

АТОМНЫЕ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИИВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ МОДУЛЯ HEFEST-FR
ИНТЕГРАЛЬНОГО КОДА ЕВКЛИД/V2¹

© 2024 г. С. В. Цаун^а, *, А. А. Бутов^а, И. А. Климонов^а, Е. В. Моисеенко^а,
Н. А. Мосунова^а, В. Ф. Стрижов^а, Э. В. Усов^а, В. И. Чухно^а

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

*e-mail: tsaun@ibrae.ac.ru

Поступила в редакцию 15.03.2024 г.

После доработки 22.07.2024 г.

Принята к публикации 05.08.2024 г.

Для обоснования безопасности реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем разрабатывается интегральный код ЕВКЛИД/V2 и проводятся его верификация и валидация в целях аттестации в НТЦ ЯРБ. Одной из главных частей интегрального кода является тяжелоаварийный блок, включающий в себя модуль SAFR для расчета разрушения твэлов, тепловыделяющих сборок (ТВС) и всей активной зоны, а также модуль HEFEST-FR для расчета удержания и расхолаживания расплава в устройстве сбора топлива реакторной установки (РУ) с натриевым теплоносителем. В модуле HEFEST-FR реализована возможность двумерного моделирования поведения расплава конструктивных элементов и топлива в реакторных установках с жидкометаллическим теплоносителем. В соответствии с требованиями НТЦ ЯРБ для применения модуля HEFEST-FR в составе кода ЕВКЛИД/V2 для анализа безопасности РУ на быстрых нейтронах (БН) требуется его валидация с использованием доступных экспериментальных данных, сопровождающаяся анализом неопределенностей и чувствительности и оценкой погрешности результатов расчетов. Приведены результаты верификации модуля HEFEST-FR интегрального кода ЕВКЛИД/V2 на решении аналитической задачи установления стационарной температуры однородного ограниченного цилиндра при равномерном подогреве снизу с граничными условиями третьего рода и на решении однофазной задачи Стефана, а также результаты валидации модуля HEFEST-FR на базе эксперимента SCARABEE BF1. Показано, что среднее абсолютное отклонение численного расчета от аналитического решения задачи установления стационарной температуры однородного ограниченного цилиндра при равномерном подогреве снизу с граничными условиями третьего рода составляет около 1.1 К. Максимальное относительное отклонение результатов расчетов по программе для ЭВМ от результатов аналитического решения задачи Стефана (определение фронта расплава) составляет 0.46%. Оценка погрешностей моделирования с помощью модуля удержания расплава в составе кода ЕВКЛИД/V2 (HEFEST-FR) на базе теста BF1 эксперимента SCARABEE показала, что погрешность вычисления температуры лежит в интервале $[-82.3; 182.5]$ К, а погрешность вычисления радиального теплового потока — в интервале $[-55.2; 31.2]$ кВт/м².

Ключевые слова: модуль HEFEST-FR, интегральный код ЕВКЛИД/V2, верификация, валидация, реактор на быстрых нейтронах, натриевый теплоноситель, тяжелая авария, расплав топлива

DOI: 10.56304/S0040363624700474

Для обоснования безопасности реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем (в том числе и проектируемой РУ БН-1200М) разрабатывается интегральный код ЕВКЛИД/V2

[1] и проводятся его верификация и валидация в целях аттестации в НТЦ ЯРБ. Термины “верификация” и “валидация” используются в смысле, описанном в [2, 3]. Под верификацией понимается проверка того, что программа для ЭВМ работает корректно и не содержит ошибок программирования, а под валидацией — обоснование адекватности воспроизведения физических явлений с оценкой погрешности результата расчета.

Одной из главных частей интегрального кода является тяжелоаварийный блок, включающий в себя модуль SAFR [4] для расчета разрушения

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Госкорпорации “Росатом” (государственный контракт № Н.40.241.19.21.1068 от 14.04.2021 на выполнение научно-исследовательских работ “Разработка интегрированных систем кодов нового поколения для разработки и обоснования безопасности ядерных реакторов, проектирования атомных электростанций, создания технологий и объектов ядерного топливного цикла. Этап 2021–2023 гг.”).

твэлов, тепловыделяющих сборок и всей активной зоны, а также модуль HEFEST-FR [5] для расчета удержания и расхолаживания расплава в устройстве для сбора топлива РУ с натриевым теплоносителем. При расчете аварии с плавлением активной зоны информация о массе, температуре и составе расплава передается из модуля SAFR в модуль HEFEST-FR с помощью обменных структур интегрального кода.

В работе [5] приведено описание модуля HEFEST-FR в составе кода ЕВКЛИД/V2. В модуле HEFEST-FR реализована возможность двумерного моделирования поведения расплава конструктивных элементов и топлива в устройствах для удержания расплава в реакторных установках с жидкометаллическим теплоносителем. Для демонстрации корректности программной реализации численного метода решения уравнения теплопроводности в [5] проведена верификация модуля HEFEST-FR на аналитическом решении задачи теплопроводности в неограниченном сплошном цилиндре с граничным условием третьего рода. В соответствии с требованиями НТЦ ЯРБ для использования модуля HEFEST-FR в составе кода ЕВКЛИД/V2 для анализа безопасности РУ БН требуется валидация модуля с привлечением доступных экспериментальных данных, сопровождающаяся анализом неопределенностей и чувствительности и оценкой погрешности результатов расчетов.

В данной статье приведены результаты верификации модуля HEFEST-FR на решении двумерной аналитической задачи определения стационарного температурного поля ограниченного цилиндра с локализованным торцевым источником тепла и аналитическом решении одномерной, однофазной задачи Стефана. В настоящее время ощущается недостаток экспериментальных данных, которые могут быть использованы для валидации модуля применительно к РУ БН. Из наиболее известных и доступных можно отметить эксперименты SCARABEE BF1, проведенные во Франции в исследовательском центре в г. Кадараш.

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДУЛЯ HEFEST-FR НА АНАЛИТИЧЕСКОМ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ОГРАНИЧЕННОГО ЦИЛИНДРА С ЛОКАЛИЗОВАННЫМ ТОРЦЕВЫМ ИСТОЧНИКОМ

В разделе рассматривается верификация модели разогрева материала в поддоне устройства для сбора топлива РУ БН-1200М на аналитическом стационарном решении двумерного уравнения теплопроводности. Для этого численное решение, полученное с помощью модуля HEFEST-FR

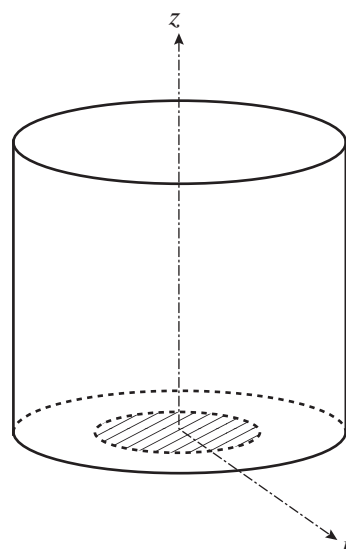


Рис. 1. Схема для решения аналитической задачи определения стационарного температурного поля ограниченного цилиндра с локализованным торцевым источником

в составе кода ЕВКЛИД/V2, сравнивалось с аналитическим решением двумерной задачи установления стационарной температуры однородного ограниченного цилиндра при равномерном подогреве снизу.

