

УДК 519.688

## ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМОВ КОДА "ЕВКЛИД/V2" ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВА ВО ВРЕМЯ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ В БЫСТРОМ РЕАКТОРЕ

Э. В. Усов, А. А. Бутов, В. И. Чухно, И. А. Климонов, И. Г. Кудашов,  
Н. А. Прибатурин, Н. А. Мосунова, В. Ф. Стрижов  
(ИБРАЭ РАН, Новосибирский филиал; ИБРАЭ РАН, г. Москва)

Для обоснования безопасности перспективных установок с жидкометаллическим теплоносителем требуется система расчетных кодов, позволяющая моделировать тяжелые запроектные аварии с плавлением активной зоны. Для этих целей в ИБРАЭ РАН разработан интегральный код ЕВКЛИД/V2. Текущая версия кода ЕВКЛИД/V2 позволяет моделировать поведение реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями в стационарных и переходных режимах работы, а также при различных проектных авариях путем проведения связанных нейтронно-физических, термомеханических и теплогидравлических расчетов. Особое внимание уделено модулю SAFR/V1, применяемому для расчета термического разрушения твэла.

*Ключевые слова:* SAFR/V1, HYDRA-IBRAE/LM, ЕВКЛИД/V2, твэл, активная зона, математическое моделирование, расплав.

### Введение

При разработке проектов реакторных установок одним из наиболее важных этапов является обоснование их безопасности. Ввиду сложности проведения экспериментов на реальных ядерных реакторах единственным подходом остается численное моделирование. По этой причине для анализа и обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями актуальной является разработка интегральных кодов нового поколения. Один из таких кодов — созданный в ИБРАЭ РАН на базе кода ЕВКЛИД/V1 [1] код ЕВКЛИД/V2.

Текущая версия кода ЕВКЛИД/V2 позволяет моделировать поведение реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями в стационарных и переходных режимах работы, а также при различных проектных авариях путем проведения связанных нейтронно-физических, термомеханических и теплогидравлических расчетов. Модульная структура кода ЕВКЛИД/V2 допускает увеличение количества независимых модулей, что расширяет спектр моделируемых процессов и явлений.

При моделировании тяжелой аварии в составе кода ЕВКЛИД/V2 взаимодействуют термомеханический модуль БЕРКУТ [2], тяжелоаварийный модуль SAFR/V1 [3–6] и теплогидравлический модуль HYDRA-IBRAE/LM [7], а также нейтронно-физический модуль DN3D. Расчетные сетки каждого из модулей согласованы друг с другом, что позволяет реализовать механизм обмена между модулями в рамках интерфейсных возможностей кода ЕВКЛИД/V2.

Расчет тяжелой аварии невозможен без моделирования плавления твэлов. Плавление твэлов происходит при нарушении баланса подводимого и отводимого тепла из-за уменьшения расхода теплоносителя при фиксированном энерговыделении либо резком росте энерговыделения при фиксированном расходе теплоносителя. Первый случай соответствует аварии типа ULOF (Unprotected Loss-of Flow), второй — аварии типа УТОР (Unprotected Transient Over Power) в зарубежной классификации. С использованием тяжелоаварийного модуля SAFR/V1 моделируются процессы разрушения

твэлов тепловыделяющей сборки (ТВС) за счет ее плавления, рассчитывается перемещение образовавшегося расплава и его выброс в теплоноситель. Дальнейший расчет движения и теплообмена расплава в теплоносителе производится по коду HYDRA-IBRAE/LM.

### Движение расплава по поверхности твэла

Образовавшийся при плавлении расплав начинает перемещаться по поверхности твэла. В процессе движения расплав обменивается теплом с поверхностью твэла, может охлаждаться и застывать, блокируя проходное сечение ТВС. Движение и теплообмен расплава с поверхностью твэла моделируется в одномерном приближении путем решения системы уравнений в частных производных, выражающих законы сохранения массы, энергии и импульса:

– уравнение сохранения массы

$$\frac{\partial(\rho S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U S)}{\partial z} = \Gamma_m; \quad (1)$$

– уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial(\rho h S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho h U S)}{\partial z} = q_w \Pi_w + q_c \Pi_c + \Gamma_m h_m; \quad (2)$$

