

**Заключение.** Таким образом, эксперименты показали, что теплообмен при поперечном обтекании свинцом пучка теплообменных труб сильно зависит от концентрации кислорода в теплоносителе.

Для свинца в базовом кислородном режиме коэффициенты теплообмена рекомендуется рассчитывать по формуле (4). Достоверность аппроксимации составляет 0,9963.

Для свинца с концентрацией кислорода на линии насыщения не обнаружена зависимость коэффициента теплообмена от скорости свинца в узком сечении, что согласуется с данными других авторов. Установлена нижняя граница коэффициента теплообмена  $Nu = 2$  при скорости свинца до 0,3 м/с.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Poplavsky V.M., Chebeskov A.M. State of the art and trends of development of fast reactor technology. — In: Proc. of GLOBAL 2011. Japan, Makuhari, 2011, № 357127.
2. Орлов В.В., Филин А.И., Цикунов В.С. и др. Задачи и требования к конструкции опытно-демонстрационного реактора БРЕСТ-ОД-300. — В сб.: Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях. Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 1999, т. 2, с. 450—457.
3. Калякин С.Г., Грабежная В.А. Экспериментальное исследование теплообмена в жидком металле при поперечном обтекании пучка труб в обоснование парогенератора установки РУ БРЕСТ-ОД-300. — В сб.: Труды 4-й Рос. национальной конф. по теплообмену. В 8 т. М.: Изд-во МЭИ, 2006, т. 2, с. 128—131.
4. Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федьнский О.С. Жидкометаллические теплоносители. 2-е изд. М.: Атомиздат, 1967. 190 с.
5. Shcherbakov S.I. Numerical simulation of nonsteady-state multiphase flow. The 2D TURBO-FLOW computer code used to perform express analysis of designs. — In: Proc. NURETH-11. France, Avignon, 2005, № 238.
6. Парфенов А.С., Михеев А.С., Грабежная В.А., Щербачков С.И. Экспериментальное исследование теплообмена при поперечном обтекании свинцом пучка парогенерирующих труб. — В сб.: Теплофизика-2013. Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2014, т. 1, с. 294—299.
7. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). Под ред. П.Л. Кириллова. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1990.
8. Петухов Б.С., Кириллов В.В. К вопросу о теплообмене при турбулентном течении жидкости в трубах. — Теплоэнергетика, 1958, № 4, с. 63—68.
9. Zvorykin A., Mahdi M., Popov R. et al. Heat transfer to supercritical water (liquid-like state) flowing in a short vertical bare tube with upward flow. — In: Proc. ICONE26. England, London, 2018, ICONE26-81608.
10. ASME International Steam Tables for Industrial Use. New York: ASME Press, 1998.
11. Безносков А.В., Молодцов А.А., Новожилова О.О., Савинов С.Ю. Экспериментальные исследования теплообмена от свинцового теплоносителя к поверхностям вертикальной и горизонтальной трубы. — В сб.: Теплофизика-2007. Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2008, с. 286—294.
12. Безносков А.В., Новожилова О.О., Савинов С.Ю., Молодцов А.А. Экспериментальные исследования характеристик теплообмена на «горячей» и «холодной» поверхностях одновременно при введении в контур свинцового теплоносителя примесей и очистки от них. — Там же, с. 276—285.
13. Безносков А.В., Семенов А.В., Молодцов А.А. и др. Экспериментальные исследования влияния примеси кислорода на теплоотдачу от стелей 10X9HSMФБ и 12X18H10T к свинцу и эвтектике Li(17)Pb(83). — В сб.: Труды 4-й Рос. национальной конф. по теплообмену. В 8 т. М.: Изд-во МЭИ, 2006, т. 2, с. 62—65.
14. Ярмонов М.В. Исследования теплообмена при поперечном обтекании труб тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями реакторов на быстрых нейтронах. Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2014. 195 с.

Поступила в Редакцию 25.04.19

УДК 621.039.58.519.6

#### ВАЛИДАЦИЯ КОДА САВАРЕТ-SC1 НА ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ВОДОРОДНОЙ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ НА АЭС

Большов Л.А., Глотов В.Ю., Головизнин В.М., Канаев А.А., Киселев А.Е., Юдина Т.А.