Аналитическое решение

На рис. 1 показана схема для решения аналитической задачи определения стационарного температурного поля ограниченного цилиндра с локализованным торцевым источником. На нижнем торце цилиндра расположен плоский источник тепла в виде круга, центр которого совмещен с центром основания цилиндра. Свободная от нагрева часть нижней поверхности цилиндра предполагается адиабатически изолированной (отсутствует тепловой поток). С боковой поверхности и верхнего торца цилиндра производится конвективный отвод тепла. Температура окружающей среды предполагается постоянной. В предположении осевой симметрии требуется определить стационарное распределение температуры $T(r, z)$. Постановку и аналитическое решение этой задачи можно найти, например, в работах [6, 7].

В цилиндрической системе координат (r, φ, z) в предположении симметрии по углу φ двумерная стационарная задача теплопроводности формулируется для функции ϑ

$$\vartheta(r, z) = T(r, z) - T_{\text{ср}} \quad (1)$$

в виде

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial r} \Big|_{r=R} + \frac{\alpha_1}{\lambda} \vartheta \Big|_{r=R} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial z} \Big|_{z=H} + \frac{\alpha_2}{\lambda} \vartheta \Big|_{z=H} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial z} \Big|_{z=0} = \begin{cases} \frac{P_T}{\pi r_T^2 \lambda} & \text{при } r \leq r_T; \\ 0 & \text{при } r \geq r_T, \end{cases} \quad (6)$$

где T_{cp} — температура окружающей среды, К; α_1 , α_2 — коэффициенты теплоотдачи с боковой поверхности и верхнего торца цилиндра, Вт/(м² · К); λ — коэффициент теплопроводности материала цилиндра, Вт/(м · К); R — радиус цилиндра, м; H — высота цилиндра, м; P_T — тепловая мощность, Вт, выделяющаяся в центральной части нижней торцевой поверхности радиусом r_T , м.

Значения α_1 , α_2 , λ , P_T и T_{cp} постоянны во времени и пространстве.

Аналитическое решение задачи (2)–(6) имеет вид

$$\vartheta(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{C_n} \vartheta_n(z) J_0 \frac{\mu_n}{R} r, \quad (7)$$

где

$$C_n^2 = \frac{R^2}{2} J_0^2(\mu_n) \left[1 + \left(\frac{\alpha_1 R}{\lambda \mu_n} \right)^2 \right]; \quad (8)$$

$$\vartheta_n(z) = G_n \exp\left(-\frac{\mu_n}{R} z\right) + D_n \exp\left[-\frac{\mu_n}{R} (H - z)\right]; \quad (9)$$

$$D_n = \frac{k_1 k_4}{k_2 + k_1 k_3}; \quad (10)$$

$$G_n = k_3 D_n - k_4; \quad (11)$$

$$k_1 = \left(\frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{\mu_n}{R} \right) \exp\left(-\frac{\mu_n H}{R}\right); \quad (12)$$

$$k_2 = \frac{\alpha_2}{\lambda} + \frac{\mu_n}{R}; \quad (13)$$

$$k_3 = \exp\left(-\frac{\mu_n H}{R}\right); \quad (14)$$

$$k_4 = H_n \frac{R}{\mu_n}; \quad (15)$$

$$H_n = -\frac{P_T R}{\pi r_T \lambda \mu_n C_n} J_1 \frac{\mu_n r_T}{R}, \quad (16)$$

где μ_n — корни уравнения

$$\mu J_1(\mu) - \frac{\alpha_1 R}{\lambda} J_0(\mu) = 0; \quad (17)$$

$J_0(\mu)$, $J_1(\mu)$ — функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков.

Задачу (2)–(6) решали при следующих исходных данных: $R = 2.5$ м; $H = 0.5$ м; $T_{cp} = 800$ К; $\alpha_1 = 1000$ Вт/(м² · К); $\alpha_2 = 1000$ Вт/(м² · К); $\lambda = 200$ Вт/(м · К); $P_T = 10^6$ Вт; $r_T = 2.5$ м.

Результаты верификации

Для численного решения задачи (2)–(6) использовали модуль HEFEST-FR в составе кода ЕВКЛИД/V2. Область решения $\{0 < r < R, 0 < z < H\}$ разбивается на N_z аксиальных слоев и N_r радиальных слоев. Для моделирования с помощью модуля HEFEST-FR необходимо задать свойства материала цилиндра (теплопроводность λ , удельную теплоемкость c_p и плотность ρ). Поскольку ищется стационарное решение задачи теплопроводности, то значения c_p и ρ можно взять произвольными — от них будет зависеть только время выхода на стационарное решение. Значения λ , c_p и ρ предполагаются постоянными в пространстве и времени. Для численного моделирования использовали следующие значения параметров: $\lambda = 200$ Вт/(м · К), $c_p = 500$ Дж/(кг · К), $\rho = 8000$ кг/м³. Были также заданы граничные условия (3)–(6). В результате численного решения была найдена температура на пространственной сетке $T(r_i, z_j)$, $i = 1, N_r$; $j = 1, N_z$.

Поскольку стационарное решение находится методом установления, анализ сходимости численного решения проводился не только по пространственному разбиению, но и по временному шагу. Была получена сходимость в обоих случаях.

На рис. 2 показаны линии уровня $T(r, z) = \text{const}$ для аналитического и численного решений задачи (2)–(6).

Разницу ε между решениями $T_1(i, j)$ и $T_2(i, j)$ на двумерной сетке $\{r(i), z(j), i = 1, N_r; j = 1, N_z\}$ вычисляли по формуле

$$\varepsilon(T_1, T_2) = \frac{1}{N_r N_z} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_z} |T_1(i, j) - T_2(i, j)|. \quad (18)$$

Среднее абсолютное отклонение численного расчета от аналитического решения, полученное с помощью формулы (18), равно примерно 1.1 К.

