

УДК 532

**Физические модели тяжелоаварийного модуля SAFR
интегрального кода ЕВКЛИД/V2
для расчета перемещения расплава оболочки
по поверхности ТВЭЛа***

**Э.В. Усов¹, П.Д. Лобанов², В.И. Чухно¹, И.А. Климонов¹, Н.А. Мосунова¹,
С.И. Лежнин¹, Н.А. Прибатурин¹**

¹*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
Москва*

²*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: usovev@gmail.com

Представлены модели тяжелоаварийного модуля SAFR, используемые для расчета движения расплава оболочки по поверхности ТВЭЛа при его плавлении, применительно к тяжелым авариям в охлаждаемых жидким металлом реакторах на быстрых нейтронах. Обоснован выбор базовой системы уравнений и замыкающих соотношений. Модели валидированы на базе экспериментов по плавлению и движению расплава имитаторов оболочки. Оценена погрешность расчета по потере массы оболочкой из-за ее плавления и стекания по поверхности ТВЭЛа.

Ключевые слова: ядерная энергетика, ТВЭЛ, тяжелая авария, расплав, пленка, ручейки.

Введение

Адекватный расчет всех стадий аварии требует детального анализа происходящих в реакторе в случае аварии физических процессов. Наиболее серьезными являются тяжелые аварии с разрушением активной зоны. Моделирование тяжелой аварии на ядерном реакторе и ее последствий является ключевым элементом в обеспечении безопасности атомных электростанций. Разрушение ТВЭЛов — один из важнейших процессов при деградации активной зоны, который необходимо рассчитывать. Начальный этап разрушения связан с плавлением оболочки. По этой причине в настоящей работе акцент сделан на модельных подходах, которые могут быть использованы для расчета стекания и теплообмена расплава с поверхностью ТВЭЛа.

* Исследование проведено в рамках государственного контракта № Н.4о.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 годов».

В ИБРАЭ РАН разрабатываются методы моделирования тяжелых аварий с деградацией активной зоны реакторов на быстрых нейтронах с разными видами топлива (оксидное, металлическое, нитридное) и различными типами жидкометаллических теплоносителей (натриевым, свинцовым). Данные методы внедряются в программный модуль SAFR [1, 2], являющийся частью интегрального кода ЕВКЛИД/V2 [3]. От того, насколько детально и корректно методики воспроизводят реальные физические процессы, происходящие на этапе разрушения активной зоны, зависит точность моделирования физических процессов. В представленной работе основное внимание уделяется анализу, обоснованию и валидации подходов для расчета перемещения расплава по поверхности ТВЭЛа с учетом теплообмена и трения с теплоносителем и поверхностью ТВЭЛа. Процессы срыва расплава с поверхности и уноса в ядро потока теплоносителя в представленной работе не рассматриваются.

Базовая система уравнений движения расплава

Для моделирования перемещения расплава используется система квазиодномерных уравнений баланса массы, энергии и импульса:

$$\begin{cases} \partial \rho_m S / \partial t + \partial \rho_m U S / \partial z = \Gamma_m, \\ \rho_m S \partial U / \partial t + \partial [(\chi - 1) \rho_m S U^2] / \partial z + \rho_m S U \partial U / \partial z = -S \partial p / \partial z + \\ + \Gamma_m (U_m - U) + (\rho_m - \rho_c) g S \sin \theta + \tau_c \Pi_c - \tau_w \Pi_w + \sigma \Pi_w \cos \theta_w \delta(z - z_i), \\ \partial \rho_m h S / \partial t + \partial \rho_m h U S / \partial z = q_w \Pi_w + q_c \Pi_c + \Gamma_m h_m, \end{cases} \quad (1)$$

