

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев П.Н., Асмолов В.Г., Гагаринский А.Ю. и др. Стратегия развития ядерной энергетики России до 2050 г. — Атомная энергия, 2011, т. 111, вып. 4, с. 183—196.
2. О стратегии ядерной энергетики России до 2050 г. М., НИЦ «Курчатовский институт», 2012.
3. Адамов Е.О., Джалабян А.В., Лопаткин А.В. и др. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. — Атомная энергия, 2012, т. 112, вып. 6, с. 319—331.
4. Сидоренко В.А., Алексеев П.Н., Асмолов В.Г. и др. Ключевые положения ядерной энергетики России до 2050 г. и далее. XXI Александровские чтения. 13 февраля 2015 г. М., НИЦ «Курчатовский институт», 2015.
5. Андрианова Е.А., Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф. Перспективные топливные загрузки реакторов для замкнутого топливного цикла. — Атомная энергия, 2015, т. 118, вып. 5, с. 243—247.
6. Introduction of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle. OECD/NEA, № 7224, 2015.
7. Велихов Е.П., Ковальчук М.В., Азизов Э.А. и др. Термоядерный источник нейтронов для производства ядерного топлива. — Атомная энергия, 2013, т. 114, вып. 3, с. 160—165.
8. Курчатов И.В., Головин И.Н. О возможности создания магнитных термоядерных реакторов. — В кн.: И.В. Курчатов. Собрание научных трудов. Т. 5. М.: Наука, 2012, с. 78—81.
9. Основные положения проекта Энергетической стратегии России на период до 2035 г. Министерство энергетики Российской Федерации (<http://minenergo.gov.ru/node/1913>).

Поступила в Редакцию 31.10.16

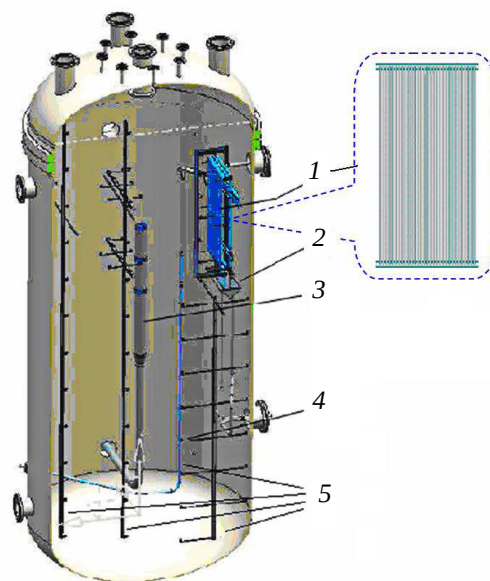
УДК 621.039.58

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ S1, S2 НА УСТАНОВКЕ СПОТ 30 МЕТОДАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

Тарасов О.В., Киселев А.Е., Филиппов А.С., Юдина Т.А. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)

Неравномерное распределение и стратификация водорода в защитной оболочке при тяжелой аварии реактора являются одной из приоритетных задач современных исследований по безопасности АЭС с ВВЭР, поскольку образующаяся взрывоопасная газовая смесь представляет угрозу ее целостности. Распределение водорода определяется тепломассообменом в защитной оболочке и может зависеть от работы систем безопасности, используемых для управления авариями. К их числу относится система отвода тепла, основным элементом которой является конденсатор-теплообменник. Экспериментальное изучение формирования стратификации водорода и влияния на нее конденсатора-теплообменника проводилось в международных параллельных проектах ERCOSAM—SAMARA [1—4]. В настоящей статье обсуждаются результаты анализа методами вычислительной гидродинамики экспериментов, выполненных на установке СПОТ 30 АО «ОКБМ Африкантов» в рамках отечественного проекта SAMARA, для оценки согласованности данных, интерпретации протекающих явлений, а также выявления направлений дальнейшего совершенствования физических моделей CFD-кодов для задач водородной безопасности на АЭС.

Исходные данные для численного моделирования. Расчетная модель экспериментальной установки СПОТ 30 построена на основе данных [3, 4] (рис. 1). Основными моделируемыми элементами являются сосуд давления внутренним объемом 59 м³, внутренней высотой 7,8 м, диаметром цилиндрической части 3,2 м,



Р и с. 1. Рабочий участок установки СПОТ 30 [5]: 1 — конденсатор-теплообменник; 2 — поддон для конденсата; 3, 4 — трубка подачи пара и газа соответственно; 5 — стойки для термопар

трубки инъекции пара и гелия и конденсатор-теплообменник. В модели учитывали слой пористой теплоизоляции толщиной 150 мм.