(ИБРАЭ РАН, г. Москва)

e-mail: glotov-v@yandex.ru

В ходе тяжелой аварии на АЭС с водоохлаждаемой реакторной установкой под защитную оболочку из разрывов первого контура может поступать значительное количество пара и водорода. Плаваемость поступающей парово-

дородной смеси и работа элементов систем безопасности создают условия для концентрационной стратификации атмосферы, что представляет угрозу для детонации водорода. В этой связи формирование локальных областей с высоким

содержанием водорода представляет особый интерес для изучения.

На распространение водорода в защитной оболочке значительное влияние оказывает совокупность гидродинамических и тепловых процессов: распространение свободных и рассеянных струйных течений, конвективные течения, вызванные неоднородным распределением температуры или состава газовых смесей, а также конденсацией пара на поверхностях теплообменников и стен защитной оболочки. Температура смеси, в свою очередь, в большей мере определяется интенсивностью турбулентного перемешивания и теплообменом излучением.

Для обоснования водородной взрывобезопасности энергоблоков АЭС с ВВЭР широко используются коды с сосредоточенными параметрами. Моделирование концентрационной стратификации атмосферы с помощью таких кодов возможно на основе априорного предположения о распределении водорода, поэтому их использование, например, для обоснования мест размещения оборудования аварийного удаления водорода без аналитической поддержки расчетных средств с более высокими прогнозными возможностями ограничено.

CFD-коды обладают большим потенциалом для прогнозирования локальных характеристик атмосферы защитной оболочки. В прямом численном моделировании решаются уравнения Навье—Стокса на сетках, разрешающих все физические масштабы, что является основой для получения точных решений. Однако применение такого подхода для обоснования водородной взрывобезопасности на АЭС на практике неосуществимо из-за высоких требований к вычислительным ресурсам. Приближенные подходы основываются на методике усреднения исходных уравнений по времени и пространству и используют набор замыкающих соотношений, полученных на основе эмпирических данных. Верификация и настройка параметров таких моделей проводились на относительно простых тестах, и попытка их использования в новых, более сложных задачах может приводить к потере точности.

В ИБРАЭ РАН с 2017 г. для численного анализа водородной взрывобезопасности на АЭС разрабатывается CFD-код CABARET-SC1. Аппроксимация уравнений гидродинамики в коде основана на методике КАБАРЕ, позволяющей рассчитывать турбулентные течения на сетках

с неполным разрешением масштаба турбулентности без использования настроечных параметров [1]. Получаемое численное решение зависит только от степени дискретизации расчетной области, окончательный выбор которой основан на математическом критерии — анализе сходимости решения. Применение методики КАБАРЕ для численного анализа водородной взрывобезопасности на АЭС позволяет устранить главную неопределенность, связанную с моделированием турбулентности, и за счет этого повысить прогнозные возможности в части распространения водорода в защитной оболочке. Другие важные процессы описываются в коде с помощью прямых численных моделей, не опирающихся на эмпирические данные, во избежание проблемы масштабирования при переходе от экспериментов к полномасштабной защитной оболочке.

Значительный объем валидационной базы для кода CABARET-SC1 представлен экспериментами международных проектов ERCOSAM-SAMARA, HYMERES [2, 3]. Эти проекты в совокупности представляют собой исследования, направленные на изучение формирования и разрушения стратификации водорода, в том числе при работе систем безопасности. В настоящей работе представлено описание математических моделей, реализованных в коде CABARET-SC1, а также приведены некоторые результаты валидации кода.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