здесь U — средняя скорость пленки расплава в текущей точке, ρ_m — плотность расплава, Γ_m — источник массы из-за плавления/затвердевания материалов (кг/м/с), τ_c — напряжение трения расплава на границе с теплоносителем, τ_w — напряжение трения расплава с поверхностью ТВЭЛа, p — давление, σ — поверхностное натяжение, ρ_c — плотность теплоносителя, θ_w — контактный угол между расплавом и поверхностью ТВЭЛа, $\delta(z - z_i)$ — дельта-функция, определяющая, что сила поверхностного натяжения в месте контакта приложена к границе «расплав – твердое тело», z_i — координата границы расплава, U_m — скорость источника массы, S — площадь поперечного сечения расплава, q_w , q_c — интенсивность теплообмена расплава с поверхностью ТВЭЛа и теплоносителя соответственно, Π_c , Π_w — соответственно смачиваемые периметры для расплава, соприкасающегося с потоком теплоносителя и поверхностью ТВЭЛа, коэффициент χ учитывает наличие профиля скорости вдоль толщины расплава. Для ламинарной пленки, стекающей под действием силы тяжести, χ равен 6/5 [4]. Для турбулентного режима стекания тонкой пленки в предположении о степенном профиле скорости с показателем степени 1/7 [4, 5] χ равен 64/63. Выталкивающая сила в уравнении сохранения импульса учтена членом $(\rho_m - \rho_c) g S \sin \theta$. Данный член особенно важен при рассмотрении разрушения ТВЭЛа в свинцовом теплоносителе, поскольку расплавление оболочки наступает раньше вскипания свинца, поэтому перемещение расплава оболочки будет определяться действием выталкивающей силы из-за высокой плотности жидкого свинца.

Представленная система уравнений позволяет рассчитать скорость движения расплава, его температуру и массу в заданной точке по высоте ТВЭЛа (координата z) и в заданный момент времени (t). Правые части уравнений сохранения содержат члены,

которые позволяют рассчитать скорость обмена массой, импульсом и энергией между поверхностью ТВЭЛа и расплавом. Определение вида этих членов является нетривиальной задачей. Для ее решения требуется привлекать соотношения, полученные либо аналитически, либо экспериментально. При этом вид членов зависит от режима течения расплава. Приведем обоснование выбора режимов течения расплава, используемых в модуле SAFR.

Режимы течения расплава

Методики расчета движения расплава по поверхности ТВЭЛа в быстром натриевом реакторе разрабатывались и совершенствуются в настоящее время различными группами ученых из США [4–7], Японии [8], Европы [9], Индии [10] и СССР/России [11, 12]. Во многих предлагаемых методиках используется предположение о пленочном характере стекания расплава. Проведенные в последнее время модельные эксперименты по движению расплава легкоплавких металлов по внешней поверхности цилиндра [13, 14] и анализ плавления имитаторов оболочки ТВЭЛ [15, 16] показали, что при гравитационном стекании и обдуве газовым потоком [13, 04] наблюдается формирование ручейков и капель, а при плавлении имитатора оболочки ТВЭЛа реализуются как капельно-ручейковое, так и пленочное течения [15, 16]. Подобные режимы наблюдались и в экспериментах серии STAR в Германии [17] по плавлению оболочек ТВЭЛов из нержавеющей стали.

Авторами представленной работы также проводились эксперименты по исследованию движения расплава легкоплавкого металла (олова) при обдуве восходящим потоком аргона. Некоторые результаты визуализации перемещения расплава под действием трения с потоком газа показаны на рис. 1. Было установлено, что расплав, стекая сплошным потоком по поверхности, собирался вблизи холодного днища имитатора топлива (рис. 1а). Взаимодействие потока газа с расплавом, собравшимся в нижней части ТВЭЛа, приводило к срыву капель и их уносу в поток (рис. 1б–1д).

В работе [18] также проводились эксперименты по плавлению оболочек из нержавеющей стали при обдуве восходящим потоком аргона. На рис. 2 приведены результаты визуализации проведенных экспериментов. В экспериментах с высокой мощностью обогрева наблюдалось масштабное плавление и стекание расплава в виде пленки и ручейков. При меньших мощностях наблюдалось движение расплава в виде капель. По этой причине в модуле SAFR в качестве режимов течения рассматриваются пленочный и капельно-ручейковый. Объединение капельного и ручейкового режимов в один было вызвано сложностью их разделения, поскольку каплю можно рассматривать как передний фронт ручейка.

В качестве критерия перехода от пленочного режима к ручейковому был использован критерий стабильности пленки перед образованием сухих пятен, предложенный в работе [19]. В соответствии с данными этой работы, образование сухого пятна, то есть переход от пленочного к ручейковому режиму, становится возможным, когда



Рис. 1. Визуализация перемещения расплава, полученная в работе [18].

