

$\epsilon_{п.с} \sim 1\%$ приведет к повышению уровня теплоносителя на $\sim 0,1$ м, разбавление до $\epsilon_{п.с} \sim 10\%$ — почти на 1 м. При большом объеме контура и небольшой скорости истечения пароводяной смеси из трещин насыщение теплоносителя пузырями пара и изменение уровней в контуре происходят медленно, что упрощает контроль развития процесса по показаниям уровнемеров и других приборов.

Таким образом, в рассмотренных сценариях аварий в результате разгерметизации парогенератора как при гильотинном разрыве труб и залповом забросе в активную зону пузырей пара в составе теплоносителя, так и при малой, но длительной течи труб с насыщением паровыми пузырями всего контура не могут быть реализованы эффекты реактивности, вызывающие быстрый неконтролируемый рост мощности с превышением пределов безопасной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз, 1963.
2. Абрамов А.В., Ковалев Е.О., Колесников П.А. и др. Исследование процессов в свинцовом теплоносителе при нарушении целостности теплообменной трубы парогенератора БРЕСТ-ОД-300. — Атомная энергия, 2015, т. 119, вып. 3, с. 164—168.
3. Ульянов В.В., Гулевский В.А., Мартынов П.Н., Орлов Ю.И. Водородная очистка поверхностей циркуляционных контуров в моноблочных РУ с теплоносителями Pb и Pb—Bi. — В сб.: Тяжелые жидкометаллические теплоносители в быстрых реакторах (Теплофизика-2010). Межотрас. семинар, 20—22 октября 2010 г. Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2010, с. 42—44.
4. Алексеев Н.И., Большагин С.Н., Гомин Е.А. и др. Статус MCU-5. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2011, вып. 4, с. 4—23.
5. MacFarlane R., Kahler A. Methods for Processing ENDF/BVII with NJOY. LA-UR-10-04652, 2010.
6. Shibata K., Iwamoto O., Nakagawa T. JENDL-4.0: a new library for nuclear science and engineering. — J. Nucl. Sci. Technol., 2011, v. 48(1), p. 1—30.
7. Забродская С.В., Игнатюк А.В., Кошечев В.Н. и др. РОСФОНД — российская национальная библиотека нейтронных данных. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы, 2007, вып. 1—2.
8. The NJOY Nuclear Data Processing System, User Manual. LA-9303, 1981, v. 1.

Поступила в Редакцию 10.11.20

УДК 544.344.012-14-13

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ С УЧЕТОМ ТЕПЛОМАССООБМЕНА

Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Леонов А.А., Макаревич А.А. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)
e-mail: chud@ibrae.ac.ru

В последнее время все более актуальными становятся задачи, требующие применения методик для двухфазного течения трехкомпонентной смеси в целях обоснования безопасности и анализа последствий исходных событий. Например, для реактора БРЕСТ-ОД-300 при возникновении течи парогенератора требуется обоснование того, что вводимая реактивность не угрожает безопасности функционирования реактора при попадании пузырей пара в активную зону. Следующая актуальная задача касается анализа последствий исходного события разгерметизации твэла. В этом случае необходимо показать, что истечение газа не приведет к нарушению охлаждения соседних твэлов. Нако-

нец, такая методика расчета может быть использована для обоснования режима регенерации свинца, при котором газовая смесь впрыскивается в поток теплоносителя и необходимо показать, что регенерирующая смесь эффективно циркулирует по всему объему первого контура. Таким образом, имеются практические важные задачи, требующие для своего решения трехмерного моделирования двухфазного течения трехкомпонентной смеси.

Для моделирования двухфазного течения двухкомпонентной смеси с учетом тепломассообмена предлагаются разные методики [1—7], для трехкомпонентной смеси подобные работы только начинаются.