– уравнение сохранение импульса

$$\begin{aligned} \frac{\rho S \partial U}{\partial t} + \frac{\partial[(\chi - 1) \rho S U^2]}{\partial z} + \frac{\rho S}{2} \frac{\partial U^2}{\partial z} = \\ = -S \frac{\partial p}{\partial z} + \Gamma_m (U_m - U) - \rho g S + \tau_c \Pi_c - \tau_w \Pi_w + \sigma \Pi_w \cos \theta_w \delta(z - z_i). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $\rho$  – плотность расплава;  $S$  – площадь поперечного сечения области, занятой расплавом;  $t$  – время;  $z$  – координата;  $U$  – скорость расплава;  $\Gamma_m$  – источник массы расплава;  $h$  – энтальпия единицы массы расплава;  $q_w$ ,  $q_c$  – тепловой поток в расплав от стенки и теплоносителя соответственно;  $\Pi_w$ ,  $\Pi_c$  – смачиваемый периметр для расплава, соприкасающегося с поверхностью твэла и потоком теплоносителя соответственно;  $\chi$  – коэффициент, учитывающий наличие профиля скорости в расплаве и зависящий от режима течения [8];  $p$  – давление;  $U_m$  – скорость источника массы;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\tau_c$ ,  $\tau_w$  – напряжение трения на границе расплава с теплоносителем и на стенке соответственно;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения расплава;  $\theta_w$  – контактный угол на границе *расплав – твердое тело*;  $\delta(z - z_i)$  – дельта-функция, показывающая, что капиллярная сила приложена к границе раздела *жидкость – расплав*.

При движении расплава по поверхности твэла учитывается трение расплава с поверхностью твэла и теплоносителем, теплообмен с твэлом и теплоносителем, действие капиллярных сил на границе расплава и теплоносителя. Информация о напряжении трения и тепловом потоке на границе расплава и теплоносителя передается из теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM. Соотношения, используемые для расчета теплообмена и трения, приведены в работе [9]. Трение и теплообмен между расплавом и поверхностью твэла зависят от того, какой режим стекания реализуется в процессе решения задачи. В настоящей версии кода ЕВКЛИД/V2 реализованы два режима движения расплава: сплошной и пленочный. Для каждого режима движения рассматриваются подрежимы: ламинарный, турбулентный и переходный между ними.

Сплошной режим движения реализуется, когда все свободное пространство в твэле занято расплавом, пленочный – в противном случае. В коде ЕВКЛИД/V2 реализован автоматический выбор режима движения. Выбор подрежимов осуществляется по числу Рейнольдса  $Re$ . Ламинарному подрежиму соответствуют значения  $Re < 2000$ , турбулентному – значения  $Re > 4000$ .

### Численные алгоритмы для моделирования движения расплава в твэле

В процессе плавления образовавшийся расплав сразу же начинает перемещаться за счет действующих на него сил. Одновременно расплавиться могут несколько материалов в различных точках по высоте твэла или ТВС. По этой причине в модуле SAFR/V1 кода ЕВКЛИД/V2 для каждой области с расплавом решается своя система уравнений сохранения массы, энергии и импульса.

Для численного решения система уравнений сохранения (1)–(3) аппроксимируется с использованием метода конечных объемов. Конвективные члены записываются в противопоточном виде неявно по скорости. Данный способ аппроксимации обеспечивает устойчивость расчета при выполнении критерия Куранта. Недостатком противопоточной аппроксимации является высокая численная диффузия, которая может приводить к появлению в расчетах расплава в той области, где его еще нет. Данный факт требует модификации численного алгоритма. В частности, в текущей версии кода ЕВКЛИД/V2 реализован алгоритм, отслеживающий движение границ областей, занятых расплавом. Верхняя  $z_{up}$  и нижняя  $z_{down}$  координаты границ расплава рассчитываются по значениям скоростей в верхней ( $U_{up}$ ) и нижней ( $U_{down}$ ) ячейках области, занятых расплавом:

$$z_{up} = z_{up}(0) + \int_0^t U_{up} dt; \quad z_{down} = z_{down}(0) + \int_0^t U_{down} dt. \quad (4)$$

Система уравнений (1)–(3) решается только в границах областей с расплавом (4). Уравнения линеаризуются относительно основных переменных: полной массы  $m$  расплава в расчетной ячейке, полной энтальпии  $H$ , давления  $p$  и скорости расплава  $U$ . На каждом счетном шаге для каждой области с расплавом система записывается в матричном виде и решается с использованием стандартных библиотек для решения линейных уравнений.