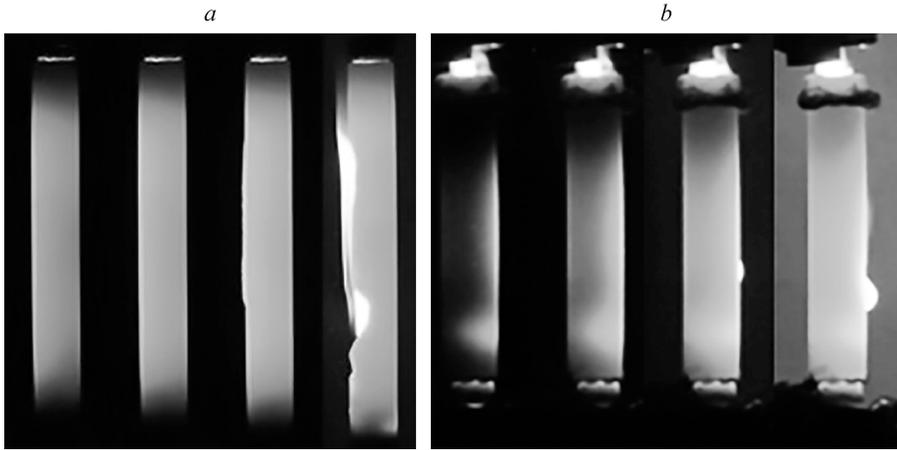


Рис. 2. Последовательные кадры плавления и стекания оболочки из нержавеющей стали по боковой поверхности в виде пленки (слева) и капель (справа).

давление набегающего потока недостаточно для того, чтобы разрушить контактную линию «жидкость – твердая поверхность», что описывается неравенством:

$$\rho_m \chi U^2 \delta / 2 < \sigma (1 - \cos \theta_w) - d\sigma/dT (T_w - T_m) \cos \theta_w, \quad (2)$$

здесь θ_w — контактный (краевой) угол на границе раздела «жидкость – твердое тело», δ — толщина пленки, T_w — температура поверхности ТВЭЛа, по которой стекает расплав, T_m — температура расплава, $d\sigma/dT$ — производная поверхностного натяжения жидкости по температуре.

От режима течения зависят соотношения, используемые для расчета трения и теплообмена расплава с поверхностью ТВЭЛа и теплоносителя.

Замыкающие соотношения

Для вычисления величины трения расплава с поверхностью ТВЭЛа $\tau_w \Pi_w$ и с теплоносителем $\tau_c \Pi_c$ требуется рассчитать как напряжения трения τ_w , τ_c на границе расплава с ТВЭЛом и теплоносителем, так и смоченные периметры Π_w , Π_c . Для некоторых режимов важно также знать поперечное сечение расплава S .

Смоченные периметры зависят от геометрии движения расплава. Так, в пленочном режиме пленка смачивает окружность ТВЭЛа, поэтому смоченный периметр рассчитывается как

$$\Pi_c = 2\pi(r_0 + \delta), \quad \Pi_w = 2\pi r_0, \quad (3)$$

здесь r_0 — радиус ТВЭЛа, δ — толщина пленки расплава.

Для капельно-ручейкового режима он принимает вид:

$$\Pi_w = 2 \cdot a_c \cdot (2\pi r_0) / L, \quad \Pi_c = \pi_{riv} (2\pi r_0) / L, \quad (4)$$

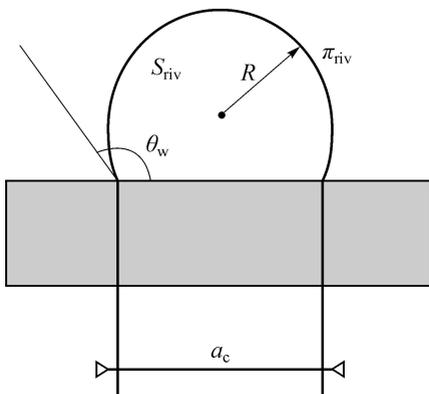


Рис. 3. Поперечное сечение ручейка.