В настоящей статье представлена численная схема расчета сжимаемой трехкомпонентной смеси с учетом индивидуальной скорости и двухфазного массообмена. Данная публикация является продолжением работ [8] по созданию методики моделирования двухкомпонентной смеси жидкость—газ с выделением межфазной границы в быстром реакторе с натриевым теплоносителем. Методика разрабатывается на основе уравнения состояния сниженного газа и модели из шести уравнений в асимптотическом пределе мгновенной релаксации скорости. Давление на границе раздела фаз вычисляется в модели как асимптотический предел. Модель обеспечивает положительность объемной доли, а также монотонность скорости звука двухкомпонентной смеси и дополняется соответствующими соотношениями на фронте ударной волны.

Бездиссипативная механически равновесная модель двухкомпонентной смеси с учетом поверхностного натяжения была разработана с использованием принципа наименьшего действия Гамильтона. Методика была использована для моделирования таких характеристик течения натриевого теплоносителя, как кавитация, распад начального разрыва давления, тепломассоперенос в вертикальном канале при кипении натрия в условиях вынужденного вертикального подъемного течения. Удовлетворительное совпадение численных предсказаний с экспериментом было показано.

В настоящей работе моделируется одномерный расчет двухфазного течения трехкомпонентной смеси с индивидуальной скоростью, давлением и температурой. При моделировании двухфазного течения с учетом массообмена последовательно используются процедуры релаксации скорости, давления, температуры и энергии Гиббса.

Математическая модель и численный метод. Система дифференциальных уравнений, описывающих неравновесную трехкомпонентную смесь, каждый компонент которой имеет свою скорость, давление и температуру, в одномерном случае в поле гравитации без учета тепломассообмена имеет вид

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + V_i \frac{\partial \alpha_1}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + V_i \frac{\partial \alpha_2}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial \alpha_1 \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_1 \rho_1 u_1}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial \alpha_1 \rho_1 u_1}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_1 \rho_1 u_1^2 + \alpha_1 P_1)}{\partial x} &= P_i \frac{\partial \alpha_1}{\partial x} + \alpha_1 \rho_1 g; \\ \frac{\partial \alpha_1 \rho_1 E_1}{\partial t} + \frac{\partial u_1 (\alpha_1 \rho_1 E_1 + \alpha_1 P_1)}{\partial x} &= P_i V_i \frac{\partial \alpha_1}{\partial x} + \alpha_1 \rho_1 u_1 g; \\ \frac{\partial \alpha_2 \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_2 \rho_2 u_2}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial \alpha_2 \rho_2 u_2}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_2 \rho_2 u_2^2 + \alpha_2 P_2)}{\partial x} &= P_i \frac{\partial \alpha_2}{\partial x} + \alpha_2 \rho_2 g; \\ \frac{\partial \alpha_2 \rho_2 E_2}{\partial t} + \frac{\partial u_2 (\alpha_2 \rho_2 E_2 + \alpha_2 P_2)}{\partial x} &= P_i V_i \frac{\partial \alpha_2}{\partial x} + \alpha_2 \rho_2 u_2 g; \\ \frac{\partial \alpha_3 \rho_3}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_3 \rho_3 u_3}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial \alpha_3 \rho_3 u_3}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_3 \rho_3 u_3^2 + \alpha_3 P_3)}{\partial x} &= -P_i \left(\frac{\partial \alpha_1}{\partial x} + \frac{\partial \alpha_2}{\partial x} \right) + \\ &+ \alpha_3 \rho_3 g; \\ \frac{\partial \alpha_3 \rho_3 E_3}{\partial t} + \frac{\partial u_3 (\alpha_3 \rho_3 E_3 + \alpha_3 P_3)}{\partial x} &= \\ &= -P_i V_i \left(\frac{\partial \alpha_1}{\partial x} + \frac{\partial \alpha_2}{\partial x} \right) + \alpha_3 \rho_3 u_3 g, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где α_k — объемная доля k -го компонента ($k = 1, 2, 3$); t — время; $V_i = (\alpha_1 \rho_1 u_1^0 + \alpha_2 \rho_2 u_2^0 + \alpha_3 \rho_3 u_3^0) / (\alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 + \alpha_3 \rho_3)$ — скорость на границе раздела фаз, которая совпадает со скоростью центра масс [1]; x — координата; ρ_k — плотность; u_k — скорость; P_k — давление k -го компонента ($k = 1, 2, 3$) соответственно; $P_i = \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + \alpha_3 P_3$ — давление на границе раздела фаз, равное давлению трехкомпонентной смеси; g — сила тяжести; E_k — полная энергия на единицу массы k -го компонента ($k = 1, 2, 3$).