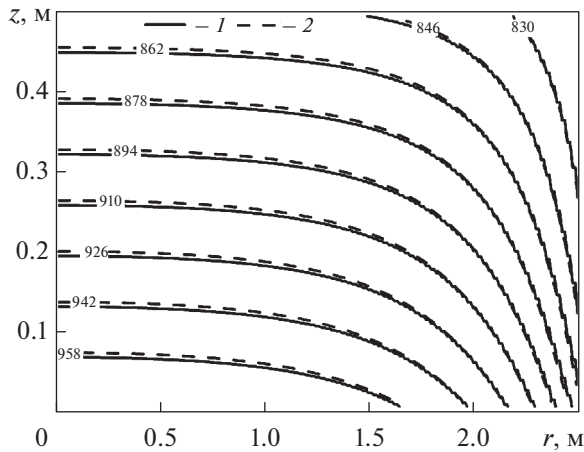


Рис. 2. Линии уровня $T(r, z) = \text{const}$.
1 – стационарное численное решение для варианта $Nr = 100$, $Nz = 40$; 2 – аналитическое решение задачи (2)–(6); 830–958 – температура, К

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДУЛЯ HEFEST-FR НА АНАЛИТИЧЕСКОМ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ СТЕФАНА О ДВИЖЕНИИ ГРАНИЦЫ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В ПОЛОМ ЦИЛИНДРЕ

В разделе приведены результаты верификации модуля удержания расплава в составе кода ЕВКЛИД/V2 на аналитическом решении задачи Стефана о движении границы фазового перехода в полном цилиндре.

Постановка задачи и аналитическое решение

Рассмотрен длинный полый цилиндр внутренним радиусом R_{in} и внешним радиусом R_{out} , заполненный материалом, находящимся в твердом состоянии. В качестве начальной температуры материала принята температура плавления T_m (m – от англ. melting). На рис. 3 показана схема для одномерной, однофазной задачи Стефана о движении фазовой границы в полном цилиндре. Окружность, выполненная пунктирной линией, означает границу $[r = R(t)]$, отделяющую жидкую фазу $[R_{in} \leq r < R(t)]$ от твердой $[R(t) < r \leq R_{out}]$. Нагрев происходит с внутренней стороны цилиндра и задается потоком тепла на внутренней границе q_l (l – от англ. liquid). В предположении, что теплофизические свойства материала постоянны, одномерную, однофазную задачу Стефана можно представить в следующем виде:

$$\rho_l c_{p,l} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_l}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad R_{in} < r < R(t), \quad t > 0; \quad (19)$$

$$T[R(t), t] = T_m, \quad t > 0; \quad (20)$$

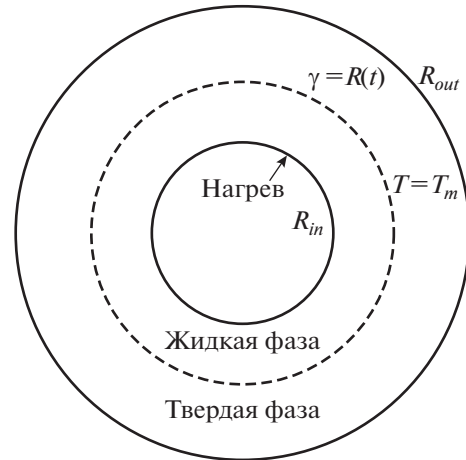


Рис. 3. Схема для задачи Стефана о движении фазовой границы в полном цилиндре

$$\rho_l Q_l \frac{\partial R(t)}{\partial t} = -\lambda_l \frac{\partial T[R(t), t]}{\partial r}, \quad t > 0; \quad (21)$$

$$R(0) = R_{in}; \quad (22)$$

$$-\lambda_l \frac{\partial T(R_{in}, t)}{\partial r} = q_l = \text{const} > 0, \quad t > 0, \quad (23)$$

где T – температура, К; t – время, с; ρ_l – плотность жидкой фазы, кг/м³; $c_{p,l}$ – удельная теплоемкость жидкой фазы, Дж/(кг · К); λ_l – коэффициент теплопроводности жидкой фазы, Вт/(м · К); Q_l – удельная теплота плавления, Дж/кг; q_l – поток тепла на внутренней границе, Вт/м².

Требуется найти временную зависимость радиуса раздела фаз $R(t)$. Приближенное квазистационарное решение задачи (19)–(23) приведено в [8] в виде

$$R(t) = \sqrt{R_{in}^2 + 2 \frac{R_{in}}{\rho_l Q_l} q_l t}. \quad (24)$$

Сравнение данных аналитического решения с результатами численных расчетов, полученных с помощью модуля HEFEST-FR

Задачу Стефана (19)–(23) решали при следующих предположениях. Рассматривали полый цилиндр длиной 1 м, $R_{in} = 0.001$ м, $R_{out} = 0.004$ м, $\rho_l = 11000$ кг/м³, $c_{p,l} = 300$ Дж/(кг · К), $\lambda_l = 2.5$ Вт/(м · К), $Q_l = 260$ кДж/кг, $T_m = 3120$ К. Функцию $R(t)$ определяли для значений q_l , равных 10, 15 и 20 кВт/м². Для решения задачи теплопроводности с помощью модуля HEFEST-FR на внешней границе задавали нулевой тепловой поток.

На рис. 4 приведены временные зависимости координаты фронта плавления $R(t)$, полученные при аналитическом решении и расчетах по модулю HEFEST-FR при различных тепловых потоках.

ках. Видно хорошее соответствие результатов расчета аналитическому решению. Максимальное относительное отклонение результатов расчетов по программе для ЭВМ от данных аналитического решения задачи Стефана (определение фронта расплава) составляет 0.46%. Представленные результаты свидетельствуют о применимости модуля HEFEST-FR для расчета задач по плавлению стержней при заданном тепловом потоке.

*Валидация модуля удержания расплава
в составе кода ЕВКЛИД/V2
на базе экспериментов SCARABEE BF1*

Одной из задач анализа гипотетической аварии на РУ БН является исследование плавления одной ТВС внутри активной зоны. Это возможно, например, при блокировке сечения ТВС и прекращении циркуляции теплоносителя. Для экспериментального исследования этого явления в институте IRSN (Кадараш, Франция) в период с 1983 по 1990 г. на реакторе SCARABEE было выполнено исследование по 14 экспериментальным программам [9].

В работе [10] приведено краткое описание этих экспериментальных работ. По программе BE+ исследовалось поведение 19- и 37-стержневых сборок при внутренней блокировке сечения, в эксперименте PI-A – поведение потока натрия в чехловом зазоре 23-стержневой сборки, в эксперименте PV-A – распространение расплава в горизонтальной 22-стержневой сборке. В тигельных экспериментах BF изучалось поведение расплава топлива при увеличении мощности нагрева, в экспериментах APL – поведение топлива в 19- и 37-стержневых сборках при уменьшении расхода теплоносителя, по программе BE – поведение 37-стержневой сборки при блокировке сечения перед началом нагрева.