где π_{riv} — периметр окружности ручейка, L — расстояние между ручейками, a_c — полуширина ручейка, выражение $2\pi r_0/L$ определяет число ручейков. Периметр окружности ручейка может быть определен из величины контактного угла жидкость–твердая поверхность (рис. 3):

$$\pi_{riv} = 2\theta_w \cdot a_c / \sin \theta_w. \quad (5)$$

В настоящей работе используется гипотеза о том, что форма ручейка (ривулета) в поперечном сечении является дугой окружности. В общем случае ривулет имеет существенно более сложную форму и для ее нахождения требуется решить уравнение Навье–Стокса с граничными условиями на свободной границе жидкости и в области контакта «жидкость–твердое тело». Некоторые частные случаи решения этой задачи приводились в работе [20]. В то же время гипотеза о том, что сечение ривулета можно аппроксимировать дугой окружности, не приводит к большим ошибкам в сравнении с экспериментальными данными. Этот факт подтвержден экспериментально также в работе [21].

Число ручейков может быть вычислено с использованием подходов, развитых в работах [22, 23], посвященных исследованию устойчивости поверхности жидкости на границе ее контакта с твердым телом. В работе [23] было представлено соотношение для расстояния между формирующимися ручейками:

$$L = 25 \cdot \delta \cdot (3 \cdot Ca)^{-1/3}, \quad Ca = \mu U / \sigma. \quad (6)$$

Корреляция (6) получена на основе анализа сил, действующих на расплав, и численного анализа устойчивости безразмерных уравнений, описывающих движение расплава. Для валидации соотношения (6) использовались экспериментальные данные для силикона и воды, предсказавшие удовлетворительное согласование корреляции и результатов измерений [23]. Поскольку корреляция была получена путем анализа безразмерных уравнений движения расплава, предлагаемое соотношение может быть перенесено и на случай расплава топлива (стали).

Зная число ручейков и поперечное сечение одного ручейка расплава

$$S_{riv} = a_c^2 / \sin^2 \theta_w (\theta_w - \sin 2\theta_w / 2), \quad (7)$$

можно найти полную площадь поперечного сечения расплава при ручейковом режиме стекания:

$$S = S_{riv} \cdot (2\pi r_0) / L. \quad (8)$$

Полуширина ручейка вычисляется из полной массы расплава в данном сечении и с использованием формул, приводимых ниже.

Вид выражений для расчета трения и теплообмена зависит не только от режима стекания, но и от самого режима движения жидкой фазы: ламинарного или турбулентного.

Для нахождения величины трения со стенкой в ламинарном режиме используется выражение [4]:

$$\tau_w = 2(3\alpha - 1)\mu_m U / (\alpha \delta), \quad (9)$$

здесь α определяется профилем скорости расплава в пленке и для степенного профиля с показателем степени $n = 2$ будет иметь вид:

$$\alpha = 1 / (1 + n). \quad (10)$$

Для нахождения величины трения в турбулентном режиме применялось выражение [24]:

$$\tau_w = \xi_w \rho U^2 / 8, \quad \xi_w = 0,37 / (U 4\delta \rho / \mu_m)^{1/4} = 0,37 / \text{Re}_m^{0,25}. \quad (11)$$

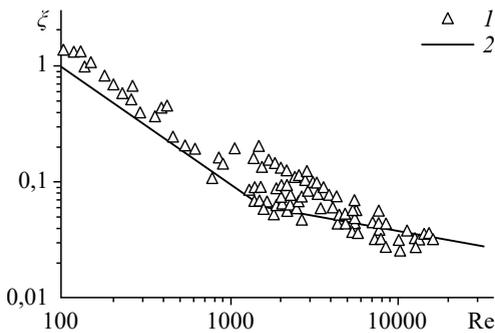


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных [25, 26] (1) и результатов предлагаемых соотношений для расчета трения расплава со стенкой (9)–(11) (2).

ми в коэффициент трения, которые были получены на воде, метаноле, пропаноле, глицерине в исследованиях [25, 26].

Трение между расплавом и теплоносителем рассчитывается похожим образом:

$$\tau_{wi} = C_{wi} \xi_i \rho_i (U_i - U)^2 / 8, \quad (12)$$

здесь U_i — скорости жидкой ($i = f$) или газовой ($i = g$) фазы. При этом коэффициенты C_{wi} и ξ_i определяются геометрией канала и режимом течения. Для их расчета используются соотношения из теплогидравлического модуля HYDRA-IBRAE/LM [27] интегрального кода ЕВКЛИД/V2. Валидация соотношений проводилась в работах авторов [27–29].