Система (1) замыкается тремя уравнениями состояния (по одному для каждого компонента смеси), а также соотношением насыщения для объемных долей $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$.

При необходимости реализации условия динамического равновесия (равенство скорости и давления всех компонентов) применяются

процедуры мгновенной релаксации, аналогичные приведенным в работе [1] для двухкомпонентной смеси.

Для численного решения системы (1) используется метод Годунова с применением солвера HLL [2]. При численной аппроксимации уравнений переноса объемных долей используется принцип сохранения постоянных во времени давления и скорости.

При моделировании двухфазного течения с учетом массообмена трехкомпонентной смеси газодинамический поток приводится в динамическое (одинаковые скорость и давление) и тепловое (одинаковая температура) равновесие. Тепловое равновесие рассчитывается с помощью специально разработанной процедуры, сохраняющей динамическое равновесие. Эта процедура использует методику выравнивания температуры, аналогичную двухкомпонентной смеси [3]. Двухфазное течение с учетом массообмена трехкомпонентной смеси, находящейся в динамическом и тепловом равновесии, рассчитывается методом априорных оценок массовой доли газа после испарения [4]. В результате двухфазная составляющая трехкомпонентной смеси оказывается в состоянии термохимического равновесия (равные температура и энергия Гиббса).

Таким образом, разработанная численная схема позволяет моделировать трехкомпонентную смесь с индивидуальной скоростью, давлением и температурой. Динамическое и термохимическое равновесие рассчитывается методом последовательного расщепления по процессам релаксации скорости, давления, температуры при сохранении равного давления, энергии Гиббса каждого компонента двухфазного течения при сохранении равных давления и температуры трехкомпонентной смеси.

Моделирование течения трехкомпонентной смеси с учетом индивидуальной скорости и массообмена. Результаты моделирования течения смеси с учетом индивидуальной скорости рассмотрим на примере двух классических тестов для расчета задачи о водяном кране и расслоении гомогенных смесей [5]. В расчетах состояние каждой составляющей трехкомпонентной смеси описывалось уравнением состояния идеального газа

$$p = (\gamma - 1)pe,$$

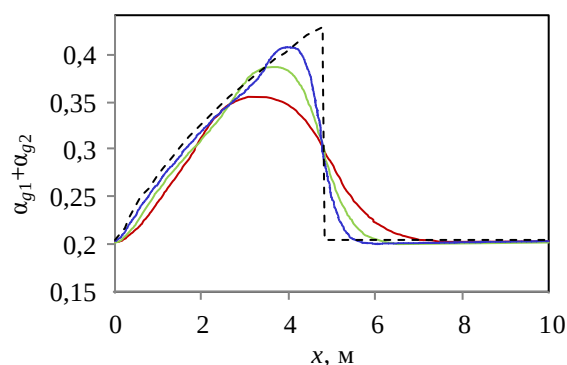
где $\gamma_g = 1,4$; $\gamma_l = 1,005$; e — внутренняя энергия. Здесь индексы g, l обозначают газ и жидкость соответственно.