В эксперименте S1 в сосуд последовательно вдувался сначала пар (фаза I), затем гелий (фаза II), что имитировало последовательность поступления пара и водорода в защитную оболочку на фазах истечения теплоносителя из первого контура и разрушения активной зоны соответственно [5]. Между завершением ввода пара и началом ввода гелия делалась короткая пауза (релаксация на фазе I), после завершения инъекции гелия — более длительная пауза (фаза стабилизации III), к моменту окончания которой формировалась горизонтальная стратификация с преобладанием гелия и пара в верхней части сосуда. На фазе IV включался конденсатор-теплообменник, изменяющий состояние атмосферы (табл. 1, 2).

Таблица 1. Характеристики инъекции пара и гелия

Параметр	S1	S2
Расход, г/с:		
H ₂ O	24,9	23,7
He	1,05	1,05
Температура, °C:		
H ₂ O	120—127	120—127
He	40—140	40—140

Таблица 2. Длительность фаз, с

Фаза	S1	S2
I	1844	2010
Релаксация	250	300
II	750	750
III	600	—
IV	9300	9300

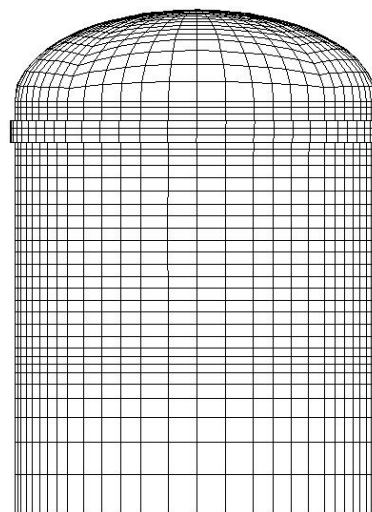
Эксперимент S2 аналогичен S1, но в нем сценарий был немного реалистичнее: на фазе II одновременно с инъекцией гелия включался в работу конденсатор-теплообменник, который продолжал работу и после ввода гелия [5].

В начале эксперимента атмосфера в сосуде была горячая и влажная, с температурой и составом, близкими к однородным. В расчетах небольшая начальная неоднородность объемной доли пара и температуры газа и стенок задавалась путем линейной интерполяции экспериментальных данных.

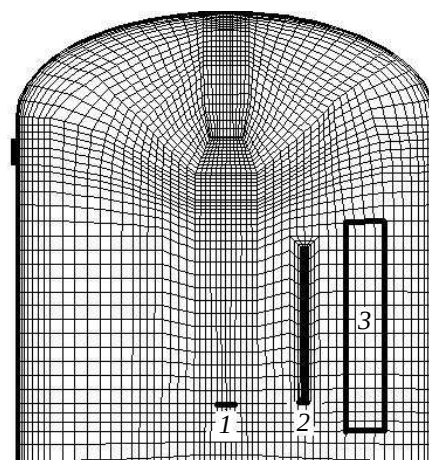
ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Геометрическая модель. Ввиду симметрии установки расчеты проводили в половинной геометрии (рис. 2, 3). Моделировались объемы газовой фазы и стального корпуса без теплоизоляции. Теплоемкость последней была учтена путем увеличения массы корпуса с 16 до 18 т. Сетка содержит 59 640 ячеек, минимальный размер ячейки 0,006 м. Влияние теплоизоляции на граничную теплоотдачу учтено с помощью граничного условия третьего рода на внешней границе стенок сосуда, коэффициент теплообмена калиброван по эксперименту S0, в котором исследовали теплотермические установки [3].

