ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 2007, том 45, № 4, с. 565–574

УДК 536.24

АНАЛИЗ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ КОРИУМА С ВОДОЙ С ПОМОЩЬЮ КОДА VAPEX

© 2007 г. В. И. Мелихов, О. И. Мелихов, С. Е. Якуш

Федеральное государственное унитарное предприятие "Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности АЭС" (ФГУП "ЭНИЦ")

Поступила в редакцию 03.04.2006 г.

С помощью кода VAPEX выполнен анализ трех крупномасштабных экспериментов по взаимодействию кориума с водой, полученных на установке FARO. В экспериментах L-14 и L-24 изучалось только перемешивание струи кориума с водой при различных значениях давления, а в эксперименте L-33 после перемешивания с помощью инициирующего устройства был осуществлен паровой взрыв. Расчеты показали, что для корректного определения давления в сосуде и объемного газосодержания под уровнем принципиально важно учитывать процесс генерации водорода во время взаимодействия кориума с водой. Результаты расчетов с помощью кода VAPEX и экспериментальные данные качественно и количественно согласовались между собой как на стадии перемешивания, так и на стадии парового взрыва.

PACS: 44.35.+c, 47.55.-t, 28.41.Te

ВВЕДЕНИЕ

В ходе потенциально возможной тяжелой аварии на атомной электростанции с водяным охлаждением реализуются разнообразные теплогидравлические, механические, физико-химические процессы и явления [1]. На одной из поздних стадий развития тяжелой аварии возможно взаимодействие расплава материалов активной зоны (кориума) с остатками воды в корпусе реактора или при его истечении из корпуса в подреакторную шахту, заполненную водой. Явление взаимодействия расплава с водой активно изучается в России и за рубежом на протяжении последних 30 лет [2–5].

Одна из наиболее известных экспериментальных программ по исследованию взаимодействия кориума с водой была выполнена на установке FARO в Объединенном исследовательском центре Европейской Комиссии (г. Испра, Италия) [6, 7]. Основная цель экспериментов состояла в получении данных по перемешиванию струи расплавленного кориума с водой и по последующему охлаждению в условиях, соответствующих протеканию тяжелой аварии на АЭС с водоохлаждаемым реактором. В первой серии экспериментов изучалось взаимодействие кориума с водой в условиях, типичных для внутрикорпусной стадии протекания тяжелой аварии (высокие давления, вода при температуре насыщения). Во второй серии экспериментов моделировались условия, характерные для внекорпусной стадии (низкие давления, холодная вода). Полученные уникальные экспериментальные данные значительно расширили знания о способности воды охлаждать высокотемпературный расплав материалов активной зоны и позволили определить тепловые нагрузки на днище корпуса реактора, вызванные падением кориума. Помимо этого по экспериментальным данным FARO проверяется адекватность и качество моделирования компьютерных кодов, разработанных для расчета взаимодействия кориума с водой.

Одним из неожиданных открытий экспериментов FARO было обнаружение значительного количества водорода, образовавшегося при взаимодействии воды с расплавом, состоящим из чистых оксидов (UO_2 и ZrO_2). Причина образования водорода в подобных условиях до сих пор не ясна, несмотря на это полуэмпирические модели образования водорода были внедрены в некоторые зарубежные коды. Наличие такой модели в коде COMETA позволило лучше предсказать поведение давления и выделяющейся энергии в эксперименте FARO L-20 [8]. Последующий анализ влияния генерации водорода применительно к экспериментам KROTOS по взрывному взаимодействию расплава с водой привел авторов к предположению о том, что одной из возможных причин плохой взрываемости кориума является наличие водорода, который увеличивает объемное газосодержание жидкости и тем самым препятствует распространению ударных волн.