Для расчета теплообмена расплава со стенкой нужно рассчитывать величину теплового потока q_w , идущего с поверхности ТВЭЛа с температурой T_w к расплаву с температурой T_m :

$$q_w = \Lambda_w (T_w - T_m). \quad (13)$$

Коэффициент теплоотдачи Λ_w рассчитывается через толщину пленки расплава и число Нуссельта по соотношению:

$$\Lambda_w = Nu_w \lambda / \delta, \quad (14)$$

здесь λ — коэффициент теплопроводности пленки жидкости.

Выражения для числа Нуссельта в ламинарном режиме с учетом трения на поверхности «пленка – газ» взяты из работы [30].

В турбулентном режиме для нержавеющей стали (при числе Прандтля $Pr \ll 1$) [31]

$$Nu_w = 2,25 + 0,01 Re_m^{0,8}. \quad (15)$$

Между ламинарным режимом течения и турбулентным используется линейная интерполяция по числу Рейнольдса. В качестве верхней границы ламинарного режима принято значение $Re_{ml} = 2000$.

Валидации модели движения расплава

Для валидации разработанных методик было проведено сравнение результатов расчетов и данных экспериментов по скорости потери массы, проведенных на имитаторах оболочек ТВЭЛов, изготовленных из легкоплавких металлов, в газовой атмосфере и в свинцовом теплоносителе. Эксперименты в газовой атмосфере моделировали поведение ТВЭЛа во время аварии в реакторе с натриевым теплоносителем, поскольку для натрия температура кипения ниже температуры плавления оболочки ТВЭЛа.

Условия экспериментов в газовой атмосфере детально описывались в работах [15, 16]. Оболочка имитатора в экспериментах была изготовлена из олова. Результаты расчетов

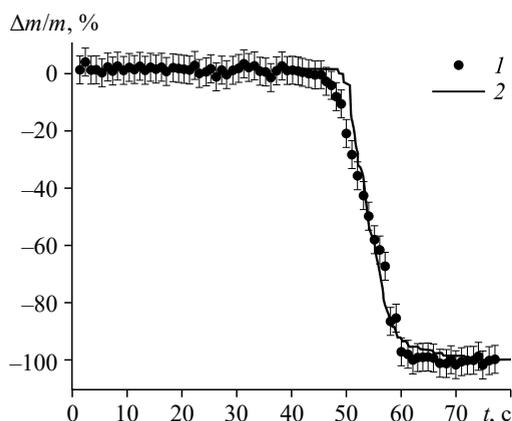


Рис. 5. Иллюстрация процесса потери массы оболочки имитатора ТВЭЛа из олова.

1 — данные эксперимента [15],
2 — результаты расчета с использованием модуля SAFR (ЕВКЛИД/V2).

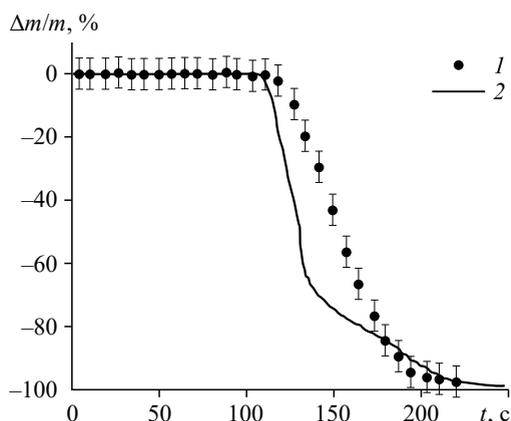


Рис. 6. Иллюстрация процесса потери массы оболочки имитатора ТВЭЛа из цинка.

1 — данные эксперимента,
2 — результаты расчета с использованием модуля SAFR (ЕВКЛИД/V2).

и экспериментов для мощности обогрева 174 Вт по измерению потери массы приведены для сравнения на рис. 5. Среднеарифметическая погрешность расчета составила 5%. Для контроля массы образца в течение эксперимента использовался тензометрический датчик. Имитатор ТВЭЛа был подвешен на струнах. Потеря массы происходила в тот момент, когда расплав покидал имитатор при достижении расплава нижнего конца стержня.