**Гидродинамическая модель в приближении низких чисел Маха.** Формирование устойчивой стратификации водородосодержащих смесей наиболее вероятно для медленных течений ( $M = u/c \ll 1$ ). Для описания таких течений удобно перейти к редуцированной системе уравнений, полученной из полной системы уравнений Навье—Стокса путем асимптотического разложения решения в ряд по малому параметру  $M$  [4]

$$\begin{cases} \partial_t \rho + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0; \\ \partial_t(\rho u_i) + \operatorname{div}(\rho u_i \mathbf{u}) = -\nabla_i P^* + \nabla_j \tau_{ij} + (\rho - \bar{\rho}) g_i, \\ i, j = 1, \dots, 3; \\ \partial_t(\rho C_p T) + \operatorname{div}(\rho C_p T \mathbf{u}) = \\ = -\operatorname{div}\left(\mathbf{q} + \left(\sum_{k=1, N} C_{p,k} \mathbf{j}_k\right) T\right); \\ \partial_t(\rho \xi_k) + \operatorname{div}(\rho \xi_k \mathbf{u}) = -\operatorname{div}(\mathbf{j}_k), \quad k = 1, \dots, N, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\rho$ ,  $P$ ,  $\mathbf{u}$ ,  $T$  — плотность, давление, скорость и температура смеси. Давление  $P$  выражается как сумма термодинамического  $P_0 = P_0(t)$ , усредненного по объему смеси, и динамического  $P^* = P^*(x, t)$ , описывающего распространение звуковых волн:

$$\begin{aligned} P^* &= c^2(\rho - \rho_0); \\ \rho_0 &= \rho(P_0/P)^{1/\gamma}; \\ P &= \rho RT, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\gamma$ ,  $R$  — показатель адиабаты и газовая постоянная смеси соответственно. Для увеличения шага интегрирования можно воспользоваться приближением слабой сжимаемости газовой смеси путем введения скорости звука  $c_a < c$ , которая выбирается из условия  $\delta\rho/\rho \sim (u/c_a)^2 \ll 1$ .

Диффузионный перенос представлен в системе (1) тензором вязких напряжений  $\tau_{ij}$  и плотностью потоков тепла  $\mathbf{q}$  и массы  $\mathbf{j}$ , для аппроксимации которых используется градиентное приближение в виде законов Ньютона, Фурье и Фика соответственно.

Применение модели (1) для численного анализа водородной взрывобезопасности на АЭС требует уточнения граничных условий и замыкающих соотношений с учетом физических процессов, протекающих в защитной оболочке в ходе тяжелой аварии и влияющих на распространение водорода. С этой целью в код CABARET-SC1 введены модели поверхностной конденсации пара и теплообмена излучением.

**Модель поверхностной конденсации пара.** Конденсация пара на холодных стенках защитной оболочки и строительных конструкциях играет важную роль в теплогидравлике — интенсивный теплообмен эффективно снижает давление газа внутри оболочки. Роль конденсации в распределении водорода двояка: с одной стороны, она способствует формированию локальных областей с повышенным содержанием водорода, с другой, из-за разности плотности газа в объеме и возле стенок возможно развитие конвективных потоков, способствующих перемешиванию водорода.

На конденсацию пара сильно влияют неконденсирующиеся газы, имеющие тенденцию накапливаться вблизи границы раздела жидкость—газ. Это создает дополнительную устойчивость к массопереносу, поскольку пару

приходится диффундировать через смесь газообразного слоя. Для определения массового потока пара на пленку конденсата используется модель диффузионного слоя [5]

$$j_v = \frac{M_v}{M} \rho D_v \frac{\partial \ln(x_g)}{\partial n}, \quad (3)$$

где  $M_v$ ,  $D_v$  — молекулярная масса и коэффициент диффузии водяного пара;  $x_g = 1 - x_v$  — мольная доля неконденсируемых газов. Данная модель может применяться для описания нестационарных режимов конденсации в областях со сложной геометрией, где приближенные полуэмпирические модели, настроенные на определенный тип течения, могут давать большие погрешности.

В настоящей версии кода предполагается, что на холодной поверхности образуется бесконечно тонкий слой пленки, стекающий вниз под действием силы тяжести. На границе пленки температура принимается равной температуре стенки  $T_{ст}$ , давление пара находится из условия равновесия фаз  $P = P_{нас}(T_{ст})$ . Приближение тонкой пленки применимо для квазистационарных режимов конденсации, протекающих с относительно невысокой скоростью. Такие режимы могут возникать на поздних стадиях тяжелой аварии, на которых формирование устойчивой стратификации атмосферы наиболее вероятно.