Задача о водяном кране. Вертикальная труба высотой 12 м заполнена однородной смесью воды и газа с объемной долей $\alpha_l = 0,8$, $\alpha_g = 0,2$, плотностью $\rho_l = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_g = 1 \text{ кг/м}^3$. Начальная скорость однородна и равна для воды $u_l = 10 \text{ м/с}$, газа $u_g = 0 \text{ м/с}$. Начальное давление постоянно во всей трубе и равно 0,1 МПа. Граничные условия на верхней границе фиксируются для плотности, скорости и объемной доли воды и газа и совпадают с начальными значениями. На нижней границе поддерживается постоянное давление 0,1 МПа. Под действием гравитации ($g = 10 \text{ м/с}^2$) происходит удлинение водяной струи. Задача рассчитывается для трехкомпонентной смеси. При этом газ с начальной объемной долей 0,2 моделировался как смесь двух идентичных газовых компонентов с одинаковой объемной долей α_{g1} и α_{g2} , равной 0,1 (рис. 1). Для сравнения здесь же показано аналитическое решение для объемной доли газа по формуле

$$\alpha_g(x, t) = \begin{cases} 1 - \frac{\alpha_l^0 u_l^0}{\sqrt{2gx + (u_l^0)^2}}, & \text{если } x \leq u_l^0 t + gt^2/2; \\ 0,2, & \text{если } x > u_l^0 t + gt^2/2, \end{cases} \quad (2)$$

где $u_l^0 = 10 \text{ м/с}$; $\alpha_l^0 = 0,8$.

Расслоение гомогенных смесей. Вертикальная труба высотой 7,5 м заполнена однородной гомогенной по объему двухкомпонент-



Р и с. 1. Объемная доля газовых компонентов в задаче о водяном кране, рассчитанная на сетке 128 (—), 256 (—), 512 узлов (—) для времени 0,4 с и по формуле (2) (---)

ной смесью жидкости ($\alpha_l = 0,5$) и газа ($\alpha_g = 0,5$). Начальная скорость каждого компонента одинакова и равна 0 м/с. Начальное давление также одинаково и равно 0,1 МПа. Плотность газа 1 кг/м³, жидкости 1000 кг/м³. Границы расчетной области моделируются как твердые стенки. Под действием поля гравитации ($g = 10 \text{ м/с}^2$) газ поднимается в верхнюю половину трубы, жидкость опускается в нижнюю.

При расчете данной задачи для коррекции численной неустойчивости, связанной с уменьшением до нуля объемной доли α_l и α_g , вводится параметр $\chi \sim 10^{-4}$ [6]. Если в какой-либо расчетной ячейке $\alpha_l < \chi$ или $\alpha_g < \chi$, то $u_l = 0$ и $u_g = 0$.

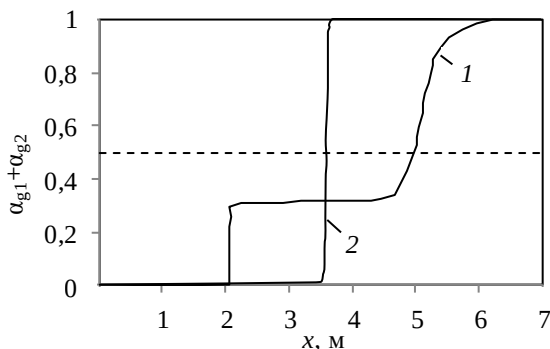
Расчет расслоения проводился для трехкомпонентной смеси. При этом газ объемной долей 0,5 моделировался как смесь двух идентичных газовых компонентов с одинаковой объемной долей α_{g1} и α_{g2} , равной 0,25 (рис. 2).

Результаты моделирования течения смеси с учетом массообмена рассмотрим на примере распада разрыва в среде воздух—вода—пар и жидкий натрий—вода—пар.

Распад разрыва в среде воздух—вода—пар [4]. В расчетах для описания состояния каждой составляющей смеси использовалось уравнение состояния [7]

$$p(\rho, e) = (\gamma - 1) \frac{e - q}{1/\rho - b} - \gamma \pi; \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho(p, T)} = \frac{(\gamma - 1) C_v T}{p + \pi} + b.$$



Р и с. 2. Объемная доля газовых компонентов в задаче расслоения гомогенной смеси, рассчитанная на сетке 1024 узла для времени 0,7 (1), 1,4 с (2): - - - - начальные данные

Характеризующие каждый компонент смеси коэффициенты уравнения состояния (3) γ , q , π , C_v и b приведены в таблице.