В соответствии с описанием эксперимента пар и гелий в геометрической модели подаются вертикально вверх через трубки 1, 2: ввод пара на оси симметрии, гелия в 0,6 м от оси, оба —



Р и с. 2. Расчетная сетка модели установки СПОТ 30: внешний вид



Р и с. 3. Расчетная сетка, сечение в плоскости симметрии: 1 — подобласть конденсатора-теплообменника; 2, 3 — инъекция гелия и пара соответственно

на высоте 4,9 м от днища. Сечение трубок моделируется как прямоугольное с эквивалентной площадью (см. рис. 3). Для моделирования трубчатого конденсатора-теплообменника выделена подобласть 1 размером $0,75 \times 0,3 \times 1,5$ м, процессы в которой описываются с помощью приближения пористой среды. Ширину и высоту выбирали в соответствии с реальными габаритами конденсатора-теплообменника, толщину — из условия аппроксимации с тем, чтобы область содержала 3—4 ячейки по толщине.

Физическая модель. При моделировании экспериментов S1 и S2 предполагали, что на фазах вдува пара и водорода основную роль играют следующие процессы: инжекция тепла и массы, конвективный и радиационный теплообмен в газе, конденсация пара на стенках и в объеме, граничный теплоотвод. На фазе работы конденсатора-теплообменника доминирующую роль играют конденсация и конвекция в газовой фазе, вызванные работой конденсатора-теплообменника. Физическая модель процессов основана на решении уравнений гидродинамики сжимаемого газа, дополненных уравнениями модели турбулентности, конвективной молекулярной и турбулентной диффузии компонентов смеси и термодинамики газовой смеси. Для CFD-моделирования использовали следующие средства кода FLUENT 14.5 [6]: сопряженное решение уравнений давления и импульса, модель турбулентности с усреднением по Рейнольдсу (в задачах защитной оболочки пока безальтернативная из-за большой длительности процессов и широкого диапазона пространственных масштабов), модель многокомпонентной смеси с компонентами воздух, водяной пар и гелий, модель переноса тепла излучением P1 с рассмотрением газа как серого, без рассеяния и преломления излучения [7]. Для описания пристеночной и объемной конденсации пара использовали модель, внедренную в код FLUENT и верифицированную в ИБРАЭ РАН [8—10]. Модель тепломассообмена в конденсаторе-теплообменнике [9] использует приближение пористой среды.

Отметим, что набор моделей и методов в целом соответствует общему подходу к расчету экспериментов проектов ERCOSAM—SAMARA [10]. Расчеты с этим набором далее упоминаются как основные. Некоторые расхождения расчетных и экспериментальных данных на от-

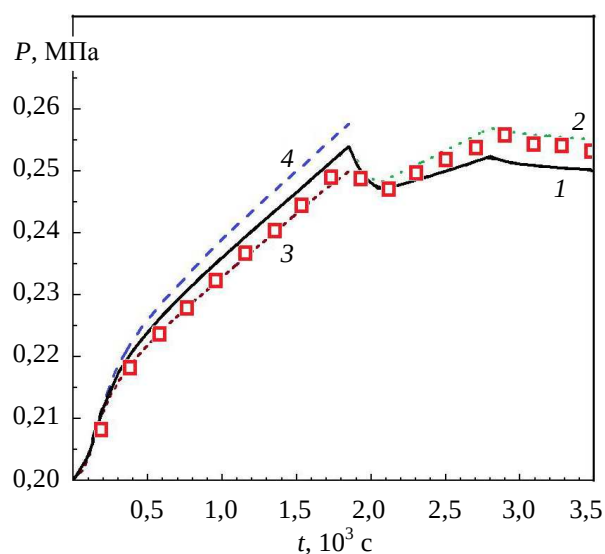
дельных фазах потребовали дополнительных численных исследований, в том числе для анализа вероятного вклада эффектов испарения конденсата. Поведение конденсата на стенках сосуда на фазе инжекции пара описывалось с помощью модели водяной пленки кода FLUENT. Испарение учитывали в рамках упомянутой модели конденсации как обратный процесс.

РАСЧЕТЫ

Наряду с основными расчетами анализировали чувствительность к входным данным и провели параметрические расчеты с формированием водяной пленки на стенках и ее испарением на фазах I—III, с испарением конденсата с днища установки на фазе IV, без теплообмена излучением (для демонстрации роли этого эффекта).

Зависимость давления от времени. В основных расчетах к окончанию ввода пара в обоих экспериментах давление завышено, что связывается с недооценкой поверхностной конденсации (рис. 4). Варьирование начальной температуры стенок в пределах характерной погрешности измерения термопар (1°C) изменяет давление в конце фазы I на 30 кПа, экспериментальное давление попадает в этот коридор.