Система уравнений зависит от режима движения. Для пленочного режима она имеет вид

$$\begin{aligned} m_j^{n+1} &= m_j^n - m_{up} + m_{down}; \\ H_j^{n+1} &= H_j^n + m_{down} h_{j-1/2} - m_{up} h_{j+1/2} + Q; \\ \rho \frac{U_{j+1/2}^{n+1} - U_{j+1/2}^n}{\Delta t^n} + \frac{F_{j+1} - F_j}{\Delta z_{j+1/2}} &= \\ &= -S \frac{p_{j+1}^{n+1} - p_j^{n+1}}{\Delta z_{j+1/2}} + g \langle \rho S \rangle_{j+1/2} + (\tau_c)_{j+1/2}^n \Pi_{cj} - (\tau_w)_{j+1/2}^{n+1} \Pi_{wj} + \frac{\sigma \Pi_{wj} \cos \theta_{wj}}{\Delta z_{j+1/2}}; \\ p_j^{n+1} &= p_{j+1}^{n+1}. \end{aligned}$$

Здесь  $n$  – номер временного слоя;  $j$  – номер расчетной ячейки;  $\Delta t$  – шаг по времени;  $\Delta z$  – длина расчетной ячейки;  $m_{up}$ ,  $m_{down}$  – конвективные члены уравнения сохранения массы;  $F$  – конвективный член уравнения сохранения импульса;  $Q$  – тепло, поступающее в расплав. Выражения для конвективных членов представлены в работе [4]. Первые три уравнения – законы сохранения массы, энергии и импульса. Последнее уравнение выражает тот факт, что для вертикально стекающей безволновой пленки давление в каждой точке по высоте одинаково.

Для сплошного режима стекания система имеет аналогичный вид, за исключением последнего уравнения. Равенство давлений заменяется на уравнение, выражающее собой тот факт, что расплав занимает весь предоставленный ему объем расчетной ячейки  $\Delta V$ :

$$m_j^{n+1} = \rho \Delta V_j.$$

При численном решении уравнений могут возникать ситуации, которые требуют модификации алгоритмов. Среди таких ситуаций: 1) разрыв одной области, занятой расплавом, на две и более; 2) слияние различных областей в одну; 3) появление или исчезновение расплава из расчетной ячейки. Для обработки первой и второй ситуаций в модуле SAFR/V1 реализованы подходы, позволяющие как разделять области с расплавом, так и сливать их в одну.

Слияние областей с расплавом одного материала происходит в том случае, если координата верхней границы первой области  $z_{up}$  совпадает с координатой нижней границы второй области  $z_{down}$ . В этом случае формируется новая область с верхней границей, соответствующей верхней границе второй области, и нижней границей, совпадающей с нижней границей первой области. В той расчетной ячейке, где пересеклись области с расплавом, полная масса и полная энтальпия вычисляются в соответствии с законами сохранения как сумма масс и энтальпий двух областей.

Третья ситуация напрямую связана с отслеживанием границ, занятых расплавом. Возможны случаи, при которых в граничной ячейке оказывается меньше массы и энтальпии, чем может быть перенесено за один временной шаг. Рассмотрим для примера случай, когда верхняя граница расплава перемещается из  $j$ -й ячейки в  $(j - 1)$ -ю. Пусть при этом после решения системы уравнений оказалось, что в  $j$ -й ячейке стали отрицательными энтальпия и масса расплава. Тогда необходимо выполнить пересчет, при котором уравнения сохранения массы и энергии для  $j$ -й ячейки корректируются путем добавления членов  $\Delta m$  и  $\Delta H$ :

$$\begin{aligned} m_j^{n+1} &= m_j^n - m_{up} + m_{down} + \Delta m; \\ H_j^{n+1} &= H_j^n - m_{up}h_{j+1/2} + m_{down}h_{j-1/2} + \Delta H. \end{aligned}$$

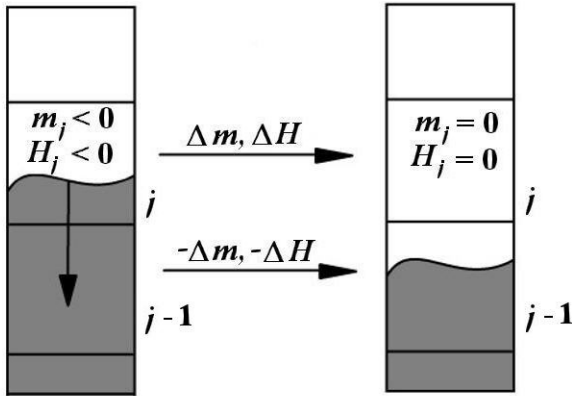


Рис. 1. Схема модификации уравнений сохранения при исчезновении расплава из ячейки

Поправки выбираются таким образом, чтобы масса и энтальпия в  $j$ -й ячейке, откуда ушел расплав, стали равны нулю. Так как полная масса и энтальпия расплава должны сохраниться, найденные поправки вычитаются из уравнений для  $(j - 1)$ -й ячейки, в которую сместилась граница расплава (рис. 1).

$$\begin{aligned} m_{j-1}^{n+1} &= m_{j-1}^n - m_{up} + m_{down} - \Delta m; \\ H_{j-1}^{n+1} &= H_{j-1}^n - m_{up}h_{j-1/2} + m_{down}h_{j-3/2} - \Delta H. \end{aligned}$$

Аналогичным образом проводится модификация уравнений для нижней границы расплава. Представленный алгоритм позволяет физически корректно моделировать движение расплава, обеспечивая выполнение фундаментальных законов сохранения.