Результаты расчетов и эксперимента, представленные на рис. 5, указывают на ламинарный пленочный режим стекания. Вывод о пленочном режиме стекания согласуется с экспериментальными наблюдениями [15 и 16].

Условия экспериментов в свинцовом теплоносителе отличались от условий экспериментов в газовой среде. В качестве имитатора оболочки использовался цинк. Эксперименты проводились в сосуде из кварцевого стекла. Внутренний диаметр сосуда был равен 21 мм, толщина стенок — 3 мм. В сосуды заливался жидкий свинец объемом 65 мл. Снаружи сосуд не теплоизолировался. Температура окружающей среды была равна 25 °С. Имитатор ТВЭЛа представлял собой электрообогреваемый ТЭН, на который была нанесена цинковая оболочка. Он имел длину 170 мм и помещался в центр сосуда. Диаметр ТЭНа составлял 8 мм, толщина оболочки из цинка — 1 мм. Эксперименты проводились при мощности обогрева 144 Вт. Сравнение результатов расчетов и экспериментов приведены на рис. 6. Среднеарифметическая погрешность расчета составила 30%.

Выводы

В работе приведены базовые модели программного модуля SAFR для моделирования движения и теплообмена расплава оболочки, образующегося при плавлении ТВЭЛов. Изучение данного явления очень важно для детального понимания особенностей протекания аварийного процесса. Представлены основные соотношения, применяемые для решения задачи перемещения расплава. С использованием описанных алгоритмов проведены расчеты экспериментов по движению расплава по поверхности ТВЭЛа и определено количество расплава, вынесенного за его пределы.

Список литературы

1. 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 плавления ТВЭЛа быстрого реактора и затвердевания образующегося расплава с помощью модуля SAFR/V1 интегрального кода ЕВКЛИД/V2 // Атомная энергия. 2018. Т. 124, № 3. С. 123–126.
2. 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.
3. Бутов А.А., Жданов В.С., Климонов И.А., Кудашов И.Г., Кутлиматов А.Э., Мосунова Н.А., Сорочкин А.А., Стрижов В.Ф., Фролов С.А., Усов Э.В., Чухно В.И. Физические модели для расчета разрушений ТВЭЛа и активной зоны реактора с жидкометаллическим теплоносителем, реализованные в коде ЕВКЛИД/V2 // Теплоэнергетика. 2019. № 5. С. 5–15.
4. Алексеев С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука, 1992. 255 с.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М: Дрофа. 2003. 840 с.
6. Ishii M., Chen W.L., Grolmes M.A. Molten clad motion model for fast reactor loss-of-flow accidents // Nuclear Sci. and Eng. 1976. Vol. 60. P. 435–451.
7. Chen W.L., Ishii M., Grolmes M.A. Parametric study of the molten clad motion based on one dimensional model // Nuclear Eng. and Design. 1977. Vol. 41. P. 1–12.
8. Yamano H., Tobita Y., Fujita S. A three-dimensional neutronics-thermohydraulics simulation of core disruptive accident in sodium-cooled fast reactor // Nuclear Engin. Design. 2009. Vol. 239, Iss. 9. P. 1673–1681.
9. Flores A., Matuzas V., Perez-Martin S. et. all. Analysis of ASTEC-Na capabilities for simulating a loss of flow CABRI experiment // Annals of Nuclear Energy. 2016. Vol. 94. P. 175–188.
10. Tom S., Rao P.M., Raghupathy S. Numerical simulation of single-phase heat transfer and nucleate boiling of liquid sodium in narrow annulus channel similar to that of SFR fuel subchannel // Nuclear Eng. and Design. 2021. Vol. 383. P. 111425-1–111425-8.
11. Власичев Г.Н. Комплекс программ расчета аварийных процессов с плавлением внутрикорпусных материалов быстрого реактора // Атомная энергия. 1994. Т. 76, вып. 6. С. 459–465.
12. Власичев Г.Н. Расчетная модель расплавления твэла с учётом перемещения расплавленной оболочки в активной зоне реактора БН при запроектной аварии // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2001. № 3. С. 21–32.
13. Lobanov P., Pribaturin N., Svetonosov A., Usov E., Evdokimenko I. Experimental investigation of liquid metal behavior in gas counter flow // Proceedings of ICONE-27 27th Intern. Conf. on Nuclear Eng. May 19–24. 2019. Ibaraki. Japan. ICONE27-2212. 4 p.
14. Zhdanov V.S., Klimonov I.A., Lezhnin S.I., Lobanov P.D., Pribaturin N.A., Svetonosov A.I., Usov E.V. Computation-and-experiment study of behavior of molten metal in fuel element and fuel assembly: preliminary experiments and computational models // J. Eng. Thermophysics. 2020. Vol. 29, No. 2. P. 209–221.
15. Lobanov P.D., Zhdanov V.S., Usov E.V., Svetonosov A.I., Klimonov I.A. Experimental and numerical determination of the rate of mass loss and temperature evolution of the single fuel rod cladding imitator during its melting // Nuclear Eng. and Design. 2020. Vol. 363. P. 110681-1–110681-9.
16. Лобанов П.Д., Усов Э.В., Светоносов А.И., Лежнин С.И. Анализ экспериментальных данных по плавлению и движению расплава металла по цилиндрической поверхности // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27, № 3. С. 483–490.
17. Wright S.A., Schumacher G., Henkel P.R. In-pile observations of fuel and clad relocation during LMBFR core disruptive accidents in the STAR // Experiments. Nuclear Technology. 1985. Vol. 71. P. 187–216.
18. Usov E.V., Lobanov P.D., Klimonov I.A. et. all. Analysis of the cladding melt relocation along the surface of the fuel pin with help of the SAFR module // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 2057. P. 012126-1–012126-5.
19. Zuber N., Staub F. Stability of dry patches forming in liquid films flowing over heated surfaces // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1966. Vol. 9. P. 897–905.
20. Барташевич М.В., Кузнецов В.В., Кабов О.А. О движении ривулета в миниканале с наклоном под действием газового потока при разной интенсивности силы тяжести // Сиб. журн. индустр. матем. 2009. Т. 12, № 2. С. 3–16.
21. Алексеев С.В., Бобылев А.В., Гузанов В.В., Маркович Д.М., Харламов С.М. Регулярные волны на вертикально стекающих ривулетах при разных углах смачивания // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 3. С. 371–384.
22. Huppert H. Flow and instability of a viscous current down a slope // Nature. 1982. Vol. 300, Iss. 2. P. 427–429.