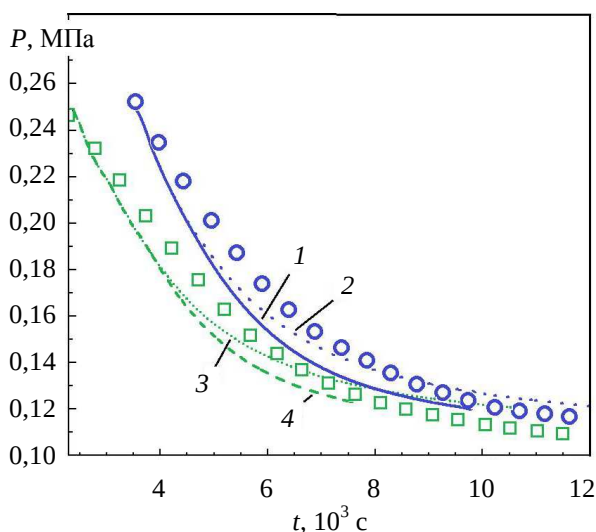
На фазе релаксации давление в эксперименте S1 по сравнению с расчетом снижается медленнее, на фазе инжекции гелия наблюдается



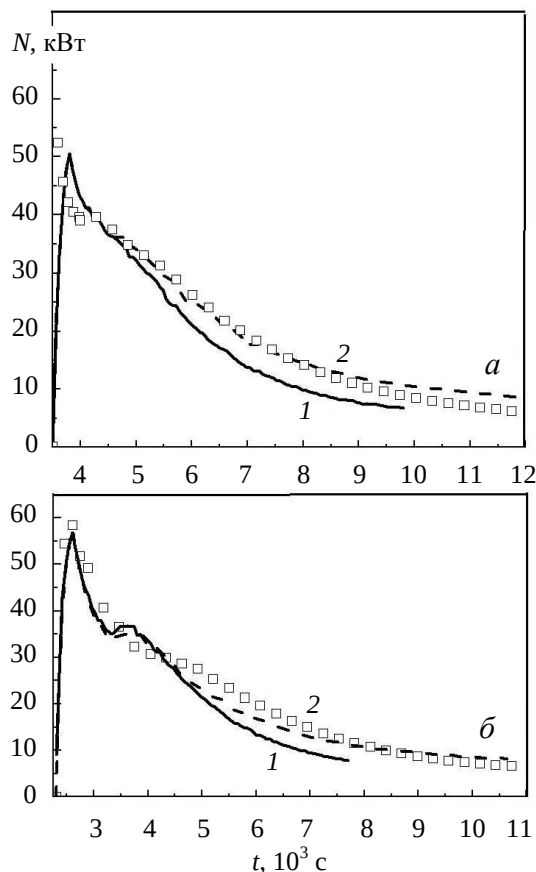
Р и с. 4. Расчетная временная зависимость давления на фазах I—III в эксперименте S1: 1 — основной расчет; 2 — расчет с испарением пленки, с температурой стенки на 1° меньше (3) и на 1° больше (4); $\square$ — эксперимент

более быстрый рост. Причиной может быть протекание конкурирующего процесса испарения конденсата со стенок в верхней части сосуда в течение этих фаз, который не учитывался в базовом расчете. Испарение возможно из-за снижения парциального давления пара ниже давления насыщения при наличии водяной пленки на стенках в верхней части сосуда. Консервативная оценка возможного вклада испарения в эволюцию давления показана параметрическим расчетом с испарением пленки — пленка формируется, но не стекает вниз под действием силы тяжести. Предположение об испарении улучшает соответствие расчета и эксперимента.

На фазе работы конденсатора-теплообменника давление в основных расчетах S1 и S2 снижается быстрее, чем в экспериментах (рис. 5), однако мощность теплоотвода оказывается более низкой (рис. 6). Наиболее вероятной причиной несогласованности давления и мощности конденсатора-теплообменника может быть пренебрежение в основном расчете испарением конденсата, который в эксперименте образовывался на стенках сосуда и конденсатора-теплообменника. Иными словами, в зонах аккумуляции конденсата, на дне сосуда и в поддоне под конденсатором, несмотря на организованный в эксперименте отвод воды, вероятно, оставались неконтролируемые зоны увлажнения. Моделирование системы отвода конденсата требует соответствующих пользовательских функций и не проводилось. Для оценки вклада испарения был проведен параметрический рас-



