейных уравнений (СЛУ):

$$AX = B,$$

где **A** – общая матрица; **B** – правая часть матрицы;

$$X = \begin{bmatrix} \varphi_1^1, h_1^1, \dots, \varphi_{Ncomp}^1, h_{Ncomp}^1, p^1, \dots, \\ \varphi_1^{Ncell}, h_1^{Ncell}, \dots, \varphi_{Ncomp}^{Ncell}, h_{Ncomp}^{Ncell}, p^{Ncell}, \\ U_{1,z}^1, \dots, U_{Ncomp,z}^1, \dots, U_{1,z}^{Nz}, \dots, U_{Ncomp,z}^{Nz}, \\ U_{1,r}^1, \dots, U_{Ncomp,r}^1, \dots, U_{1,r}^{Nr}, \dots, U_{Ncomp,r}^{Nr}, \\ U_{1,\theta}^1, \dots, U_{Ncomp,\theta}^1, \dots, U_{1,\theta}^{N\theta}, \dots, U_{Ncomp,\theta}^{N\theta} \end{bmatrix}^T$$

– вектор неизвестных. Здесь $\varphi, h, p, U_z, U_r, U_\theta$ – объемная доля компонента, энтальпия теплоносителя, давление и скорость теплоносителя вдоль аксиального, радиального и углового направления соответственно; $Ncomp$ – число фаз и компонентов в теплоносителе; $Ncell$ – полное число расчетных ячеек.

Так как в численном виде в уравнениях для любой переменной используются только значе-

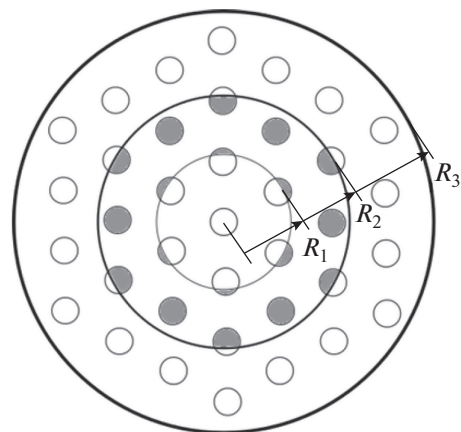


Рис. 1. Схема усреднения параметров. Темным цветом обозначены твэлы, полностью или частично попавшие в расчетную область

ния в соседних ячейках и узлах, общая матрица СЛУ получится существенно разреженной, а для таких типов матриц имеются достаточно эффективные алгоритмы обращения, реализованные в современных математических библиотеках.

ТЕЧЕНИЕ НАТРИЯ В 169-СТЕРЖНЕВОЙ СБОРКЕ С ЧАСТИЧНОЙ БЛОКИРОВКОЙ ПРОХОДНОГО СЕЧЕНИЯ (KNS 169)

Возможность использования кода ЕВКЛИД/V2 для расчета течения теплоносителя в сборках с блокировкой проходного сечения с учетом распределения теплогидравлических параметров по сечению ТВС проверялась в экспериментах, представленных в работе [6]. Эксперименты проводились в 169-стержневой сборке с дистанционирующими решетками. Параметры пучка нагревательных элементов соответствуют параметрам сборки (рис. 2) реактора SNR-300 – прототипа натриевого реактора на быстрых нейтронах, разработанного в Германии, электрической мощностью 300 МВт. Блокировка составляла 49% полного проходного сечения и находилась на расстоянии 40 мм от начала обогреваемой части канала. Из 169 стержней 81 соприкасались с блокировкой и были необогреваемыми и только 88 вне блокировки являлись обогреваемыми. Энерговыведение в стержнях было равномерным. Тесты проводились при скоростях теплоносителя на входе в сборку 1.0 и 4 м/с и тепловыми потоками 17.9 и 67.7 Вт/см² соответственно. Температура теплоносителя на входе в сборку составляла 677 К. Теплоноситель подводился в сборку через входной патрубок в нижней части конструкции.