Модуль HEFEST-FR предназначен для моделирования поведения расплава в поддоне устройства для сбора топлива в РУ с натриевым теплоносителем. Из экспериментальных программ на реакторе SCARABEE для валидации модуля HEFEST-FR подходит только тигельный эксперимент BF (образовывалась ванна расплава), поскольку остальные эксперименты проводились для стержневыхборок. Поэтому для валидации модуля HEFEST-FR использовали тигельный эксперимент BF1 (“Bain Fondu” – “Ванна расплава”), при котором в стальном тигле внутренним диаметром 60 мм плавится около 5 кг топлива UO_2 с 15%-ным обогащением. Снаружи тигель охлаждается жидким натрием. Тест BF1 был выполнен на реакторе SCARABEE в апреле 1985 г. [9].

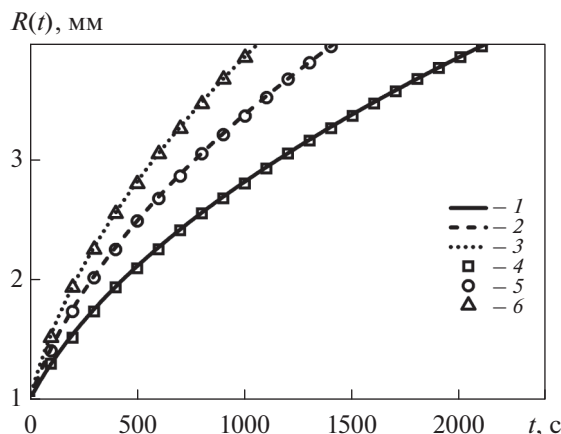


Рис. 4. Временные зависимости координаты фронта плавления $R(t)$, полученные для аналитического решения задачи Стефана (1–3) и с помощью расчетов по модулю HEFEST-FR (4–6).
 q_b , кВт/м²: 1, 4 – 10; 2, 5 – 15; 3, 6 – 20

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Описание экспериментальных исследований заимствовано из работы [9].

На рис. 5 показана схема участка, который использовался для эксперимента SCARABEE BF1. В стальной тигель внутренним диаметром 60 мм и толщиной стенки 4.6 мм засыпаются топливные таблетки, изготовленные из UO_2 . Во время эксперимента таблетки нагреваются при облучении нейтронами и плавятся. Стенки тигля охлаждаются жидким натрием при начальной температуре 250°C, который течет по кольцевому каналу шириной 3 мм при постоянном расходе 5.91 м³/ч.

Экспериментальный участок размещался в активной зоне реактора SCARABEE, где происходили разогрев топливных таблеток и их плавление. В эксперименте было несколько ступеней подъема мощности нагрева. На первой ступени (временной интервал от 450 до 1000 с) объемная мощность в топливе равнялась 48 Вт/см³, на последней ступени (временной интервал от 3000 до 3500 с) – 140 Вт/см³. Уже на втором плато (временной интервал от 1200 до 1600 с, удельная мощность примерно 79 Вт/см³) в эксперименте началось кипение топлива.

В модуле HEFEST-FR моделируется только процесс плавления, поэтому расчеты и сравнение с экспериментом проводились только для первой ступени нагрева (первые 1000 с эксперимента).

На рис. 6 показана временная зависимость объемной мощности P_v (v – от англ. volumetric) нагрева топлива для первой ступени эксперимента [9]. Объемный расход натрия при начальной температуре 250°C, который подавался в кольце-

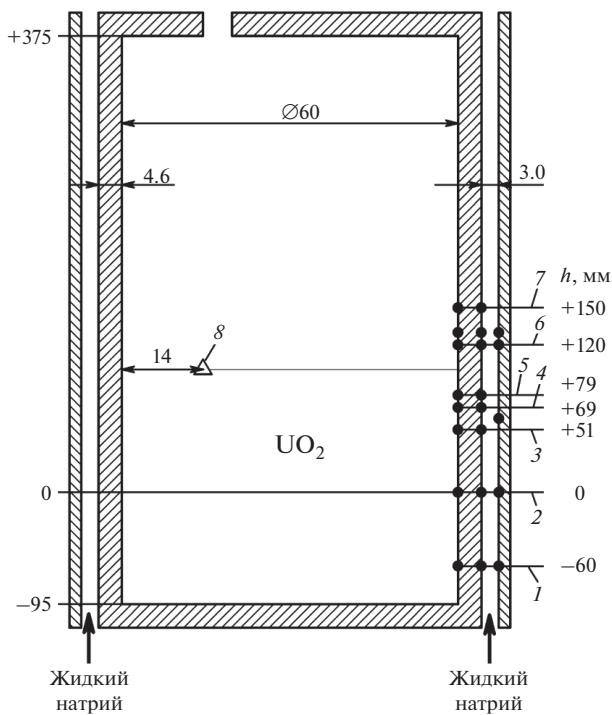


Рис. 5. Схема участка в эксперименте SCARABEE BF1. 1–7 – сечения, в которых измеряется радиальный тепловой поток; 8 – место в районе верхней границы слоя топлива, где температура измеряется ультразвуковым термометром; h – высотная отметка

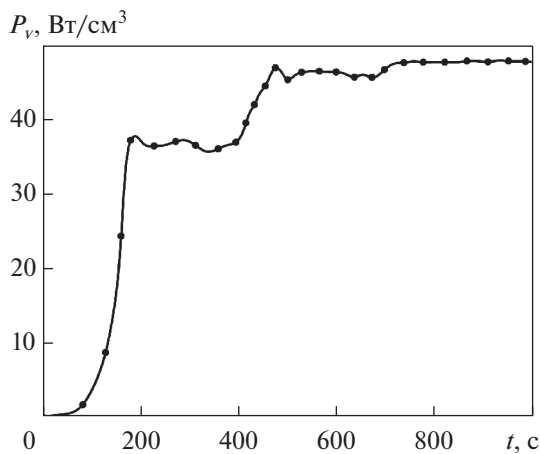


Рис. 6. Временная зависимость объемной мощности в эксперименте SCARABEE BF1 [9]

вой канал для охлаждения стенок тигля, был постоянен и равен $5.91 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Локальная температура в районе верхней границы слоя топлива (см. рис. 5) измерялась ультразвуковым термометром (рис. 7) [9]. Точность измерения температуры (с учетом точности

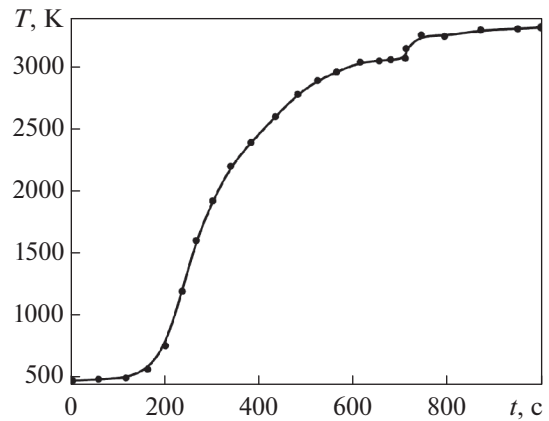


Рис. 7. Временная зависимость температуры в верхней границе слоя топлива, измеренной ультразвуковым термометром в эксперименте SCARABEE BF1 [9]