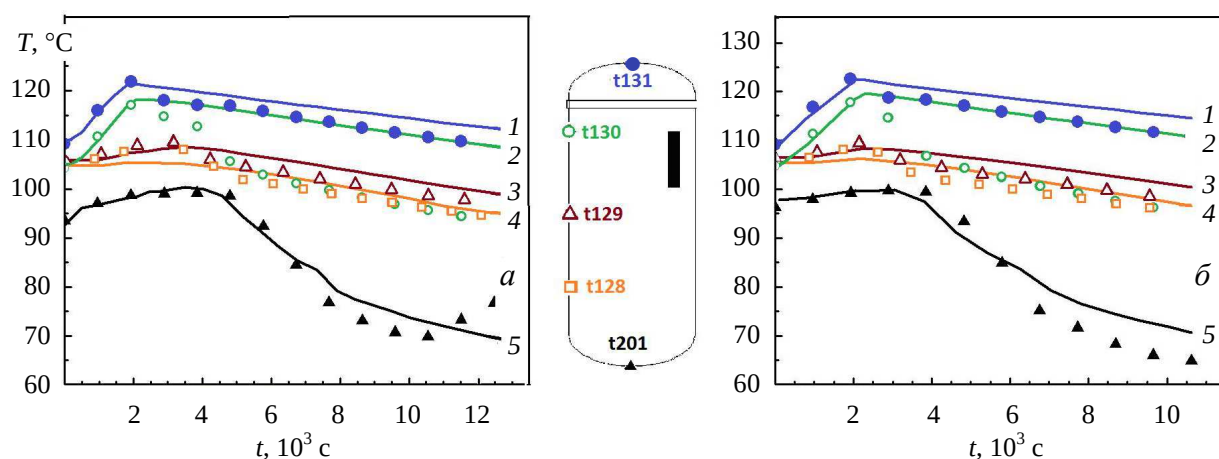
Р и с. 5. Расчетная основная (1, 4) и с испарением с днища временная зависимость (2, 3) на фазе IV в эксперименте S1 (○) и S2 (□) соответственно



Р и с. 6. Временная зависимость мощности конденсатора-теплообменника в эксперименте S1 (а) и S2 (б): 1, 2 — основной расчет и расчет с испарением с днища; □ — эксперимент

чет в предположении наличия на дне сосуда влажной зоны постоянного размера 2 м^2 с температурой, равной температуре днища. На рис. 5, 6 видно, что учет испарения сближает расчет с экспериментом как по мощности теплоотвода, так и по давлению. В то же время эти параметры после 8000 с переоцениваются, что может быть следствием снижения испарения в ходе эксперимента.

Распределение температуры. Предположение об испарении конденсата с днища сосуда на фазе IV объясняет также особенность показаний датчика t201, измеряющего его температуру. Снижение здесь существенно выше, чем измеренное остальными четырьмя датчиками, установленными на боковых стенках и крышке сосуда. Это хорошо воспроизводится параметрическими расчетами с испарением конденсата с днища для обоих экспериментов (рис. 7). После 10 000 с охлаждение в эксперименте S1 сменяется нагревом, что, по-видимому, свидетельствует о прекращении испарения. Отметим,



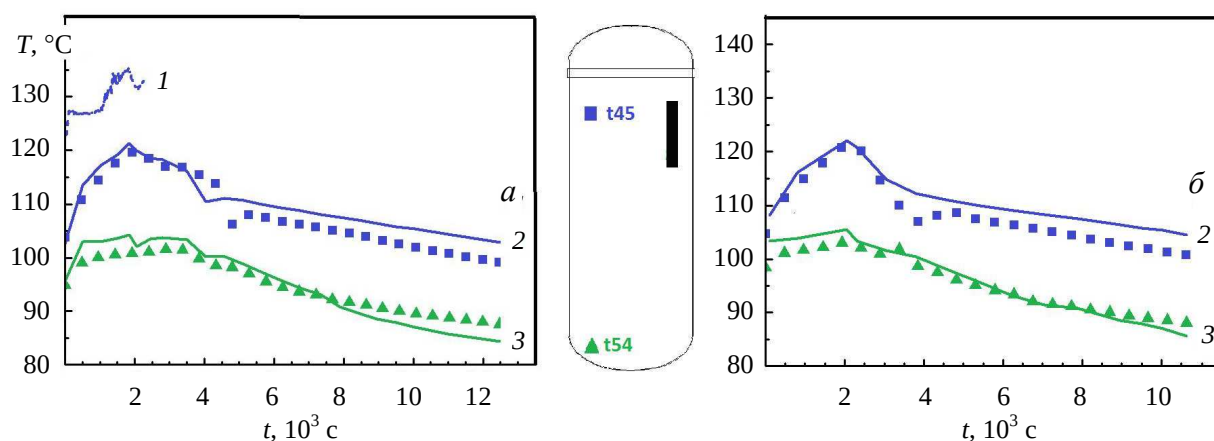
Р и с. 7. Расчетная t131 (1), t130 (2), t129 (3), t128 (4), t201 (5) и измеренная (●, ○, △, □, ▲ соответственно) температура стенок в эксперименте S1 (а) и S2 (б)