**Модель теплообмена излучением.** До последнего времени влиянием излучения при анализе водородной взрывобезопасности на АЭС пренебрегалось из-за его малого вклада в тепловой баланс и перераспределение теплоты в системе. Однако численные исследования экспериментов проекта HYMERES указывают на то, что учет этого явления может приводить к заметному влиянию на перемешивание атмосферы [6].

При тяжелой аварии поступлению водорода в защитную оболочку предшествует выход водяного теплоносителя, т.е. стратификация водорода происходит в горячей влажной атмосфере с характерной температурой до 200 °С и мольной долей пара 50—60%. Пар как многоатомный газ обладает способностью испускать и поглощать лучистую энергию, и в условиях тяжелой аварии парогазовую среду в защитной оболочке можно рассматривать как оптически

плотную, излучение пара — близким к изотропному. Соответственно в коде CABARET-SC1 уравнение переноса излучения реализовано в диффузионном приближении (модель Росселанда) [7] — тепловой поток выражается через градиент температуры

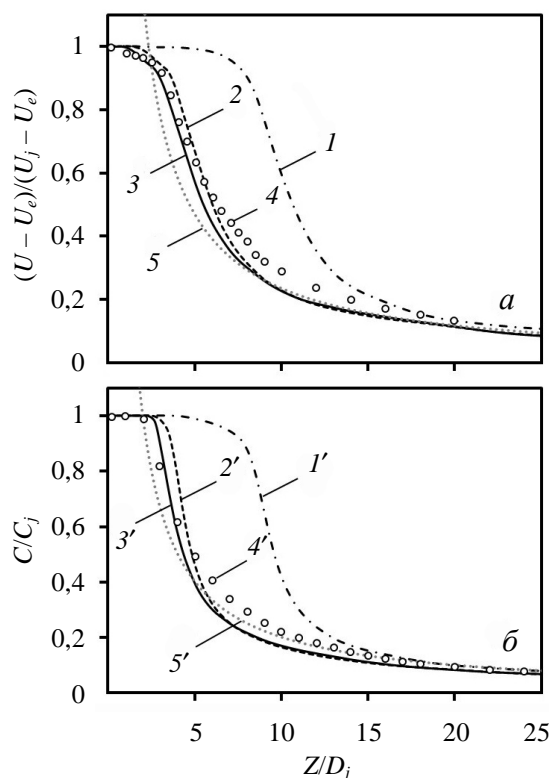
$$q_{\text{рад}} = -16\sigma T^3 / 3a_R \text{grad}(T), \quad (4)$$

где  $\sigma$  — константа Стефана—Больцмана;  $a_R$  — средний коэффициент поглощения пара.

### ВАЛИДАЦИЯ КОДА CABARET-SC1

**Инжекция гелия в спутный поток воздуха.** В целях валидации кода в части моделирования распространения многокомпонентных газовых струй был рассмотрен эксперимент из базы данных ERCOFTAC по инжекции гелия в спутный поток воздуха [8].

Важными характеристиками струи являются средняя скорость и концентрация гелия вдоль оси струи  $z$  (рис. 1). Расширение внешней границы струи и длина ее ядра определяются интенсивностью поперечных пульсаций скорости в турбулентном сдвиговом слое. При недостаточ-

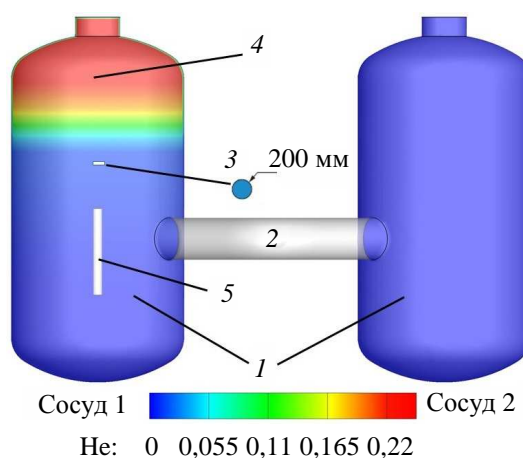


Р и с. 1. Безразмерная скорость (а) и концентрация гелия (б), рассчитанные по методике КАБАРЕ на грубой (1, 1'), средней (2, 2') и подробной сетке (3, 3'), и в эксперименте [8] (4, 4'); 5, 5' — законы подобия Чена и Роди [9]