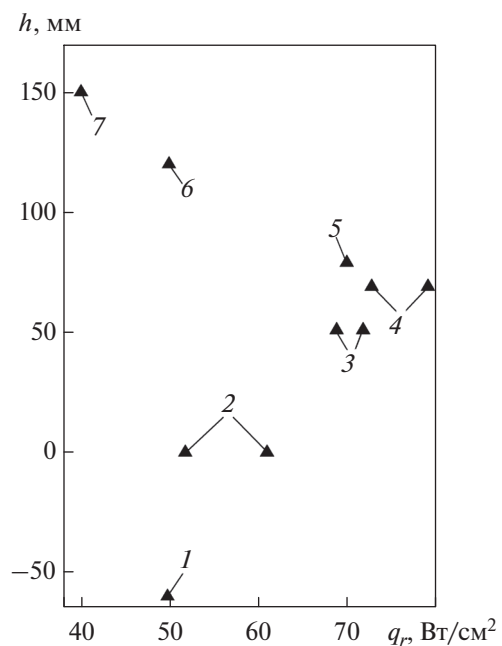


Рис. 8. Радиальный тепловой поток, измеренный в сечениях 1–7 в конце первого плато мощности [9]. Обозначения см. рис. 5

оцифровки экспериментальных данных) составляла $\pm 60 \text{ К}$.

Радиальный тепловой поток q_r (r – от англ. radial) измерялся с помощью датчиков, расположенных в сечениях 1–7 (см. рис. 5). На рис. 8 показаны значения радиального потока, измеренные в момент $t \approx 1000 \text{ с}$ [9]. Точность измерения q_r (с учетом точности оцифровки экспериментальных данных) составляла $\pm 4.32 \text{ Вт/см}^2$.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для моделирования эксперимента SCARABEE BF1 необходимо решать согласованную задачу разогрева топлива в тигле и охлаждения стенок тигля жидким натрием. Поэтому моделирование эксперимента SCARABEE BF1 проводили с помощью модуля HEFEST-FR [5] и теплогидравлического модуля HYDRA-IBRAE/LM [11] в составе кода ЕВКЛИД/V2, который обеспечивает связь между модулями. Далее приведены нодализационные схемы для описания процессов разогрева и плавления топлива в тигле (модуль HEFEST-FR) и процесса охлаждения стенок тигля жидким натрием (модуль HYDRA-IBRAE/LM).

На рис. 9 в цилиндрической системе координат (r, z) показана расчетная область для моделирования процесса плавления топлива в тигле. Параметрами пространственной сетки разбиения расчетной области являются:

Δ_{steel} — толщина стенки тигля;

Dz_{fuel} — толщина слоя топлива в начальный момент времени;

z_{fuel} — высота границы топлива в начальный момент времени ($z_{fuel} = \Delta_{steel} + Dz_{fuel}$);

z_{max} — высота тигля;

r_{int} — внутренний радиус тигля;

r_{ext} — внешний радиус тигля ($r_{ext} = r_{int} + \Delta_{steel}$);

N_{Δ} — число отрезков, на которые разбивается стенка тигля (по толщине) (одинаковые значения разбиения стенки и дна тигля);

Nz_{fuel} — число отрезков, на которые разбивается по высоте область топлива ($\Delta_{steel} \leq z \leq z_{fuel}$);

Nz_{max} — число разбиений по высоте отрезка ($z_{fuel} \leq z \leq z_{max}$);

Nr_{int} — число разбиений по радиусу отрезка ($0 \leq r \leq r_{int}$).

Для базовой нодализационной схемы разбиения тигля использовались следующие значения параметров: $\Delta_{steel} = 0.0046$ м, $Dz_{fuel} = 0.1794$ м, $z_{fuel} = 0.184$ м, $z_{max} = 0.4792$ м, $r_{int} = 0.03$ м, $r_{ext} = 0.0346$ м, $N_{\Delta} = 1$, $Nz_{fuel} = 39$ ($\Delta_{steel} \leq z \leq z_{fuel}$), $Nz_{max} = 50$, $Nr_{int} = 30$.

На рис. 10 показана нодализационная схема для численного моделирования эксперимента SCARABEE BF1 с помощью модулей HYDRA-IBRAE/LM и HEFEST-FR в составе кода ЕВКЛИД/V2. Кольцевой канал, по которому течет натрий, охлаждающий стенки тигля (см. рис. 5), моделируется с помощью теплогидравлического канала, гидравлический диаметр которого равен удвоенной ширине кольцевого канала, а площадь поперечного сечения равна площади поперечного сечения кольцевого канала. Теплогидравлический канал граничит с внешней поверхностью

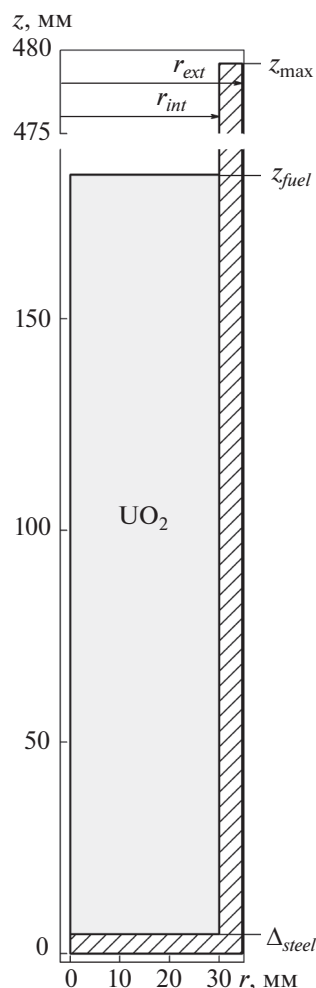


Рис. 9. Расчетная область для моделирования процесса плавления топлива в тигле

тигля, которая в этом случае моделируется тепловой структурой. Теплопередача между теплоносителем (натрием) и боковой поверхностью тигля моделируется с помощью стандартного механизма тепловых структур, разработанного для модуля HYDRA-IBRAE/LM. Температура теплоносителя и коэффициент теплопередачи на границах тигля передаются из модуля HYDRA-IBRAE/LM в модуль HEFEST-FR, тепловой поток с границ тигля из модуля HEFEST-FR — в модуль HYDRA-IBRAE/LM. На входе в канал в качестве граничного условия задается расход натрия $5.91 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($0.0016417 \text{ м}^3/\text{с}$), на выходе — давление 10^5 Па. Начальная температура теплоносителя равна 523 К . Энерговыведение в топливе было задано равномерным по объему. Временная зависимость объемной мощности тепловыделения соответствовала экспериментальной (см. рис. 6).