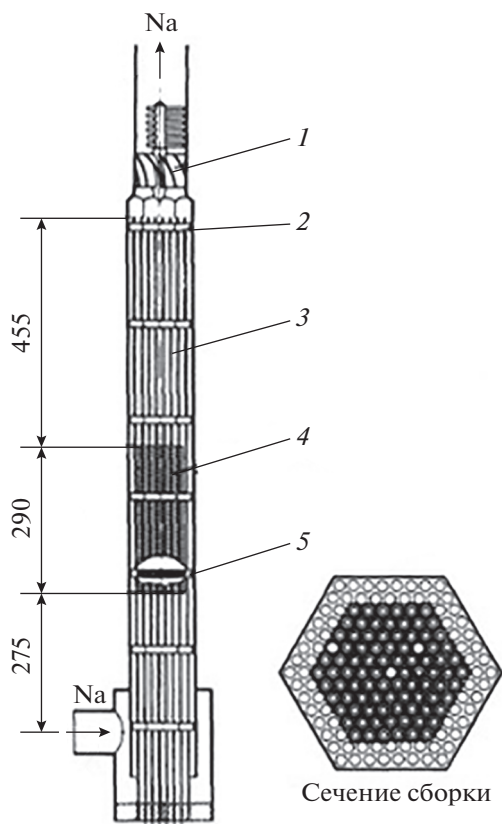


Рис. 2. Схема участка для проведения эксперимента по частичной блокировке сечения сборки. Светлые кружки – стержни вне блокировки; черные – с блокировкой.

1 – смеситель потоков; 2 – дистанционирующая решетка; 3 – пучок стержней; 4 – обогреваемый участок (88 стержней); 5 – блокировка 49%

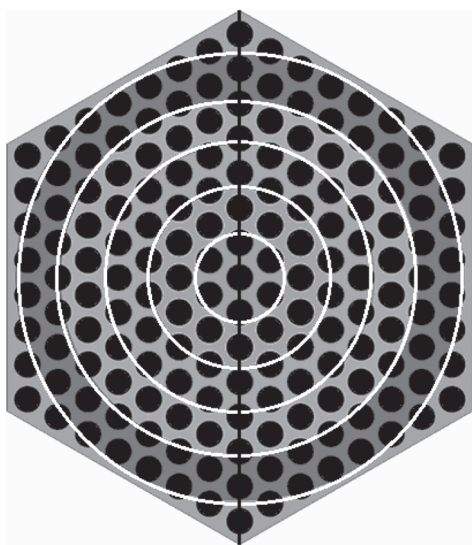


Рис. 3. Схема разбиения 169-стержневой сборки на расчетные ячейки по радиусу и углу

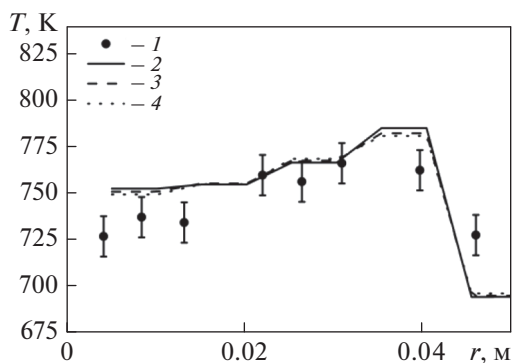


Рис. 4. Максимальные, минимальные и номинальные значения температуры теплоносителя на расстоянии 80 мм от места блокировки проходного сечения при скорости теплоносителя 4 м/с (усы – погрешности измерений). Термомпары располагались вдоль диагонали сборки.