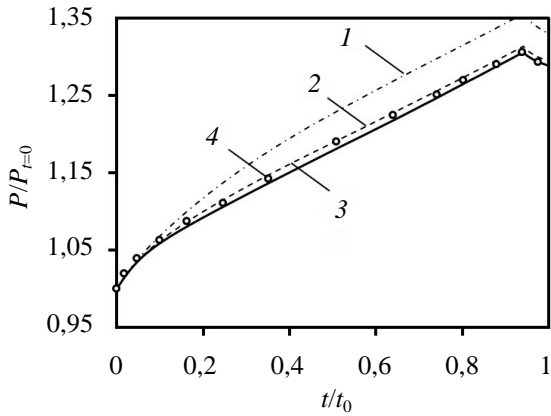
ном пространственном разрешении касательные напряжения в сдвиговом слое снижаются, что приводит к уменьшению угла раскрытия струи и увеличению длины ядра струи.

Расчеты выполнены на трех гексаэдральных сетках разной степени детализации в зоне инжекции с числом ячеек 0,21 (грубая), 0,48 (средняя) и 0,83 млн (подробная). Как видно на рис. 1, решение на грубой сетке завышает скорость и концентрацию на оси струи, но при сгущении сетки наблюдается сходимость решения с экспериментальными данными (результаты попадают в интервал между экспериментальными точками и законами подобия [9]).

**Конденсация пара на стенках при наличии воздуха.** Для валидации модели конденсации пара был выбран эксперимент PE4 (первая фаза), выполненный на установке PANDA [10]. Установка для этого эксперимента представлена двумя герметичными теплоизолированными сосудами высокого давления, соединенными трубопроводом, общим объемом 184 м<sup>3</sup>, высотой 8 м каждый и диаметром цилиндрической части 4 м (рис. 2). На первой фазе эксперимента, имитирующей истечение теплоносителя в защитную оболочку, проводилась накачка перегретого горячего пара с заданным расходом в систему, заполненную горячей паровоздушной смесью. Вдув пара приводил к росту давления в установке (рис. 3). Ограничивающим фактором роста являлась конденсация пара на холодных стенках сосудов, обусловленная ростом давления и мольной доли пара. Конденсация в данном экс-



Р и с. 2. Экспериментальная установка с начальными данными: 1 — сосуды, заполненные смесью воздуха и пара; 2 — соединительная труба; 3 — препятствие в виде круглого диска; 4 — слой, обогащенный гелием; 5 — трубка инжекции



Р и с. 3. Сходимость давления с экспериментальными данными при сгущении сетки: 1, 2, 3 — грубая, средняя, подробная сетка соответственно; 4 — эксперимент [10]

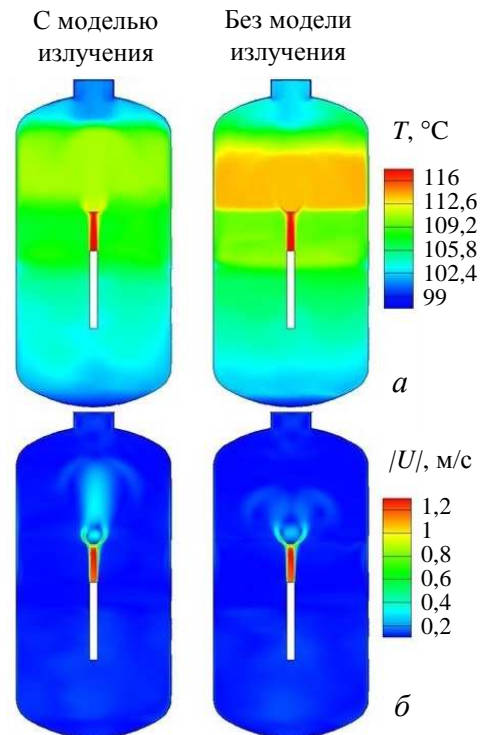
перименте тесно связана с распределением пара и наблюдалась, главным образом, в сосуде с инъекцией, в его верхней половине, что связано аккумуляцией инжектируемого пара в этой зоне. Нелинейный участок на кривой давления относится к переходному периоду установления конденсации, за которым следует линейный рост с установившимся расходом.