23. Cazabat A.M., Heslot F., Troian S.M., Carles P. Fingering instability of thin spreading films driven by temperature gradients // Nature. 1990. Vol. 346, Iss. 30. P. 824–826.
24. Усов Э.В., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А. Развитие подходов к анализу движения расплава по поверхности тепловыделяющего элемента // Теплоэнергетика. 2021. № 4. С. 27–34.
25. Asali J.C., Hanratty T.J., Andreussi P. Interfacial drag and film height for vertical annular flow // AiChE J. 1985. Vol. 31, Iss. 6. P. 895–902.
26. Jackson M. Liquid films in viscous flow // AiChE J. 1955. Vol. 1, Iss. 2. P. 231–240.
27. 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. № 7. С. 48–55.
28. Усов Э.В., Прибатурин Н.А., Кудашов И.Г., Бутов А.А., Дугаров Г.А., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф., Иванов Е.Н. Один из этапов верификации теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 для расчета течения натриевого теплоносителя в сборках ТВЭЛов // Атомная энергия. 2015. Т. 118, № 6. С. 309–313.
29. Климонов И.А., Усов Э.В., Дугаров Г.А., Бутов А.А., Кудашов И.Г., Иванов Е.Н., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф., Анфимов А.М., Горбунов В.С., Кузнецов Д.В., Осипов С.Л., Бельтюков А.И. Верификация теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 на основе экспериментов на БН-600 // Атомная энергия. Т. 122, № 5. С. 258–262.
30. Батгерворс Д., Хьюитт Г. Теплопередача в двухфазном потоке. М.: Энергия. 1980. 328 с.
31. Gimbutis G.I. Heat transfer in the flow of a liquid-metal film under gravity on a vertical wall // J. Engng. Phys. Vol. 32, No. 2. P. 115–119.

*Статья поступила в редакцию 19 февраля 2024 г.,
после доработки — 27 февраля 2024 г.,
принята к публикации 11 апреля 2024 г.*