## Результаты тестовых расчетов движения расплава в твэле

В качестве примера, демонстрирующего применимость численных алгоритмов, рассмотрим расчет с помощью модуля SAFR/V1 кода ЕвКЛИД/V2 задач по движению расплава, которые имеют известное аналитическое решение.

Первая задача определяет перемещение верхней границы расплава в сплошном ламинарном режиме движения под действием градиента давления как при учете капиллярных сил, так и без их учета. Аналитическое выражение может быть получено путем решения уравнения сохранения импульса, записанного для всей области с расплавом. В качестве действующих на расплав сил рассматриваются разность давлений на левой и правой границах, трение со стенкой, капиллярные силы. Интегрирование уравнения импульса позволяет записать для границы расплава следующее выражение:

$$z_{up} = \sqrt{(z_{up}(0))^2 + \left( \frac{\sigma r}{2\mu} \cos \theta + \frac{\Delta p r^2}{4\mu} \right) \left[ t + \frac{\rho r^2}{8\mu} \left( \exp \left( -\frac{8\mu}{\rho r^2} t \right) - 1 \right) \right]}, \quad (5)$$

где  $r$  — радиус области, занятой расплавом;  $\mu$  — динамическая вязкость расплава. Сравнение результатов моделирования с аналитическим решением (5) представлено на рис. 2.

Следующий аналитический тест позволяет продемонстрировать применимость модели движения расплава по поверхности твэла в пленочном ламинарном режиме. Для этого сравнивается перемещение нижней границы расплава под действием гравитационных сил и трения с поверхностью [10]:

$$z_{down} = \left( \frac{9A^2 \rho g t}{4\mu} \right)^{1/3}, \quad (6)$$

где  $A$  — площадь пленки в продольном направлении;  $g$  — ускорение свободного падения. На рис. 3 представлено сравнение результатов расчета с использованием кода ЕВКЛИД/V2 и по формуле (6).

Как видно из приведенных выше результатов, код ЕВКЛИД/V2 позволяет с хорошей точностью моделировать перемещение расплава по поверхности твэла.

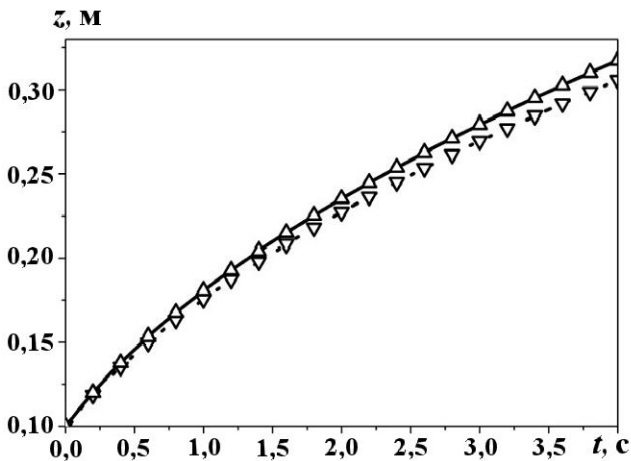


Рис. 2. Движение границы расплава: — — аналитическое решение (5) без учета капиллярных сил;  $\Delta$  — расчет с помощью кода ЕВКЛИД/V2 без учета капиллярных сил; - - - — аналитическое решение (5) с учетом капиллярных сил;  $\nabla$  — расчет с помощью кода ЕВКЛИД/V2 с учетом капиллярных сил

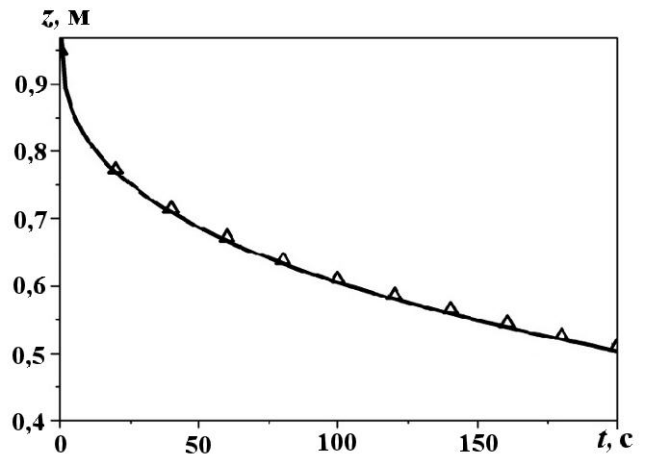


Рис. 3. Движение границы расплава: — — аналитическое решение (6);  $\Delta$  — расчет с помощью кода ЕВКЛИД/V2