В расчетах воспроизведено изменение давления, наблюдаемое в эксперименте, что указывает на достаточно высокую точность моделирования конденсации пара и теплопереноса внутри установки. Расчеты выполнены на трех сетках с числом ячеек 0,13 (грубая), 0,74 (средняя) и 1,61 млн (подробная). На рис. 3 видно, что в расчете на грубой сетке завышено давление, что объясняется недостаточным разрешением диффузионного пограничного слоя. При сгущении сетки решение сходится с экспериментальными данными.

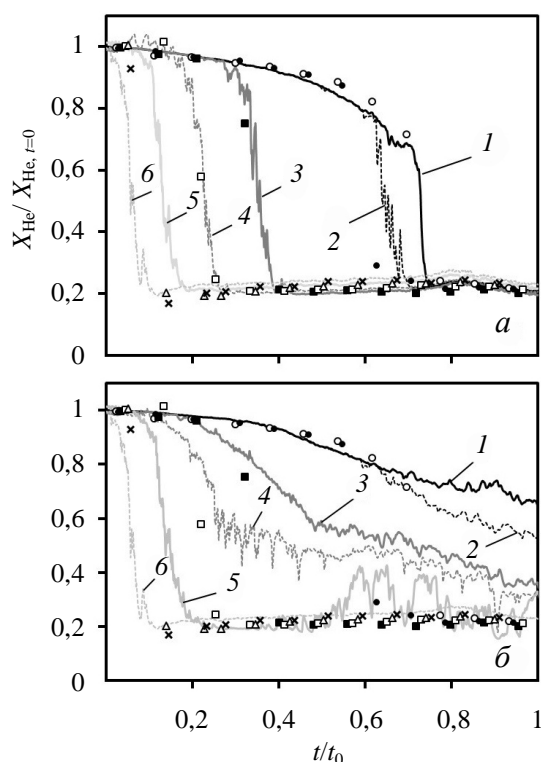
**Размытие гелия струей пара, сталкивающейся с препятствием.** Условия эрозии слоя водорода струйным течением, образующимся при взаимодействии вертикальной струи пара с горизонтальным препятствием, могут возникать в защитной оболочке на поздней фазе аварии, когда в стратифицированную атмосферу из нижних помещений начинает поступать пар, образующийся при стекании горячей расплава на днище реактора с остатками воды или при заливе расплава. При всплытии пар может сталкиваться с оборудованием. Для верификации этого процесса выбран эксперимент HP1\_8, выполненный на установке PANDA [11]. На этом же эксперименте проверяется роль излучения при перемешивании струи.

Вначале в сосудах содержалась однородная смесь из пара и воздуха, за исключением верхней части сосуда 1, где предварительно создавался слой, обогащенный гелием (см. рис. 2). Близость поведения гелия и водорода экспериментально показана в рамках проекта THAI-1 [12]. На расстоянии 1 м от точки инъекции струя пара сталкивалась с горизонтальным препятствием (диском). Эксперимент проводился в условиях роста давления и конденсации пара на стенках сосудов до полного разрушения стратифицированного слоя.