1 – эксперимент; расчет при числе ячеек: 2 – 224; 3 – 336; 4 – 448

Для моделирования эксперимента с помощью кода ЕВКЛИД/V2 была создана нодализационная схема, которая включала в себя двумерные теплопроводящие структуры заданной длины и диаметра для моделирования твэлов и трехмерную модель канала с теплоносителем [1]. Горизонтальный подвод не моделировался, задавался сразу вертикальный участок сборки. Дистанционирующие решетки задавались через дополнительные коэффициенты сопротивлений в соответствующих расчетных ячейках. В базовой нодализационной схеме вертикальный канал разбивался на 28 аксиальных ячеек, две по углу и шесть по радиусу (всего 336 ячеек) (рис. 3). Были заблокированы четыре радиальные зоны, что соответствует 52% полной проходной площади.

Выбор числа расчетных ячеек осуществлялся путем проведения анализа сходимости расчетов. Пример анализа сходимости приведен на рис. 4. Под сходимостью подразумевается сеточная сходимость, при которой результаты расчета перестают зависеть от количества ячеек сетки разбиения. Поскольку исходная постановка задачи обладает угловой симметрией, в процессе расчета также проверялась независимость получаемого решения от угловой координаты.

Кроме сравнения результатов расчета и эксперимента был проведен анализ влияния неопределенности исходных данных на результаты моделирования. Погрешность расчета для температуры на входе принималась равной 2.5 К, для расхода – 2%, неопределенность энерговыделения – 2%, для коэффициента теплоотдачи в сборке – 20%, для коэффициента трения – 10%.

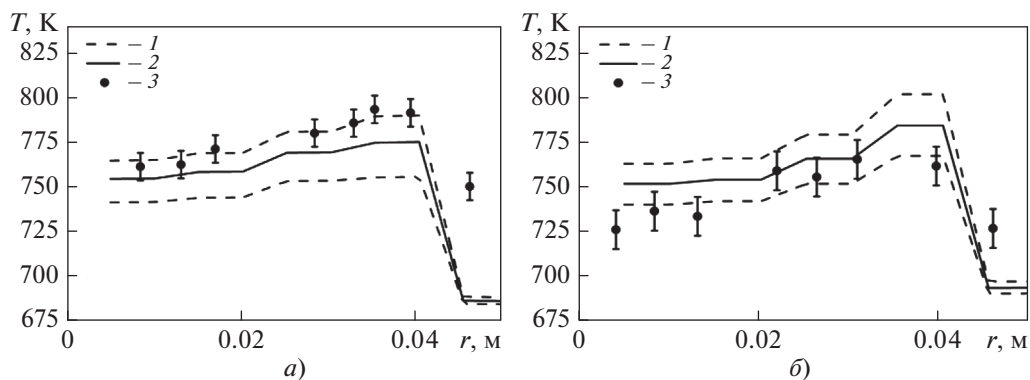


Рис. 5. Максимальные, минимальные и номинальные значения температуры теплоносителя (усы – погрешности измерений). Термопары располагались вдоль диагонали сборки. Расстояние от места блокировки, мм/скорость теплоносителя, м/с: а – 20/1; б – 80/4. 1 – максимальные и минимальные значения, полученные при анализе неопределенности; 2 – номинальное значение; 3 – эксперимент

Результаты расчетов по распределению температуры теплоносителя по радиусу канала в сравнении с экспериментальными данными приведены на рис. 5. Как можно видеть из этого рисунка, результаты расчетов с учетом неопределенности исходных данных удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. На основе проведенных расчетов оценена максимальная среднеарифметическая абсолютная погрешность расчета температуры, которая составила 23 К.

ИМИТАЦИЯ АВАРИИ ТИПА ULOF В 37-СТЕРЖНЕВОЙ СБОРКЕ (KNS 37)