Параметры уравнения состояния (3) для воздуха, воды и пара

Параметр	Вода	Пар	Воздух
C_v , кДж/(кг·К)	3,61	0,96	0,72
γ	1,19	1,47	1,4
π	$7028 \cdot 10^5$	—	—
q , кДж/кг	-1178	2078	—
b , 10^{-4} м ³ /кг	6,61	—	—

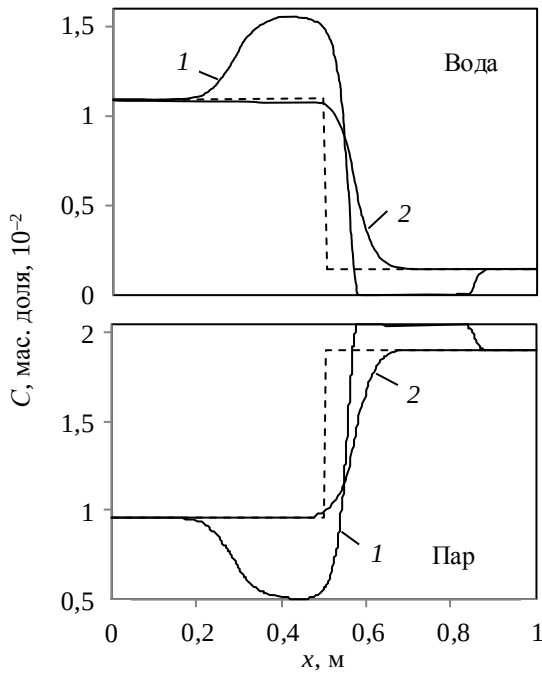
Расчетная область, представляющая собой одномерную трубу длиной 1 м, заполнена трехкомпонентной смесью из воздуха, воды и пара. Начальная массовая доля воздуха $Y_b = 0,98$, температура каждой составляющей смеси ~ 290 К. Давление слева от разрыва ($x < 0,5$ м) равно $p_{сл} = 0,2$ МПа, справа ($x > 0,5$ м) — $p_{сп} = 0,1$ МПа. Трехкомпонентная среда находится в состоянии покоя. Начальная массовая доля пара определяется с использованием априорной оценки, связывающей парциальное давление пара в смеси пар—воздух с давлением на линии насыщения двухфазной смеси вода—пар $p_{нас}(T)$ при данной температуре [4] по формуле

$$Y_g = \frac{p_{нас}(T) M_g Y_b}{p - p_{нас}(T) M_b}, \quad (4)$$

где M_g , M_b — молярная масса пара и воздуха соответственно.

Начальная массовая доля воды определяется по соотношению насыщения для суммы массовых долей всех составляющих трехкомпонентной смеси. Результаты моделирования получены при скорости слева и справа от разрыва 0 м/с для следующих значений параметров: слева от разрыва для массовой доли воды $Y_{сл}^{вода} \sim 1,1 \cdot 10^{-2}$ и пара $Y_{сл}^{пар} \sim 9 \cdot 10^{-3}$, справа от разрыва для массовой доли воды $Y_{сп}^{вода} \sim 2 \cdot 10^{-3}$ и пара $Y_{сп}^{пар} \sim 1,8 \cdot 10^{-2}$. При учете массообмена справа от начального разрыва вода полностью испаряется, слева происходит конденсация пара (рис. 3).