### Движение компонентов разрушенного твэла в ТВС и активной зоне

В процессе плавления твэла, движения расплава по его поверхности, затвердевания на холодных участках ТВС изменяется площадь проходного сечения сборки. Все это приводит к изменению структуры течения теплоносителя в пространстве активной зоны, что должно быть принято во внимание в процессе моделирования. Учет изменения проходного сечения сборки в процессе расчетов учитывается путем передачи данных о новой геометрии из модуля термического разрушения твэла SAFR/V1 в теплогидравлический код HYDRA-IBRAE/LM. Система уравнений кода HYDRA-IBRAE/LM записана с использованием метода конечных объемов, что позволяет учитывать изменение геометрии активной зоны.

При совместном расчете задачи с разрушением активной зоны необходимо также рассматривать возможность уноса расплава в теплоноситель, его дальнейшее там движение и теплообмен. Моделирование подобных процессов производится путем решения системы уравнений многокомпонентной модели, аналогичной системе уравнений кода SIMMER-III [11], в предположении равенства давлений компонентов. При этом температуры и скорости компонентов не равны.

Для расчета перемещения компонентов используются фундаментальные законы сохранения массы, энергии и импульса, а также уравнение для суммы объемных долей компонентов:

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\varphi_k \rho_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\varphi_k \rho_k U_k)}{\partial z} &= \Gamma_k^+ - \Gamma_k^-; \\ \frac{\partial(\varphi_k \rho_k h_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\varphi_k \rho_k h_k U_k)}{\partial z} - \varphi_k \frac{dp}{dt} &= Q_{k,ext} + \Gamma_k^+ h_{film} - \Gamma_k^- h_k + \sum_i Q_{ik}; \\ \varphi_k \rho_k \frac{\partial U_k}{\partial t} + \varphi_k \rho_k U_k \frac{\partial U_k}{\partial z} + \varphi_k \frac{\partial p}{\partial z} &= -\varphi_k \rho_k g \sin \theta + \varphi_k \Gamma_k^+ (U_{film} - U_k) + \sum_i \tau_{ik}.\end{aligned}$$

Здесь  $\varphi_k$  — объемная доля  $k$ -го компонента (фазы);  $\Gamma_k^+$  — источник массы для компонента, образующегося в результате выброса расплава в теплоноситель;  $\Gamma_k^-$  — источник за счет осаждения компонента на поверхность твэла;  $Q_{k,ext}$  — внешние источники тепла;  $h_{film}$  — удельная энтальпия расплава  $k$ -го компонента;  $Q_{ik}$  — тепло, поступающее с межфазной границы;  $U_{film}$  — скорость расплава  $k$ -го компонента;  $\tau_{ik}$  — трение  $k$ -го компонента с  $i$ -м, в том числе с теплоносителем.

Для объемных долей компонентов справедливо равенство

$$\sum \varphi_k = 1.$$

В качестве компонентов рассматриваются жидкая и газообразная фазы теплоносителя, жидкое топливо, жидкая сталь, твердые компоненты топлива, твердые компоненты стали.

Трение компонентов с теплоносителем рассчитывается по коэффициенту трения  $\xi_{ik}$ , относительной скорости и площади поверхности раздела фаз  $A_{ik}$ , приходящейся на единицу объема:

$$\tau_{ik} = -\frac{1}{8} \xi_{ik} A_{ik} \rho_k (U_i - U_k) |U_i - U_k|.$$

### Численная аппроксимация уравнений многокомпонентной модели

Для численной аппроксимации уравнений сохранения массы и энергии используется метод конечных объемов. Уравнения решаются относительно изменения объемных долей компонентов  $\Delta\varphi_k$ , изменения энтальпии  $\Delta h_k$  и давления  $\Delta p$ :