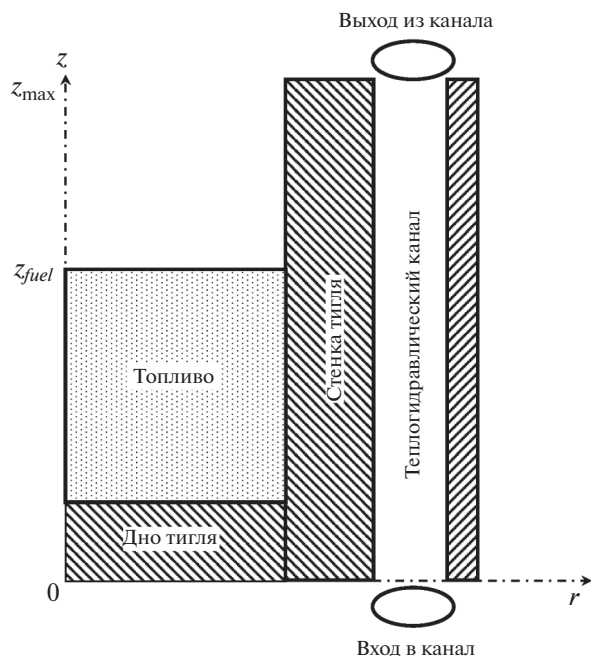


Рис. 10. Нодализационная схема для численного моделирования эксперимента SCARABEE BF1

В качестве примера численного решения задачи на рис. 11 показано двумерное распределение материалов в момент времени 1000 с.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В соответствии с действующими нормативными требованиями [12] анализы запроектных аварий атомных электростанций (ЗПА АЭС), включая тяжелые, должны выполняться на основе реалистичного (неконсервативного) подхода. При этом они должны сопровождаться оценкой погрешностей и неопределенностей полученных результатов. Соответственно и численный результат валидации программы для ЭВМ, предназначенной для моделирования тяжелых аварий, должен отражать отклонение реалистичного значения расчетного показателя от реперного, которым является полученное в эксперименте. Теоретические рекомендации по оценке неопределенностей ЗПА АЭС и практические (по достижению этих целей) представлены в [3]. Методика, разработанная в ИБРАЭ РАН с учетом рекомендаций [3], описана в работах [12–17], далее приведена ее краткая характеристика.

Согласно [3] результатом валидации является численная оценка погрешности, связанной с упрощениями и допущениями реализованной в программе для ЭВМ модели. Эта погрешность оценивается с помощью среднего различия E

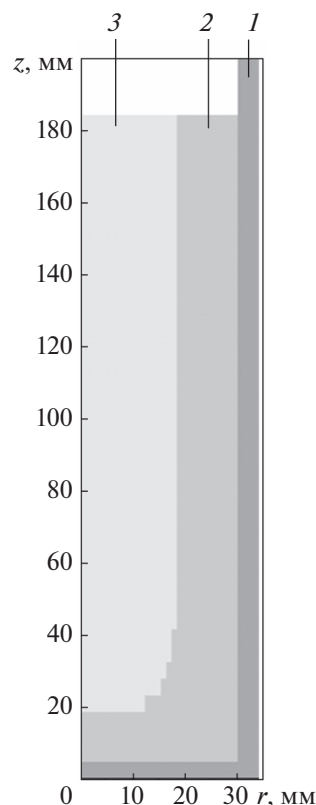


Рис. 11. Двумерное распределение материалов в момент времени 1000 с при плавлении топлива в эксперименте SCARABEE BF1.
1 — стенка тигля; 2 — твердое топливо; 3 — расплавленное топливо

между расчетным и экспериментальным значениями валидируемого параметра с учетом следующих неопределенностей:

связанной с неполнотой знаний об исходных данных для расчета u_{input} ;

обусловленной численными методами, используемыми при проведении расчетов u_{num} ;

связанной с отклонением реперного значения от истинного u_D .

Эти неопределенности комбинируются в общую неопределенность валидации u_{tot} , и результат валидации представляется в виде диапазона $[E - u_{tot}; E + u_{tot}]$. При этом, если значение u_{num} достаточно мало по сравнению с прочими неопределенностями, им можно пренебречь. Неопределенность u_{input} определяется на основании многовариантных расчетов с варьированием входных данных, являющихся, в первую очередь, характеристиками экспериментальной установки.

Анализ сходимости по аксиальной, радиальной расчетной сетке и временному шагу показал, что значения вычислительных неопределенно-

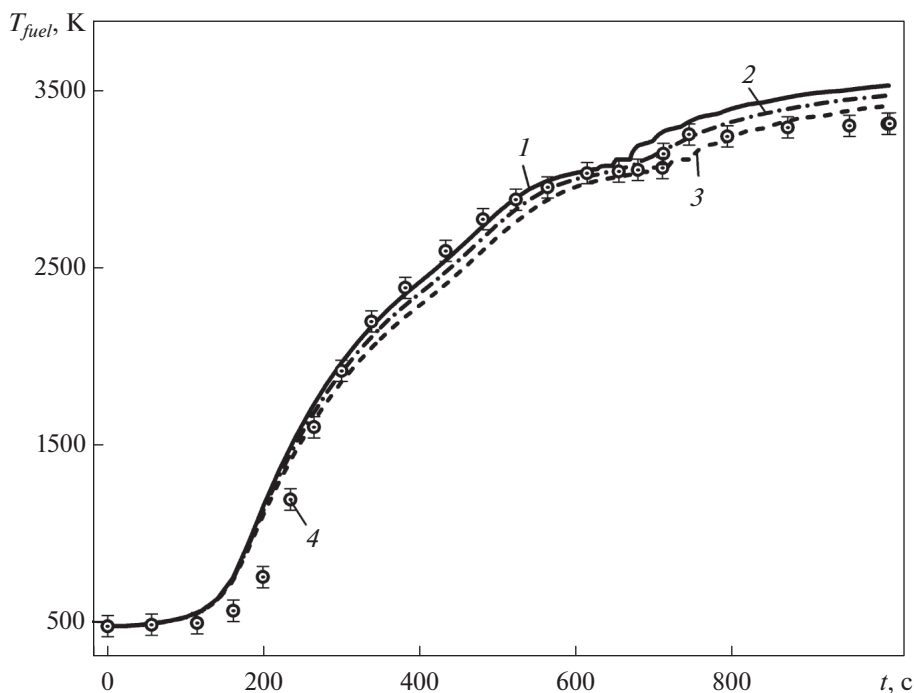


Рис. 12. Зависимость рассчитанных максимальной (1), средней (2) и минимальной (3), а также измеренной с погрешностью (4) температуры топлива T_{fuel} в точке $r = 0.01425$ м, $z = 0.1403$ м от времени

стей u_{num} много меньше экспериментальных погрешностей. Поэтому они могут не учитываться при оценке погрешности моделирования.