Эксперименты по кипению натрия в 37-стержневом электрообогреваемом пучке были выполнены в исследовательском центре FZK в Карлсруэ (Германия) [8]. Параметры пучка нагревательных элементов соответствуют параметрам сборки реактора SNR-300. Цель экспериментов – изучение процессов, которые сопровождают аварию с потерей расхода теплоносителя (авария типа ULOF), при которой происходит выход из строя насосов I контура при несрабатывании защит реактора. Исследование процессов кипения происходило в экспериментальной сборке, помещенной в натриевую петлю. Рабочий участок экспериментальной установки KNS-37 [8] представлял собой 37-стержневой пучок (рис. 6). Для дистанционирования твэлов в сборке через каждые 150 мм от начала обогреваемого участка устанавливались дистанционирующие решетки. Всего было установлено девять решеток. В эксперименте использовались электрообогреваемые твэлы. В качестве нагревателя применялась нихромовая спираль (70% Ni–30% Cr). Нагревательная спираль была

намотана на стержень (опору) из оксида магния (MgO). Зазор между спиралью и стальной оболочкой был заполнен электроизолятором – нитридом бора (BN). В процессе эксперимента имитировалась авария с потерей расхода теплоносителя пу-

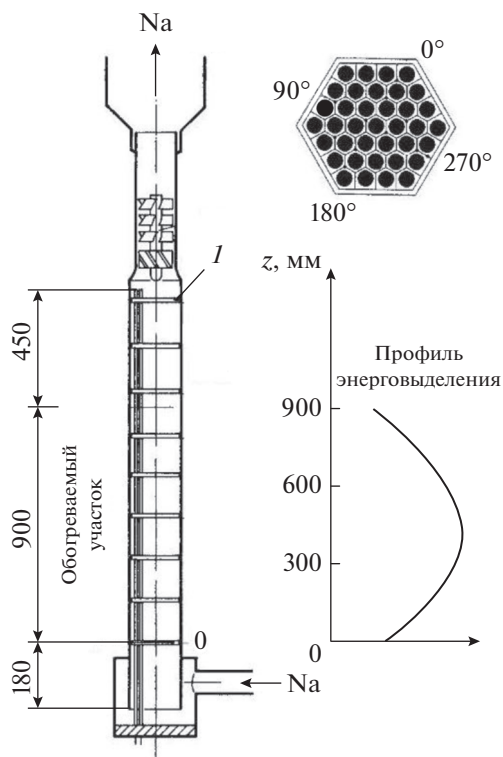


Рис. 6. Схема участка для проведения эксперимента по имитации аварии типа ULOF в 37-стержневой сборке (а) и профиль энерговыделения (б). 1 – дистанционирующие решетки (9 шт.)

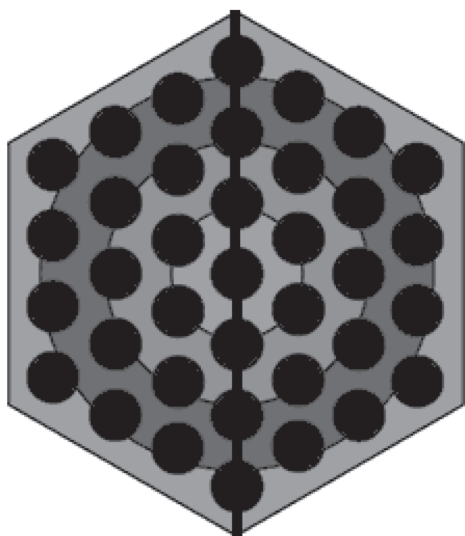


Рис. 7. Схема разбиения 37-стержневой сборки на расчетные ячейки по радиусу и углу

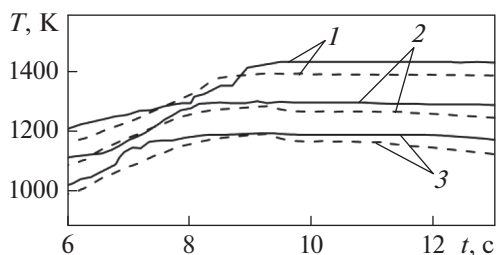


Рис. 8. Зависимость температуры T поверхности твэла от времени t для периферийной области. Сплошные линии — эксперимент; штриховые — расчет. Расстояния от начала обогрева, мм: 1 — 870; 2 — 953 (+100 К — это добавка, чтобы все линии можно было компактно изобразить на одном графике); 3 — 1128 (+225 К — то же)