$$\begin{aligned}(\rho_k \Delta\varphi_k)_j \frac{\Delta V}{\Delta t^n} + (\rho_k \varphi_k A)_{j+1/2} U_{j+1/2}^{n+1} - (\rho_k \varphi_k A)_{j-1/2} U_{j-1/2}^{n+1} &= \Gamma_{kj}^+ \Delta V - \Gamma_{kj}^- \Delta V; \\ (h_k \rho_k \Delta\varphi_k)_j \frac{\Delta V}{\Delta t^n} + (\Delta h_k \rho_k \varphi_k)_j \frac{\Delta V}{\Delta t^n} + (\rho_k \varphi_k h_k A)_{j+1/2} U_{j+1/2}^{n+1} - (\rho_k \varphi_k h_k A)_{j-1/2} U_{j-1/2}^{n+1} - \\ - \varphi_{k,j} A_{j+1/2} \frac{\Delta p_j}{\Delta t^n} + U_{j+1/2}^{n+1} \varphi_{k,j+1/2} A_{j+1/2} (p_{j+1} - p_j) - U_{j-1/2}^{n+1} \varphi_{k,j-1/2} A_{j-1/2} (p_j - p_{j-1}) &= \\ = Q_{k,ext} \Delta V + \Gamma_k^+ h_{film} \Delta V - \Gamma_k^- h_k \Delta V + \sum_i Q_{i,k} \Delta V.\end{aligned}$$

Здесь  $j$  — номер расчетной ячейки;  $n$  — номер временного слоя. Скалярные величины в узлах расчетной сетки определяются следующим образом:

$$\lambda_{k,j+1/2} = \begin{cases} \lambda_{k,j}, & U_{k,j+1/2} \geq 0; \\ \lambda_{k,j+1}, & U_{k,j+1/2} < 0. \end{cases}$$

Уравнение импульса аппроксимируется конечными разностями:

$$\begin{aligned}\langle \rho_k \varphi_k \rangle_{j+1/2} \frac{U_{k,j+1/2}^{n+1} - U_{k,j+1/2}^n}{\Delta t^n} + \langle \rho_k \varphi_k \rangle_{j+1/2} U_k \frac{U_{k,j+1/2}^{n+1} - U_{k,j-1/2}^{n+1}}{\Delta z_{j+1/2}} + \langle \varphi_k \rangle_{j+1/2} \frac{p_{j+1}^{n+1} - p_j^{n+1}}{\Delta z_{j+1/2}} &= \\ = -\langle \rho_k \varphi_k \rangle_{j+1/2} g \cdot \sin \theta + \varphi_{k,j+1/2} \Gamma_k^+ (U_{film} - U_{k,j+1/2}^{n+1}) + \sum_i \tau_{i,k}.\end{aligned}$$

В уравнении импульса скалярные величины  $\lambda$  на границах ячеек определены так:

$$\langle \lambda \rangle_{j+1/2} = \frac{\lambda_{j+1} \Delta z_j + \lambda_j \Delta z_{j+1}}{\Delta z_{j+1} + \Delta z_j}.$$

### Результаты тестовых расчетов по движению компонентов разрушенных твэлов в ТВС

Моделирование переноса компонентов разрушенного твэла в потоке теплоносителя особенно важно для моделирования протекания аварии в реальной реакторной установке при выносе частиц из активной зоны в верхнюю камеру смешения реактора. Температура теплоносителя в верхней камере смешения обычно существенно ниже температуры частиц топлива. В результате попадания нагретых частиц в камеру возможно формирование импульсов давления.

Для демонстрации применимости алгоритмов моделирования переноса в потоке теплоносителя было рассмотрено два аналитических теста.

В качестве первого теста рассмотрена задача по одновременному переносу твердых частиц стали и топлива в теплоносителе. При расчете предполагается, что скорости частиц и скорости теплоносителя равны:  $U = 0,5$  м/с. Начальное распределение стали и диоксида урана выбрано в виде "ступенек" разной длины. При переносе ступеньки должны сохранить свою форму, сдвинувшись за время  $t$  на расстояние  $Ut$ .

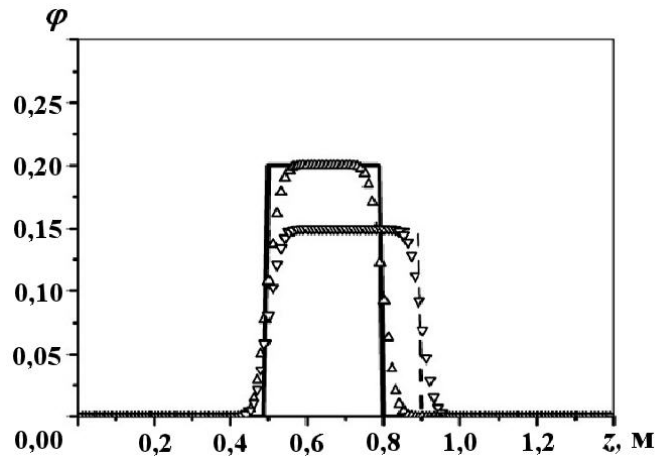


Рис. 4. Перенос частиц стали и топлива: — — аналитическое решение для стали;  $\Delta$  — расчет с помощью кода ЕВКЛИД/V2 для частиц стали; — — аналитическое решение для топлива;  $\nabla$  — расчет с помощью кода ЕВКЛИД/V2 для частиц топлива

Сравнение аналитического решения и результатов расчета через 1 с после начала переноса представлено на рис. 4. Отсутствие резких фронтов при моделировании с использованием кода ЕВКЛИД/V2 объясняется численной диффузией, характерной для большинства схем.