Для определения влияния исходных данных на результаты расчетов и отклонения результатов от экспериментальных данных проводился анализ неопределенностей расчетов и чувствительности результатов расчета с помощью методики, представленной в [13–17]. Было проведено 100 расчетов, что, с одной стороны, обеспечивает в соответствии с формулой Уилкса [14, 18] определение границ толерантного интервала результатов расчета с вероятностью не менее 0.95/0.95, а с другой — позволяет с достаточной точностью оценить чувствительность результатов по отношению к исходным данным. Для всех варьируемых параметров использовался равномерный закон распределения. Диапазоны варьирования значений параметров для эксперимента SCARABEE BF1 составили: для объемной мощности тепловыделения (P_v) $\pm 4\%$, для объемного расхода теплоносителя на входе в канал (W_{in}) $\pm 2.75 \times 10^5$ м³/с, для температуры теплоносителя на входе в канал (T_{in}) ± 23 К.

Диапазон варьирования, так же как и u_D , складывается из неопределенностей эксперименталь-

ных (оцененных экспериментаторами) и оцифрованных (оцененных авторами статьи) данных.

На рис. 12 представлены результаты статистической обработки рассчитанной зависимости температуры топлива T_{fuel} в точке $r = 0.01425$ м, $z = 0.1403$ м (место измерения температуры ультразвуковым термометром) в сравнении с экспериментальными значениями.

Чувствительность результатов расчетов температуры к варьированию отдельных параметров определяли с помощью коэффициентов многомерной линейной регрессии (поскольку зависимость близка к линейной) в десяти временных точках с 100-й секунды по 1000-ю с шагом 100 с. В табл. 1 приведены коэффициенты многомерной линейной регрессии для варьируемых параметров, рассчитанные в различных временных точках. Из таблицы следует, что наибольшее влияние на результаты расчетов оказывает варьирование объемной мощности тепловыделения. В момент времени 100 с, когда разогрев только начинается, также проявляется влияние температуры охлаждающего натрия. Варьирование расхода в этот момент влияния не оказывает, так как надежный теплоотвод обеспечивается в широком диапазоне его значений. С увеличением мощности и плавлением топлива внешнее охлаждение перестает влиять на температуру в точке, где проводились

Таблица 1. Коэффициенты многомерной линейной регрессии для варьируемых параметров, рассчитанные в различных временных точках для температуры топлива

Параметр	$t, \text{с}$								
	100	200	300	400	500	600	700	800	900
P_v	0.98	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.98	1.0	1.0
W_{in}	0.01	0	0	0	0	0.01	−0.03	0	0
T_{in}	0.29	0.02	0.01	0	0.01	−0.01	0.02	−0.01	0.01

Таблица 2. Коэффициенты многомерной линейной регрессии, рассчитанные в момент времени 1000 с для радиального теплового потока в различных точках по вертикали

Параметр	$z, \text{м}$				
	0.0339	0.0996	0.1506	0.1686	0.1786
P_v	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99
W_{in}	0	−0.01	−0.01	−0.01	−0.01
T_{in}	0.02	−0.01	−0.01	−0.01	−0.01

измерения. Это связано с тем, что точка расположена на довольно большом расстоянии от края тигля (см. рис. 5) и область расплава приближается к ней, а затем и захватывает ее (см. рис. 11). Температура расплава (фактически — перегрев, т.е. выше температуры плавления) определяется исключительно тепловыделением, а параметры охлаждения влияют на профиль температуры в нерасплавленной корке у охлаждаемой стенки.

На рис. 13 представлены результаты статистической обработки зависимости рассчитанного радиального теплового потока в момент времени

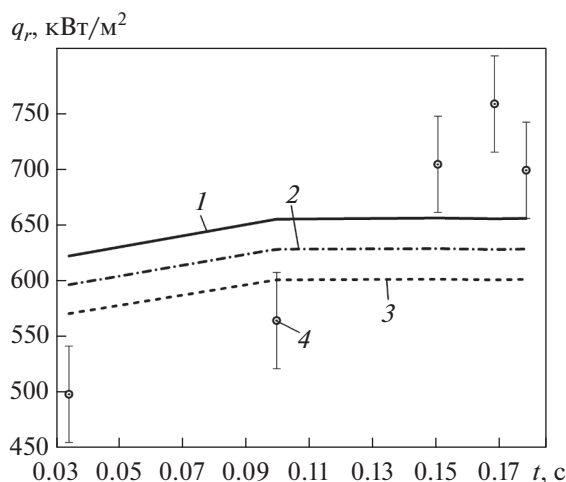


Рис. 13. Зависимость радиального теплового потока q_r в момент времени 1000 с от высоты тигля z . Обозначения см. рис. 12

Таблица 3. Абсолютные погрешности результатов валидации модуля удержания расплава в составе кода ЕВКЛИД/V2 (HEFEST-FR) на базе теста BF1 эксперимента SCARABEE

Параметр	E	u_{tot}	$[E - u_{tot}; E + u_{tot}]$
$T, \text{К}$	50.1	132.4	[−82.3; 182.5]
$q_r, \text{кВт/м}^2$	−12.0	43.2	[−55.2; 31.2]

1000 с в сравнении с экспериментальными значениями. Как и для температуры, зависимость радиального теплового потока от варьируемых параметров близка к линейной, поэтому в качестве меры чувствительности также использовались коэффициенты многомерной линейной регрессии. Чувствительность результатов расчетов определялась на момент времени 1000 с в пяти точках по вертикали (табл. 2). Из таблицы следует, что тепловой поток через боковую границу тигля определяется объемной мощностью тепловыделения, что вполне естественно, так как этот момент соответствует концу промежутка времени, когда мощность была постоянна. Температура топлива при этом менялась незначительно (см. рис. 12), т.е. состояние установки было близким к стационарному, и почти вся подводимая тепловая энергия расходовалась на охлаждение тигля.

Полученная в виде диапазона $[E - u_{tot}; E + u_{tot}]$ оценка погрешностей модуля удержания расплава в составе кода ЕВКЛИД/V2 (HEFEST-FR) на базе теста BF1 эксперимента SCARABEE приведена в табл. 3.

Как показано в [14], можно ввести уровень дискриминации коэффициентов чувствительности и на основании сравнения коэффициентов чувствительности с уровнем дискриминации разделить входные параметры на группы: наиболее сильно, умеренно и слабо влияющие на температуру топлива и радиальный тепловой поток. В данном случае такой анализ избыточен, поскольку для обоих показателей (температуры и теплового потока) имеется один параметр, оказываю-

щий ключевое влияние, — объемная мощность тепловыделения.

ВЫВОДЫ

1. Среднее абсолютное отклонение результатов численного расчета от данных аналитического решения задачи установления стационарной температуры однородного ограниченного цилиндра при равномерном подогреве снизу с граничными условиями третьего рода составляет около 1.1 К.