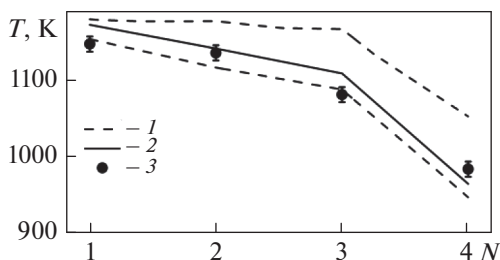


Рис. 9. Распределения минимальных, номинальных и максимальных значений температуры теплоносителя по радиусу (N — номер радиального слоя) на расстоянии 775 мм от начала обогреваемой части на момент закипания (усы — погрешности измерений). 1 — максимальные и минимальные значения, полученные при анализе неопределенности; 2 — номинальное значение; 3 — эксперимент

тем его снижения через тепловыделяющую сборку. При этом через 9 с от начала аварийного процесса проводилось отключение электрообогрева в стержнях для того, чтобы избежать их перегрева и разрушения.

Расчетная схема для моделирования эксперимента с помощью кода ЕВКЛИД/V2 состояла из двумерной тепловой структуры, имитировавшей твэлы, и тепловой структуры, имитировавшей чехол ТВС. Чехол ТВС моделировался цилиндрической тепловой структурой длиной 1.53 м, внутренним радиусом 26.60 мм и толщиной 2.80 мм. Тепловая структура, имитировавшая твэл, содержала несколько радиальных слоев, которые соответствовали различным составляющим твэла (стальной оболочке, изоляционному слою из нитрида бора, нихромовой спирали, опоре нихромовой спирали). Общее количество расчетных ячеек по радиусу составляло 5, по высоте — 32 ячейки. По длине тепловой структуры, имитировавшей твэл, был задан профиль энерговыделения с мощностью для одного стержня 19.3 кВт. Сборка из 37 стержней моделировалась с помощью трехмерной теплогидравлической модели [1] и содержала 4 слоя по радиусу сборки, 2 слоя по углу (рис. 7) и 32 ячейки по высоте сборки. Выбор числа расчетных ячеек осуществлялся путем проведения анализа сходимости расчетов. Проверялась также независимость получаемого решения от угловой координаты.

Результаты расчета температуры в процессе эксперимента в различных точках по высоте, а также распределение температур по радиусу при начале кипения приведены на рис. 8 и 9. Как можно видеть из этих рисунков, результаты расчетов с учетом неопределенности исходных данных удовлетворительно согласуются с результатами экспериментов. Для температуры на входе неопределенность принималась равной 2.5 К, для расхода — 2%, для энерговыделения — 2%, для коэффициента теплоотдачи в сборке — 20%, для коэффициента трения — 10%. Максимальная погрешность расчета температуры оболочек составила 66 К, а теплоносителя — 28 К.

ИМИТАЦИЯ АВАРИИ С ПОЛНОЙ БЛОКИРОВКОЙ ПРОХОДНОГО СЕЧЕНИЯ В 37-СТЕРЖНЕВОЙ СБОРКЕ. ЭКСПЕРИМЕНТ SCARABEE-N BE+3

Эксперимент SCARABEE BE+3 по моделированию разрушения 37-стержневой топливной сборки был проведен во Франции на экспериментальном реакторе SCARABEE в 1986 г. [9]. Топливная часть твэлов сборки по высоте нахо-