Второй аналитический тест рассматривает движение частиц стали в покоящемся теплоносителе и их оседание под действием силы тяжести. Подобное поведение может наблюдаться при остановке насоса и выбросе расплава в теплоноситель при разрушении твэла. Положение центра масс частиц при осаждении в зависимости от времени определяется из выражения

$$z_k = z_k(0) - U_k t. \quad (7)$$

Скорость осаждения  $U_k$  может быть найдена из баланса силы трения, действующей на частицу, силы тяжести и выталкивающей силы по формуле

$$\xi_k U_k^2 = \frac{4gD_k}{3} \left( 1 - \frac{\rho_k}{\rho_f} \right). \quad (8)$$

Здесь  $D_k$  — диаметр частицы компонента;  $\rho_f$  — плотность теплоносителя. Коэффициент трения частиц в потоке теплоносителя  $\xi_k$  сам является функцией скорости компонента [12]:

$$\xi_k = \frac{24}{Re_k} \left( 1 + 0,15 Re_k^{0,687} \right) + \frac{0,42}{1 + 4,25 \cdot 10^4 Re_k^{-1,16}}, \quad Re_k = \frac{\rho_f D_k |U_k|}{\mu_f}, \quad (9)$$

где  $\mu_f$  — динамическая вязкость теплоносителя.

Решение нелинейного уравнения (8) может быть найдено итерационно с использованием выражения (9).

Сравнение аналитического решения для координаты центра масс потока частиц (7) и результата расчета с помощью кода ЕВКЛИД/V2 представлено на рис. 5. Среднеарифметическое отклонение результата расчета от аналитического решения составило 1 %.

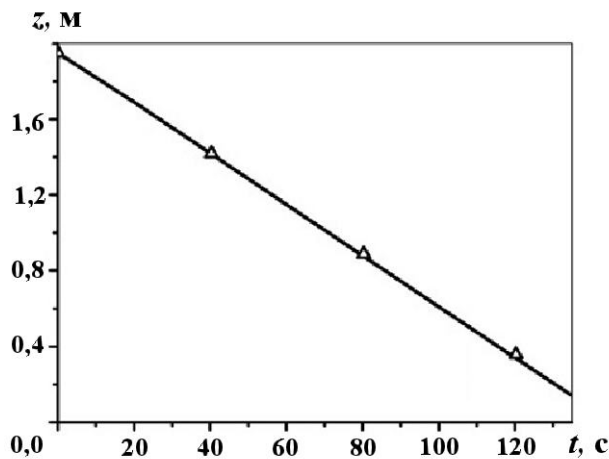


Рис. 5. Осаждение частиц стали в теплоносителе: — — аналитическое решение;  $\Delta$  — расчет с помощью кода ЕВКЛИД/V2

### Заключение

Представлены численные алгоритмы, используемые в коде ЕВКЛИД/V2 для расчета движения расплава по поверхности твэла, а также компонентов разрушенного твэла в активной зоне реактора. Для движения расплава по поверхности твэла приведены способы обработки особых ситуаций, которые могут возникать в процессе моделирования. Демонстрация применимости кода выполнена на основе задач с известными аналитическими решениями. Показано, что интегральный код ЕВКЛИД/V2 с хорошей точностью позволяет проводить моделирование перемещения расплава по поверхности твэла, а также компонентов разрушенного твэла в активной зоне реактора.