Распад разрыва в среде жидкий натрий—вода—пар. При проведении следующего расче-



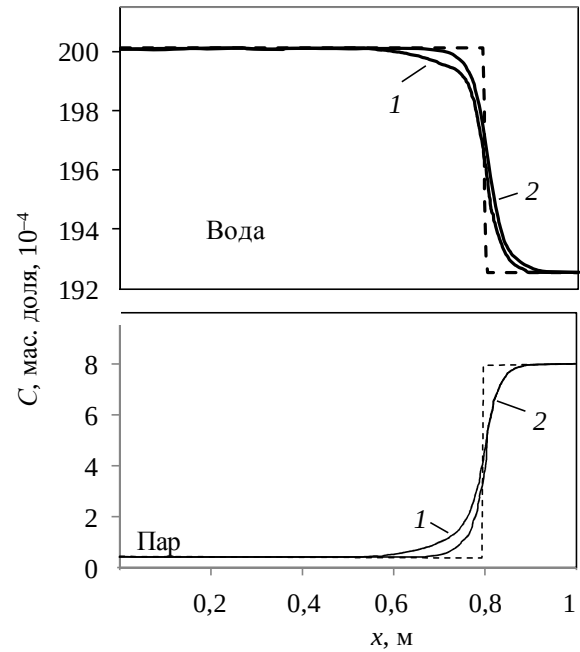
Р и с. 3. Расчетный распад разрыва трехкомпонентной смеси воздух—вода—пар с учетом (1) и без учета массообмена (2): --- — начальные данные

та для описания состояния каждой составляющей также использовалось уравнение состояния (3). Для жидкого натрия использовались следующие коэффициенты уравнения состояния: $C_v = 870,6 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $\gamma = 1,46$, $\pi = 887\,131\,708$, $q = -252\,156,4 \text{ Дж}/\text{кг}$, $b = 8,261 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Расчетная область, представляющая одномерную трубу длиной 1 м, заполнена трехкомпонентной смесью жидкий натрий—вода—пар. Начальная массовая доля натрия $Y_{\text{Na}} = 0,98$, температура каждой составляющей смеси $\sim 373 \text{ К}$ во всей расчетной области. Давление слева от разрыва ($x < 0,8 \text{ м}$) равно $p_{\text{сл}} = 3 \text{ МПа}$, справа ($x > 0,8 \text{ м}$) — $p_{\text{сп}} = 0,3 \text{ МПа}$. Трехкомпонентная смесь находится в состоянии покоя. Начальная массовая доля пара определяется с использованием априорной оценки, связывающей парциальное давление пара в смеси пар—жидкий натрий с давлением на линии насыщения смеси вода—пар при данной температуре:

$$Y_g = \frac{p_{\text{нас}}(T) \rho_g}{p - p_{\text{нас}}(T) \rho_{\text{Na}}} Y_{\text{Na}}, \quad (5)$$

где плотность пара ρ_g и натрия ρ_{Na} определяется по формуле (3), начальная массовая доля воды — по соотношению насыщения для суммы



Р и с. 4. Расчетный распад разрыва трехкомпонентной смеси натрий—вода—пар с учетом (1) и без учета массообмена (2): --- — начальные данные

массовых долей всех составляющих трехкомпонентной смеси.

Результаты моделирования на рис. 4 получены при скорости слева и справа от разрыва 0 м/с для массовой доли воды и пара слева от разрыва $Y_{\text{сл}}^{\text{вода}} \sim 2 \cdot 10^{-2}$, $Y_{\text{сл}}^{\text{пар}} \sim 1,27 \cdot 10^{-5}$, справа от разрыва $Y_{\text{сп}}^{\text{вода}} \sim 1,92 \cdot 10^{-2}$, $Y_{\text{сп}}^{\text{пар}} \sim 7,98 \cdot 10^{-4}$. При учете массообмена вода с правой и левой стороны от начального разрыва частично испаряется.

Приведенные результаты были получены на декартовых сетках, расчеты этого же набора задач — на неструктурированных расчетных сетках в рамках гранта РФФИ 19-08-00555.

Заключение. Разработанная численная схема расчета позволяет моделировать трехкомпонентные потоки с индивидуальной скоростью, давлением и температурой. Динамическое равновесие рассчитывается методом последовательного расщепления по процессам релаксации скорости и давления, термохимическое — методом последовательного расщепления по процессам релаксации температуры при сохранении равных давления и релаксации по энергии Гиббса при сохранении равных давления и температуры. Реализация разработанной численной схемы в многомерном случае осуществляется с использованием принципа аддитивности.

Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Saurel R., Abgrall R.** A multiphase Godunov method for compressible multifluid and multiphase flows. — *J. Comp. Phys.*, 1999, v. 150, p. 425—467.
2. **Harten A., Lax P., Leer B.** On upstream differencing and Godunov type schemes for hyperbolic conservation laws. — *SIAM Rev.*, 1983, v. 25, № 1, p. 35—61.
3. **Zein A., Hantke M., Warnecke G.** Modeling phase transition for compressible two-phase flows applied to metastable liquids. — *J. Comp. Phys.*, 2010, v. 229, p. 2964—2998.
4. **Chiapolino A., Boivin P., Saurel R.** A simple and fast phase transition relaxation solver for compressible multi-component two-phase flows. — *Comput. Fluids*, 2017, v. 150, p. 31—45.
5. **Ransom V.** Numerical benchmark test no. 2.1. Faucet flows. — *Multiphase Sci. Technol.*, 1987, v. 3, № 1—4, p. 465—467.
6. **Ambroso A., Chalons C., Raviart P.-A.** A Godunov-type method for the seven-equation model of compressible two-phase flow. — *Comput. Fluids*, 2012, v. 54, p. 67—91.
7. **Le Métayer O., Saurel R.** The Noble—Abel—Stiffened—Gas equation of state. — *Phys. Fluids*, 2016, v. 28(4), № 046102, p. 1—23.
8. **Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Леонов А.А.** Методика решения задач двухфазной тепло- и гидродинамики с натриевым теплоносителем. — *Атомная энергия*, 2018, т. 125, вып. 4, с. 200—206.

Поступила в Редакцию 29.11.20

УДК 621.039.524:691.714.018.8

ТОПЛИВО С ХРОМОВЫМ ПОКРЫТИЕМ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА, УСТОЙЧИВОЕ К АВАРИИ

*Картюк Л.А., Кузнецов В.И., Маслов А.А., Новиков В.В., Орлов В.К.,
Рыкунов Д.В., Титов А.О. (АО «ВНИИНМ», г. Москва)
e-mail: dvrykunov@bochvar.ru*

Начало активных разработок топлива, устойчивого к аварии, связано с чрезвычайным происшествием на АЭС «Фукусима» (Япония). Авария показала особую опасность пароциркониевой реакции, возникающей при повышении температуры оболочки твэла в результате потери теплоносителя и всплеске реактивности. Понятие «устойчивое к авариям топливо» относится к всему твэлу, т.е. в рассмотрение включается как топливо, так и оболочка. По терминологии МАГАТЭ такое топливо должно быть безопасно при работе как в нормальных условиях эксплуатации, так и при потере теплоносителя.

В большинстве стран с развитой ядерной энергетикой активизировались исследования по снижению возможности возникновения пароциркониевой реакции. Работы проводятся в Германии, Индии, Китае, России, США, Франции, Чехии, Швейцарии, Южной Кореи, Японии и др. [1].

Концепция создания топлива, устойчивого к аварии. Основным следствием аварий на реакторах считают возникновение пароциркониевой реакции. Высокотемпературное окисление и гидрирование циркония приводят к снижению его пластичности и трещиностойкости, что может вызвать разгерметизацию твэлов [2]. Поэтому основной целью создания топлива является исключение пароциркониевой реакции. Для этого можно применять как физический, так и термодинамический барьер.

Концепция создания топлива заключается в значительном снижении объема образующегося водорода или запасенного тепла посредством большей теплопроводности топлива (рис. 1).

Безопасность твэла в аварийных условиях может быть повышена путем создания



Р и с. 1. Нанесение хромоалюминиевых покрытий на циркониевую оболочку твэла: *а* — мозаичная мишень из алюминия, укомплектованная штифтами из хрома; *б* — микроструктура однослойного покрытия