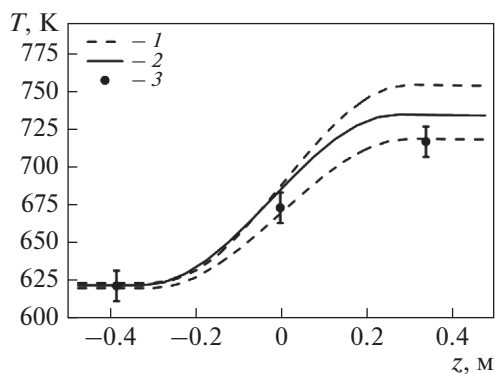


Рис. 10. Распределения температуры теплоносителя и оболочки твэла по высоте экспериментального участка (усы – погрешности измерений) для твэла третьего ряда. Обозначения см. рис. 9

дилась между двумяblankетами. Сборка из 37 твэлов была окружена несколькими слоями, имитировавшими чехол сборки, чехлы соседних ТВС и натрия межкассетного пространства: первая шестигранная стальная труба, газовый зазор с аргоном, вторая стальная шестигранная труба, зазор с натриевым теплоносителем, охлаждающим стальные трубы, и третья стальная шестигранная труба. Вторая и третья трубы образовывали зазор с натриевым теплоносителем, моделировавшим межкассетное пространство в активной зоне.

После достижения теплогидравлическими параметрами стационарных значений начинался эксперимент. Стартом эксперимента служили закрытие клапана на входе в тестовую сборку и удержание мощности реактора на постоянном

значении. Закрытие клапана моделировало блокировку проходного сечения тестовой сборки и приводило к увеличению скорости и расхода теплоносителя в натриевом зазоре из-за перераспределения расхода. Эксперимент заканчивался отключением реактора после разрушения второй и третьей трубы.

Для проведения указанного эксперимента была создана нодализационная схема для моделирования теплогидравлических процессов с использованием трехмерного модуля интегрального кода ЕВКЛИД/V2, с помощью которой были проведены расчеты. Нодализационная схема состояла из канала, моделировавшего в трехмерном приближении экспериментальную сборку, цилиндрический канал для моделирования натриевого зазора, тепловые структуры для моделирования стенок первой и второй трубы и зазора с аргоном, тепловой структуры для моделирования стенок третьей трубы и четырех тепловых структур для моделирования твэлов каждого ряда. На входе каналов задавалось граничное условие для скорости в виде функции от времени, на выходе граничным условием было постоянное давление. По высоте принималось 20 ячеек, по радиусу – 3, по углу – 2 ячейки. Выбор числа расчетных ячеек осуществлялся путем проведения анализа сходимости расчетов.

Результаты расчета распределения температуры теплоносителя и оболочки твэла в начальный момент времени представлены на рис. 10. Изменение температуры оболочки твэла третьего ряда во времени приведено на рис. 11. Как можно увидеть из этих рисунков, результаты расчетов удовлетворительно согласуются с результатами экспериментов. Максимальное среднеарифметическое аб-

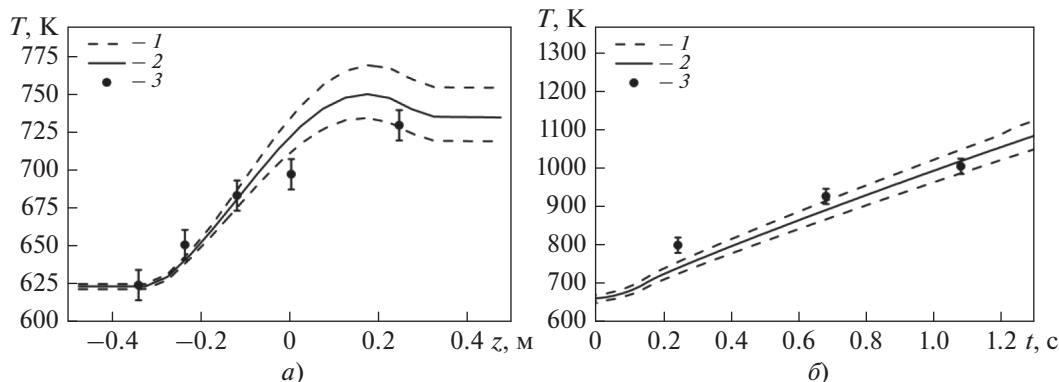


Рис. 11. Изменения температуры теплоносителя (а) и оболочки твэла третьего ряда (б) во времени (усы – погрешности измерений). Обозначения см. рис. 9

солютное отклонение температуры теплоносителя составляет 22 К, оболочки твэла – 30 К.