что в эксперименте некоторые термопары также показывали снижение температуры в верхней части установки, например, t130 на временном интервале 2050—5000 с в эксперименте S1. Эти локальные отклонения можно объяснить испарением пленки с вертикальных стенок сосуда, что не моделировалось в показанном на рис. 7 параметрическом расчете.

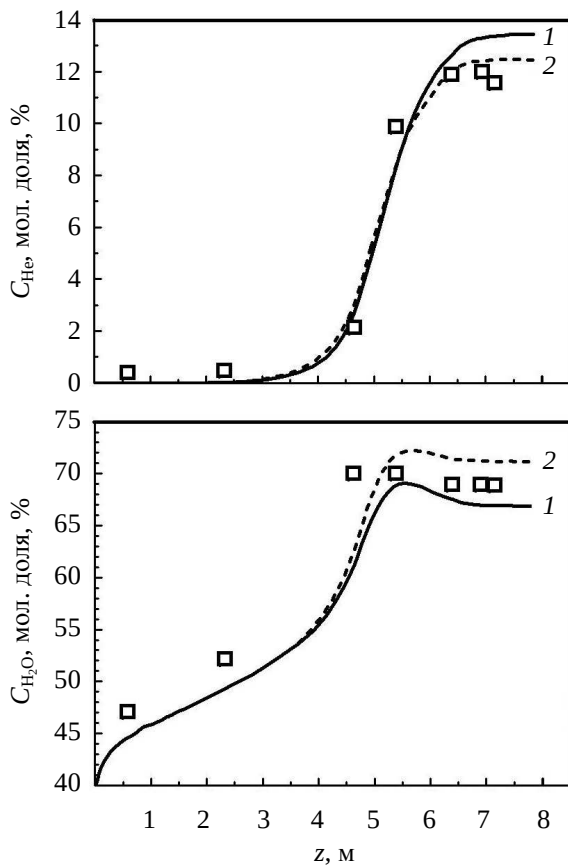
Отклонение расчетной температуры газа в основном объеме не превышает 5 °С, что видно на рис. 8 в точках t45 и t54, расположенных в верхней и нижней половинах сосуда. Для показа роли теплопереноса излучением от газа к стенкам сосуда на фазе инъекции пара приведена также температура газа в датчике t45 из расчета без моделирования излучения. Как видно, теплоотдача излучением приводит к его охлаждению (на ~13° к моменту окончания фазы I), значительно улучшая соответствие с экспериментом.

Распределение компонентов газа. На рис. 9 видно, что после инъекции пара и гелия и в расчете, и в эксперименте наблюдается стратификация. При этом экспериментальный профиль наиболее корректно воспроизводится в расчете с испаряющейся пленкой. В основном расчете наблюдается переоценка максимальной мольной доли гелия, что косвенно подтверждает предположение об испарении конденсата на фазах релаксации, инъекции гелия и стабилизации.