### Список литературы

1. Алипченков В. М., Беликов В. В., Васекин В. Н., Вепрев Д. П., Веретенцев В. А., Колобаева П. В., Мосунова Н. А., Стаханова А. А., Стрижов В. Ф., Усов Э. В., Муратов А. Г., Тюков В. В., Анфимов А. М., Горбунов В. С., Кузнецов Д. В., Осипов С. Л. Верификация интегрального универсального расчетного кода ЕВКЛИД/V1 применительно к установкам БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200 // Сб. докл. 3-й МНТК "Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики". 7–10 октября 2014 г. М.: ОАО "НИКИЭТ", 2014. Т. 2. С. 175–191.
2. Veprev D. P., Boldyrev A. V., Chernov S. Y., Mosunova N. A. Development and validation of the berkut fuel rod module of the Euclid/V1 integrated computer code // Annals of Nuclear Energy. 2017. Vol. 113. P. 237–245.
3. Усов Э. В., Бутов А. А., Чухно В. И., Климонов И. А., Кудашов И. Г., Жданов В. С., Прибатурин Н. А., Мосунова Н. А., Стрижов В. Ф. Моделирование процессов плавления твэла и затвердевания расплава, образующегося при термическом разрушении твэла быстрого реактора, с помощью модуля SAFR/V1 интегрального кода ЕВКЛИД/V2 // Атомная энергия. 2018. Т. 124, № 3. С. 123–126.
4. Усов Э. В., Бутов А. А., Чухно В. И., Климонов И. А., Кудашов И. Г., Жданов В. С., Прибатурин Н. А., Мосунова Н. А., Стрижов В. Ф. Моделирование перемещения расплава по



- поверхности твэла быстрого реактора при тяжелой аварии с помощью модуля SAFR/V1 интегрального кода ЕВКЛИД/V2 // Атомная энергия. 2018. Т. 124, № 4. С. 197—200.
5. Усов Э. В., Бутов А. А., Чухно В. И., Климонов И. А., Кудашов И. Г., Жданов В. С., Прибатурин Н. А., Мосунова Н. А., Стрижов В. Ф. Верификация на основе экспериментальных исследований модуля термического разрушения твэла быстрого реактора SAFR/V1 интегрального кода ЕВКЛИД/V2 // Там же. № 5. С. 243—245.
  6. Калашникова А. А., Усов Э. В. Разработка программного модуля для расчета плавления твэла и перемещения расплава в реакторных установках на быстрых нейтронах на этапе тяжелой аварии // Сб. III Рос. молодеж. конф. "Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи". Томск: Изд-во ООО "СКАН", 2015. С. 135—138.
  7. Алипченков В. М., Анфимов А. М., Афремов Д. А., Горбунов В. С., Зейгарник Ю. А., Кудрявцев А. В., Осипов С. Л., Мосунова Н. А., Стрижов В. Ф., Усов Э. В. Базовые положения, текущее состояние разработки и перспективы дальнейшего развития теплогидравлического расчетного кода нового поколения HYDRA-IBRAE/LM для моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах // Теплоэнергетика. 2016. № 2. С. 54—64.
  8. Алексеенко С. В., Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г. Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука, 1992.
  9. Усов Э. В., Бутов А. А., Дугаров Г. А., Кудашов И. Г., Лежнин С. И., Мосунова Н. А., Прибатурин Н. А. Система замыкающих соотношений двухжидкостной модели кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 для расчета процессов при кипении натрия в каналах энергетического оборудования // Теплоэнергетика. 2017. № 7. С. 48—55.
  10. Huppert H. E. Flow and instability of a viscous current down a slope // Letters to Nature. 1982. Vol. 300. P. 427—429.
  11. Suzuki T., Tobita Y., Kondo S., Saito Y., Mishima K. Analysis of gas-liquid metal two-phase flows using a reactor safety analysis code SIMMER-III // Nucl. Eng. Des. 2003. Vol. 220. P. 207—223.
  12. Clift R., Gauvin W. H. Motion of entrained particles gas streams // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 1971. Vol. 49, Issue 4. P. 439—448.

Статья поступила в редакцию 26.07.18.

SPECIFIC FEATURES OF ALGORITHMS IN EVKLID/V2 CODE FOR NUMERICAL SIMULATION OF MOVING MOLTEN MATERIAL IN FAST REACTOR DURING A SEVERE ACCIDENT / E. V. Usov, A. A. Butov, V. I. Chukhno, I. A. Klimonov, I. G. Kudashov, N. A. Pribaturin, N. A. Mosounova, V. F. Strizhov (IBRAE of RAS, Novosibirsk Branch; IBRAE of RAS, Moscow).

To justify safety of advanced reactor plants with a liquid-metal coolant, there is a need in a set of computer codes to simulate severe off-design accidents with core melting. For these purposes, the integral EVKLID/V2 code has been developed at the RAS IBRAE. Its current version allows simulating the behavior of fast-neutron reactors with liquid-metal coolants under stationary and transient operation conditions, as well as their behavior during different design-basis accidents, by carrying out coupled neutron-physical, thermomechanical, and thermal-hydraulic simulations. The focus is on the SAFR/V1 module used to simulate the thermal breakdown of a fuel element.

*Keywords:* SAFR/V1, HYDRA-IBRAE/LM, the EVKLID/V2 code, fuel element, core, mathematical modeling, molten mass.

---