ВЫВОДЫ

1. В результате моделирования экспериментов в тепловыделяющих сборках с использованием кода ЕВКЛИД/V2 показано хорошее совпадение результатов расчета и экспериментов по распределению температуры теплоносителя по радиусу сборки.

2. Оценка погрешности расчета отдельных параметров, которые были также измерены в процессе проведения эксперимента, показала, что в режимах с блокировкой проходного сечения без кипения теплоносителя погрешность расчета температуры теплоносителя составила 23 К, а температуры оболочек – 30 К. В режиме с кипением максимальная погрешность расчета температуры теплоносителя составила 28 К, а максимальная погрешность температуры оболочки твэлов – 66 К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Учет** пространственных эффектов при расчете тяжелых аварий с помощью интегрального кода ЕВКЛИД/V2 / Э.В. Усов, А.А. Бутов, В.И. Чухно, И.А. Климонов, И.Г. Кудашов, В.С. Жданов, Н.А. Прибатурин, Н.А. Мосунова, В.Ф. Стрижов // Атомная энергия. 2019. Т. 127. Вып. 1. С. 3–8.
2. **Двумерный** теплогидравлический модуль интегрального кода СОКРАТ-БН: Математическая модель и результаты расчетов / Э.В. Усов, М.Е. Кузнецова, Н.А. Прибатурин, Р.В. Чалый, Н.И. Рыжов, А.Е. Киселев // Атомная энергия. 2016. Т. 120. Вып. 2. С. 95–100.
3. **SIMMER-III: A Computer Program for LMFR Core Disruptive Accident Analysis. Version 3. A Model Summary and Program Description** / Н. Yamano, S. Fujita, Y. Tobita, K. Kamiyama, Sa. Kondo, K. Morita, E.A. Fischer, D.J. Brear, N. Shirakawa, X. Cao, M. Sugaya, M. Mizuno, S. Hosono, T. Kondo, W. Masche et al. // O-arai Engineering Center. JNC. JNC TN 9400 2003-071, Aug. 2003.
4. **Ашурко Ю.М., Волков А.В., Раскач К.Ф.** Разработка программных модулей для расчета запроектных аварий в быстрых реакторах с учетом пространственно-временной кинетики // Атомная энергия. 2013. Т. 114. Вып. 2. С. 63–67.
5. **Chenu A., Mikityuk K., Chawla R.** TRACE simulation of sodium boiling in pin bundle experiments under loss-of-flow conditions // Nucl. Eng. Des. 2009. V. 239. Is. 11. P. 2417–2429. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.07.015>
6. **Huber F., Pepler W.** Summary and implications of out-of-pile investigations of local cooling distributions in LMFBR subassembly geometry under single-phase and boiling conditions. Kfk 3927, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1985.
7. **Kaysner G., Charpenel J., Jamond C.** Summary of the SCARABEE-N subassembly melting and propagation tests with an application to hypothetical total instantaneous blockage in a reactor // Nucl. Sci. Eng. 1998. V. 128. № 2. P. 144–185. <https://doi.org/10.13182/NSE98-A1950>
8. **Steady state and transient sodium boiling experiments in a 37-pin bundle** / F. Huber, A. Kaiser, K. Mattes, W. Pepler // Nucl. Eng. Des. 1987. V. 100. Is. 3. P. 377–386. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(87\)90087-2](https://doi.org/10.1016/0029-5493(87)90087-2)
9. **Yamano H., Tobita Y.** Experimental analyses by SIMMER-III on duct-wall failure and fuel discharge/relocation behavior // Mech. Eng. J. 2014. V. 1. Is. 4. P. TEP0028. <https://doi.org/10.1299/mej.2014tep0028>
10. **Физические** модели для расчета разрушений твэла и активной зоны реактора с жидкометаллическим теплоносителем, реализованные в коде ЕВКЛИД/V2 / А.А. Бутов, В.С. Жданов, И.А. Климонов, И.Г. Кудашов, А.Э. Кутлиметов, Н.А. Мосунова, В.Ф. Стрижов, А.А. Сорокин, С.А. Фролов, Э.В. Усов, В.И. Чухно // Теплоэнергетика. 2019. № 5. С. 5–15. <https://doi.org/10.1134/S0040363619050023>
11. **Моделирование** плавления твэла быстрого реактора и затвердевания образующегося расплава с помощью модуля SAFR/V1 интегрального кода ЕВКЛИД/V2 / Э.В. Усов, А.А. Бутов, В.И. Чухно, И.А. Климонов, И.Г. Кудашов, В.С. Жданов, Н.А. Прибатурин, Н.А. Мосунова, В.Ф. Стрижов // Атомная энергия. 2018. Т. 124. Вып. 3. С. 123–127.
12. **Моделирование** перемещения расплава по поверхности твэла быстрого реактора при тяжелой аварии с помощью модуля SAFR/V1 интегрального кода ЕВКЛИД/V2 / Э.В. Усов, А.А. Бутов, В.И. Чухно, И.А. Климонов, И.Г. Кудашов, В.С. Жданов, Н.А. Прибатурин, Н.А. Мосунова, В.Ф. Стрижов // Атомная энергия. 2018. Т. 124. Вып. 4. С. 197–201.
13. **РТМ 24.031.05-72.** Методика и зависимости для теоретического расчета теплообмена и гидравлического сопротивления теплообменного оборудования АЭС. М.: М-во тяжелого энергомашиностроения, 1972.
14. **Анализ** гидравлического сопротивления пучков твэлов быстрых реакторов / А.В. Жуков, А.П. Сорокин, П.А. Титов, П.А. Ушаков // Атомная энергия. 1986. Т. 60. Вып. 5. С. 317–321.