Включение конденсатора-теплообменника в эксперименте S1 приводит к постепенному размытию стратификации (рис. 10). В эксперименте S2 на начальном этапе работы теплообменника формируется стратификация, обусловленная параллельной инъекцией гелия, на более поздних этапах происходит ее эрозия, как и в эксперименте S1. Причиной размывания стратификации является конвективное перемешивание,



Р и с. 8. Расчетная в точке t45 без (1), с моделью излучения (2), t54 (3) и измеренная температура газа (■, ▲) в эксперименте S1 (а) и S2 (б)

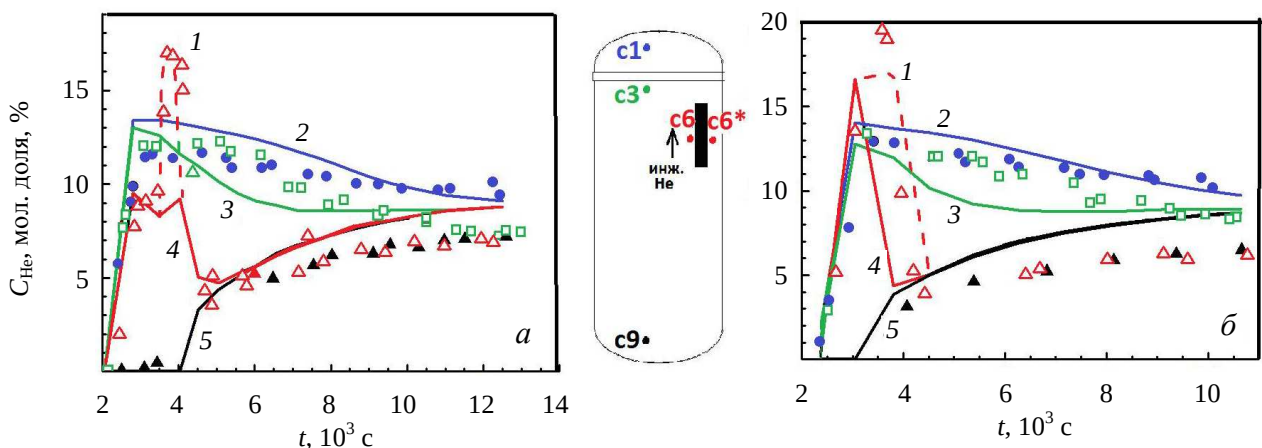


Р и с. 9. Вертикальный профиль распределения пара и гелия в конце фазы III в эксперименте S1: 1 — основной расчет; 2 — расчет с нестекающей пленкой; □ — эксперимент

создаваемое конденсатором-теплообменником. Газ у конденсирующей поверхности остывает и движется вниз, индуцируя поток газа снизу вверх. Этот поток постепенно размывает слой легкого газа. Обогащенный гелием газ, идущий вниз от конденсатора, смешивается с паровоздушной смесью, где содержание гелия ниже. Сверху к конденсатору-теплообменнику подходит смесь, обогащенная паром и гелием. По ме-

ре работы конденсатора-теплообменника контур циркуляции постепенно расширяется вниз и немного вверх. Через 1000 с работы конденсатора-теплообменника поток охлажденного газа достигает согласно расчету дна установки. Как видно на рис. 10, в это же время происходит гомогенизация атмосферы в области от уровня конденсатора-теплообменника и ниже (выравнивание показаний датчиков гелия С6 и С9). Время гомогенизации в расчетах и экспериментах близко. Над верхним краем конденсатора-теплообменника, однако, сохраняется слой с повышенной мольной долей пара и гелия (датчики С1 и С3), хотя и в расчетах, и в экспериментах наблюдается тенденция к его постепенному размытию. В расчете, однако, получается более быстрая эрозия слоя, и в конце происходит полное разрушение стратификации гелия. Это указывает на необходимость тщательной настройки модели конденсатора-теплообменника, что требует квалификационных экспериментов по изучению характеристик устройства.

Несмотря на недостаточность верификации модели конденсатора-теплообменника, в расчетах обоих экспериментов удалось качественно воспроизвести локальный рост мольной доли гелия вблизи устройства, наблюдаемый в экспериментах в течение первых 2000 с работы конденсатора (см. рис. 10, датчик С6), хотя локализация пика немного отличается — в расчетах он прогнозируется в точке С6*, расположенной по другую сторону от конденсатора. Максимальная расчетная мольная доля гелия достигала 16% для S1 и 18% для S2, измеренная — 17 и 20% соответственно. Эффект возникает в начальный период работы конденсатора-теплообменника в



Р и с. 10. Расчетная в точке С6*(1), С1 (2), С3 (3), С6 (4), С9 (5) (а) и измеренная в точке С1(●), С3(□), С6(Δ), С9(▲) мольная доля гелия (б)