2. Максимальное относительное отклонение результатов расчетов по программе для ЭВМ от результатов аналитического решения задачи Стефана (определение фронта расплава) составляет 0.46%.

3. Оценка погрешностей моделирования с помощью модуля HEFEST-FR в составе кода ЕВКЛИД/V2 на базе теста BF1 эксперимента SCARABEE показала, что погрешность вычисления температуры лежит в интервале [−82.3; 182.5] К, а погрешность вычисления радиального теплового потока — в интервале [−55.2; 31.2] кВт/м².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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>
2. **Roache P.J.** Building PDE Codes to be Verifiable and Validatable // Comput. Sci. Eng. 2004. V. 6. Is. 5. P. 30.
3. **РБ-166-20.** Руководство по безопасности при использовании атомной энергии “Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций”. М.: Ростехнадзор, 2020.
4. **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.
5. **Моделирование** поведения расплава в устройстве для сбора топлива реакторной установки с натриевым теплоносителем с помощью модуля HEFEST-FR интегрального кода ЕВКЛИД/V2 / А.А. Бутов, Д.Д. Каменская, И.А. Климонов, Н.А. Мосунова, Э.В. Усов, С.В. Цаун, В.И. Чухно // Теплоэнергетика. 2023. № 11. С. 5–13.
<https://doi.org/10.56304/S0040363623110036>
6. **Овчинников С.В.** Введение в теорию теплообмена: теплопроводность в твердых телах. Саратов: Саратов. гос. ун-т, 2015.
http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/1486.pdf
7. **Карташов Э.М.** Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 2001.
8. **Alexiadis V., Solomon A.D.** Mathematical modeling of melting and freezing processes. Hemisphere Publishing Corporation, 1993.
<https://doi.org/10.1017/s0022112093213593>
9. **Kayser G.** The SCARABEE BF1 experiment with a molten UO₂ pool and its interpretation // OECD/CSNI/NEA Workshop on Large Molten Pool Heat Transfer, Nuclear Research Center Grenoble, France, 9–11 March 1994. P. 207–225.
10. **Kayser G., Charpenel J., Jamond C.** Summary of the SCARABEE-N subassembly melting and propagation tests with an application to a hypothetical total instantaneous blockage in a reactor // Nucl. Sci. Eng. 1998. V. 128. P. 144–185.
<https://doi.org/10.13182/NSE98-A1950>
11. **Мосунова Н.А.** Интегральный код ЕВКЛИД/V1 для обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Ч. 1: Базовые модели // Теплоэнергетика. 2018. № 5. С. 69–84.
<https://doi.org/10.1134/S0040363618050065>
12. **НП-001-15.** Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии “Общие положения обеспечения безопасности атомных станций”. М.: Ростехнадзор, 2015.
13. **Moiseenko E.V., Filippov A.S.** A methodology for multivariate simulation with massively parallel computing systems for NPP safety assessment: VARIA code // J. Eng. Thermophys. 2011. V. 20. No. 3. P. 249–259.
<https://doi.org/10.1134/S1810232811030039>
14. **Анализ** неопределенностей в задаче расчета взаимодействия расплава с материалом конструкций реактора типа ВВЭР / Е.В. Моисеенко, В.И. Тарасов, В.Ф. Стрижов, А.С. Филиппов // Изв. РАН. Энергетика. 2010. Т. 6. С. 105–117.
15. **Моисеенко Е.В., Мосунова Н.А.** Методика оценки неопределенностей результатов расчета для задач обоснования безопасности объектов использования атомной энергии // Вопросы радиационной безопасности. 2018. № 2 (90). С. 24–34.
16. **Ryzhov N.I., Dolganov K.S., Zvonarev Yu.A.** et al. Evaluation of uncertainties associated with best estimates of parameters in the deterministic analysis of a severe accident // Nucl. Eng. Des. 2023. V. 415. P. 112741.
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112741>
17. **Uniform** approach to validation of codes in application for conservative and realistic accidents modeling / E. Moiseenko, N. Mosunova, V. Strizhov, D. Synitsyn // BEPU-2024: Best Estimate Modelling Plus Uncertainties in Safety Analyses. Lucca, Italy, 19–24 May 2024.
18. **Wilks S.S.** Determination of sample sizes for setting tolerance limits // Annals Mathem. Statistics. 1941. V. 12. P. 91–96.

Verification and Validation of the EUCLID/V2 Integrated Code's HEFEST-FR Module

S. V. Tsaun^{a, *}, A. A. Butov^a, I. A. Klimonov^a, E. V. Moiseenko^a,
N. A. Mosunova^a, V. F. Strizhov^a, E. V. Usov^a, and V. I. Chukhno^a

^a Nuclear Safety Institute (IBRAE), Russian Academy of Sciences, Moscow, 115191 Russia

*e-mail: tsaun@ibrae.ac.ru

Abstract—For substantiating liquid metal cooled reactor plants, the EUCLID/V2 integrated code is being developed, and its verification and validation are carried out for certifying it at the Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety (NTC NRB). One of the integrated code's main parts is the severe accident block, which includes the SAFR module for calculating the destruction of fuel pins, fuel assemblies (FAs) and the entire core, as well as the HEFEST-FR module for calculating the melt retention and cooling down in the sodium-cooled reactor core catcher. The HEFEST-FR module implements the possibility to perform 2D simulation of the structural elements and fuel melt behavior in liquid metal cooled reactor plants. In accordance with the NTC NRB requirements, for the HEFEST-FR module to be used as part of the EUCLID/V2 code for analyzing the safety of fast reactors, it must be validated with the use of available experimental data; the validation shall be accompanied with an uncertainty and sensitivity analysis and assessment of the calculation result error. The article presents the results obtained from verification of the EUCLID/V2 integrated code HEFEST-FR module through solving the analytical problem of settling a stationary temperature of a homogeneous bounded cylinder uniformly heated from below with boundary conditions of the third kind and through solving the Stefan single-phase problem, as well as the results of validating the HEFEST-FR module based on the SCARABEE BF1 experiment. It is shown that the average absolute value by which the numerical calculation deviates from the analytical solution of the problem of settling a stationary temperature of a homogeneous bounded cylinder uniformly heated from below with boundary conditions of the third kind makes approximately 1.1 K. The maximum relative deviation of the results of calculations carried out using the computer program from the results of analytical solution of the Stefan problem (determination of the melt front) makes 0.46%. An assessment of the errors of modeling using the melt retention module as part of the EUCLID/V2 code (HEFEST-FR) based on the BF1 test of the SCARABEE experiment has shown that the temperature calculation error lies in the interval $[-82.3; 182.5]$ K, and the error of calculating the radial heat flux lies in the interval $[-55.2; 31.2]$ kW/m².

Keywords: HEFEST-FR module, EUCLID/V2 integrated code, verification, validation, fast reactor, sodium coolant, severe accident, fuel melt