Verification of the EUCLID/V2 Integrated Code Thermal-Hydraulic Module Based on Experiments That Take into Account the Parameter Distribution over the Fuel Assembly's Cross Section

A. A. Butov^a, I. A. Kliminov^a, I. G. Kudashov^a, V. I. Chukhno^a, T. V. Sycheva^a, E. V. Usov^{a, *},
N. A. Mosunova^b, and V. F. Strizhov^b

^a Nuclear Safety Institute, Novosibirsk Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

^b Nuclear Safety Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 115191 Russia

*e-mail: usovev@gmail.com

Abstract—The second version of the EUCLID/V integrated code, denoted by EUCLID/V2, has been developed for analyzing the processes occurring in the course of severe accidents in sodium-cooled reactor plants with uranium dioxide fuel. Within the verification of this version that uses a 3D thermal-hydraulic module, modeling was carried out, and the prediction results were compared with the experimental data obtained on experimental setups in Germany and France on simulating accidents involving partial and complete blockage of the flow section (the first type) and also with loss of coolant flowrate (the second type). The experiments on simulating an accident involving partial blockage of the flow pass section in a 169-pin assembly (KNS 169) and on simulating an accident involving complete blockage of the flow pass section in a 37-pin assembly (SCARABEE-N BE+3) correspond to accidents of the first type, and experiments on simulating an ULOF type accident in a 37-pin assembly (KNS 37) correspond to accidents of the second type. Based on calculations carried out taking into account the available experimental data, the correctness of modeling performed using the EUCLID/V2 integrated code 3D thermal-hydraulic module is estimated, and the error of the coolant and fuel pin cladding temperatures predicted using the presented code is determined.

Keywords: fast reactor, core, liquid metal, EUCLID/V2, modeling, verification, spatial effects, sodium, boiling, input data uncertainty