Несмотря на то что температура пара в эксперименте относительно низкая (ниже 120 °С), теплообмен излучением оказывает заметное влияние на расчетную динамику размытия слоя гелия. Прямой эффект излучения состоит в снижении температуры газа в области непосредственно за препятствием из-за повышенного суммарного теплопереноса в газе и теплообмена со стенками. Это видно на рис. 4, а, где сравнивается расчетная температура с излучением и без излучения. Снижение температуры в этой области приводит к повышению плавучести струи и, как следствие, увеличению скорости потока. В результате за препятствием струя лучше «пересобирается» и размытие слоя гелия протекает



Р и с. 4. Усредненные температура (а) и модуль скорости (б) в сосуде 1 в расчетах с моделью излучения и без излучения



Р и с. 5. Мольная доля гелия, рассчитанная по методике КАБАРЕ (1, 2, 3, 4, 5, 6), и в эксперименте [11] (○, ●, ■, □, △, ×) в зоне стратификации на уровне 8, 7,5, 7, 6,7, 6,5, 6,3 м соответственно с учетом (а) и без учета модели излучения (б)

быстрее и ближе к эксперименту (см. рис. 4, б). Эрозия слоя гелия показана на рис. 5 с временными зависимостями мольной доли гелия на разных уровнях в зоне стратификации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Валидационные исследования кода CABARET-SC1 на экспериментах по распространению и перемешиванию легкого газа в условиях, приближенных к тяжелым авариям на АЭС, показывают высокую точность расчетных и измеренных данных при учете всех определяющих процессов и использовании подробной сеточной модели. Код CABARET-SC1 рекомендуется использовать в качестве реперного для расчетов полномасштабной защитной оболочки реактора, а также для интерпретации экспериментальных исследований, проводимых в сложной мультифизической постановке.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М.В. Ломоносова [13].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головизнин В.М., Зайцев М.А., Карабасов С.А. и др. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2013. 472 с.
2. Paladino D., Guentay S., Andreani M. e.a. The Euroatom—Rosatom ERCOSAM-SAMARA projects on containment thermal-hydraulics of current and future LWRs for severe accident management. — In: ICAPP 2012, USA, 2012, p. 1359—1368.
3. Paladino D., Mignot G., Kapulla R. e.a. OECD/NEA HYMERES project: for the analysis and mitigation of a severe accident leading to hydrogen release into a nuclear plant containment. — In: ICAPP 2014, USA, 2014, p. 1314—1322.
4. Rieper F. On the Behaviour of Numerical Schemes in the Low Mach Number Regime. PhD Thesis, Brandenburg University of Technology, 2008.
5. Peterson P., Schrock V., Kageyama T. Diffusion layer theory for turbulent vapor condensation with noncondensable gases. — J. Heat Transfer, 1993, v. 115, № 4, p. 998—1003.
6. Andreani M., Paladino D. OECD/NEA HYMERES Project: Synthesis of Results of the Benchmark on PANDA Test HP1\_6\_2. Tech. Rep. AN-42-17-07. Rev. 0, HYMERES-P-17-48, 2017.
7. Оцирик М.Н. Сложный теплообмен. М.: Мир, 1976.
8. Djeridane T., Amielh M., Anselmet F. e.a. Velocity turbulence properties in the near-field region of variable density jets. — Phys. Fluids, 1996, v. 8, № 6, p. 1614—1630.
9. Wang P., Fruhlich J., Michelassi V. e.a. Velocity near-field of variable density turbulent jets. — Intern. J. Heat Fluid Flow, 2008, v. 29, p. 654—664.
10. Mignot G., Kapulla R., Paladino D. e. a. Test Report for Test PE4—Heat Source Test. Tech. Rep. TM-42-12-09-1, ERCOSAM-WP3-P3.7D, 2013.
11. Paranjape S., Fehlmann M., Kapulla R. e.a. OECD/NEA HYMERES Project: PANDA Test HP1\_8. Quick-Look Rep. TM-42-15-02. Rev. 0, HYMERES-P-15-16, 2015.
12. OECD/NEA THAI Project. Hydrogen and Fission Product Issues Relevant for Containment Safety Assessment under Severe Accident Conditions. Final Rep. NEA/CSNI/R (2010)3, 2010.
13. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И. и др. Практика суперкомпьютера «Ломоносов». — Открытые системы. СУБД, 2012, № 7, с. 36—39.

Поступила в Редакцию 23.08.19