относительно спокойной атмосфере (характерная скорость течения в окрестности устройства 1 см/с) и перестает наблюдаться после развития течения через конденсатор-теплообменник. Наличие этого эффекта в ходе тяжелой аварии вряд ли возможно, поскольку конденсаторы-теплообменники АЭС отечественных проектов начинают работать на фазе истечения пара, т.е. задолго до выхода водорода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, расчеты надежно воспроизводят формирование стратификации гелия и ее эрозии в экспериментах S1 и S2 на установке СПОТ 30. При этом численные исследования показали заметную чувствительность скорости роста давления к начальной температуре стенок из-за пристеночной конденсации, а также необходимость учета теплового излучения на фазе инъекции пара. Это соответствует выводам [10] в части CFD-моделирования аналогичных экспериментов на установке PANDA параллельного проекта ERCOSAM. На последующих фазах значимую роль в поведении системы играет испарение конденсата. С учетом влияния этих процессов может быть получено соответствие расчетов и экспериментов S1 и S2 по давлению, температуре и мольной доле пара и гелия. Учитывая существенную роль конденсации/испарения в процессах под защитной оболочкой реактора при тяжелой аварии, необходимо экспериментальное обоснование CFD-моделей формирования конденсата (водяных пленок и их стекания) в соответствующем диапазоне характеристик среды. Экспериментальных данных для верификации модели этих процессов в усло-

виях защитной оболочки в нашей стране нет. Переходные процессы, связанные с работой конденсатора-теплообменника, требуют дополнительных расчетно-экспериментальных исследований в направлении совершенствования модели устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paladino D., Kiselev A.E. Main outcomes from the Euratom—Rosatom ERCOSAM—SAMARA parallel projects for hydrogen safety of LWR. — In: Proc. ICAPP'15, p. 15357.
2. Paladino D., Guentay S., Andreani M. e.a. The EU—Rosatom ERCOSAM—SAMARA projects on containment thermal-hydraulics of current and future LWRs for severe accident management. — In: Proc. ICAPP'12, p. 12325.
3. Kamnev M., Tyurikov O., Khizbullin A. e.a. Overview of SPOT experimental and analytical activities with KUPOL. — In: ICAPP'15, p. 15455.
4. Kamnev M., Khizbullin A. SPOT Facility Description. SAMARA/WP5/D5.11/2012—09.
5. Kamnev M. SPOT Data Analysis Report. SAMARA /WP3/ P3.14/2014—01.
6. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 14.5. ANSYS, Inc., 2012.
7. Siegel R., Howell J.R. Thermal Radiation Heat Transfer. Hemisphere Publishing Corp., 1992. 1072 p.
8. Григорьев С.Ю., Филиппов А.С., Щукин А.А. Разработка и верификация модели конденсации для CFD-расчетов задач водородной безопасности АЭС. — Изв. РАН. Энергетика, 2014, № 4, с. 123—141.
9. Filippov A.S., Grigoryev S.Y., Tarasov O.V. e.a. CFD simulation of PANDA and MISTRA cooler tests of ERCOSAM—SAMARA project. — In: Proc. ICONE'22, 2014, ICONE'22-30557.
10. Filippov A.S., Grigoryev S.Y., Kiselev A.E. e.a. Complete CFD-analysis of ERCOSAM—SAMARA exercises: a step towards advanced modeling of LWR containment under severe accident conditions. — In: ICAPP'15, p. 15309.

Поступила в Редакцию 16.06.16

УДК 530.517.4

ТЕПЛООБМЕН В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ. Ч. 1. ТУРБУЛЕНТНОЕ ЧИСЛО ПРАНДТЛЯ

Кириллов П.Л. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского», г. Обнинск)

Почти четверть века назад была опубликована статья «Турбулентное число Прандтля — где мы находимся?» заслуженного профессора Станфордского университета США У. Кейса

[1]. Она основывалась на обзорной лекции, прочитанной им в 1992 г. при вручении премии им. М. Якоба*. Предыдущий обзор был выполнен А. Рейнольдсом примерно на 20 лет раньше

*Макс Якоб — немецкий теплофизик. Премия его имени, учрежденная Американским обществом инженеров-механиков (ASME) в его честь как пионера науки о теплообмене, присуждается ежегодно. В нашей стране этой премии были удостоены С.С. Кутателадзе (1969), А.И. Леонтьев (1998).