В Электрогорском научно-исследовательском центре по безопасности АЭС в течение нескольких лет разрабатывается и верифицируется код VAPEX для анализа перемешивания расплава с

Начальные условия экспериментов L-14, L-24 и L-33

Эксперимент	L-14	L-24	L-33
Сосуд	TERMOS	TERMOS	FAT
Уровень воды, м	2.05	2.02	1.62
Масса воды, кг	623	719	531
Давление P_0, МПа	5.1	0.51	0.41
Недогрев воды до T_{sat}, К	0	0	124
Объем газового пространства, м^3	1.26	1.291	3.496
Масса расплава, кг	125	177	100
Температура расплава, К	3037	3023	3070
Диаметр сопла, м	0.092	0.092	fiW(Ù0.05

водой и последующего взрывного взаимодействия [9–13]. В данной работе с помощью кода VAPEX, в который была включена модель образования и транспорта водорода, выполнен расчетный анализ трех экспериментов FARO L-14, L-24 и L-33. Цель исследования состояла в определении влияния водорода на процесс взаимодействия кориума с водой.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ FARO

Крупномасштабная установка FARO состоит из пяти основных частей: печи для получения расплава, отсечного клапана для изоляции печи и экспериментального сосуда, сбросного сосуда, экспериментального сосуда, в котором происходит взаимодействие расплава с водой, и вентиляционной системы, обеспечивающей сброс избыточного давления в случае превышения проектного значения (8 МПа).

Первая группа экспериментов, в том числе L-14 и L-24, выполнялась на установке FARO с использованием рабочего участка TERMOS. Затем этот рабочий участок был заменен на немного более объемный рабочий участок FAT (рис. 1), на котором был выполнен эксперимент L-33. В эксперименте L-33 в отличие от всех предыдущих использовался внешний триггер для инициирования парового взрыва. Триггер представлял собой таблетку взрывчатого вещества пентрита, которая располагалась на дне внутреннего сосуда и была подорвана через 1.125 с после открытия сбросного клапана.

Во время перемешивания и охлаждения кориума измерялись давления и температуры в воде и над водой (в газе) и температуры нижней плиты ловушки кориума. Также проводились измерения давлений и температур в различных точках вентиляционной системы. Всего записывалось 250 сигналов с помощью шести различных записывающих устройств.

В таблице представлены основные параметры экспериментов L-14, L-24 и L-33. Опыты L-14, L-24 были проведены с использованием насыщенной воды, в то время как в эксперименте L-33 температура воды была существенно ниже температуры насыщения. Главным различием между экспериментами L-14 и L-24 является давление, при котором происходит взаимодействие расплава с водой.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КОДА VAPEX

Компьютерный код VAPEX предназначен для расчета взаимодействия кориума с водой в ходе тяжелой аварии на АЭС. В соответствии с последовательными стадиями развития взаимодействия расплава с водой код VAPEX состоит из двух частей. VAPEX-P предназначен для анализа процесса взаимодействия струи (или капель) расплава с водой (фрагментации струи и перемешивания образующихся капель расплава с пароводяной смесью). VAPEX-D служит для расчета взрывной стадии и определения динамических нагрузок. В качестве начальных условий для VAPEX-D используются распределения параметров, полученные в коде VAPEX-P после перемешивания расплава с водой.

Математическая модель кода VAPEX основана на использовании методов механики многофазных сред [14]: выделяются характерные для рассматриваемой ситуации фазы (например, вода, пар, капли расплава и т.п.), для которых формулируются уравнения сохранения массы, импульса и энергии, дополненные соотношениями, описывающими процессы межфазного обмена. Для описания каждой фазы вводятся следующие характеристики: давления, объемные доли, температуры, плотности, удельные внутренние энергии и скорости. Используется общепринятое предположение о равном давлении для всех фаз. Движение рассматривается в двухмерном осесимметричном приближении.

Код VAPEX-P. В коде VAPEX-P при анализе перемешивания расплава с водой рассматриваются следующие фазы: вода, газ (смесь пара, аргона и водорода), струя и капли расплава, а также расплав лежащий на дне сосуда (пористая структура). Описание движения двух фаз – воды и газа – ос-

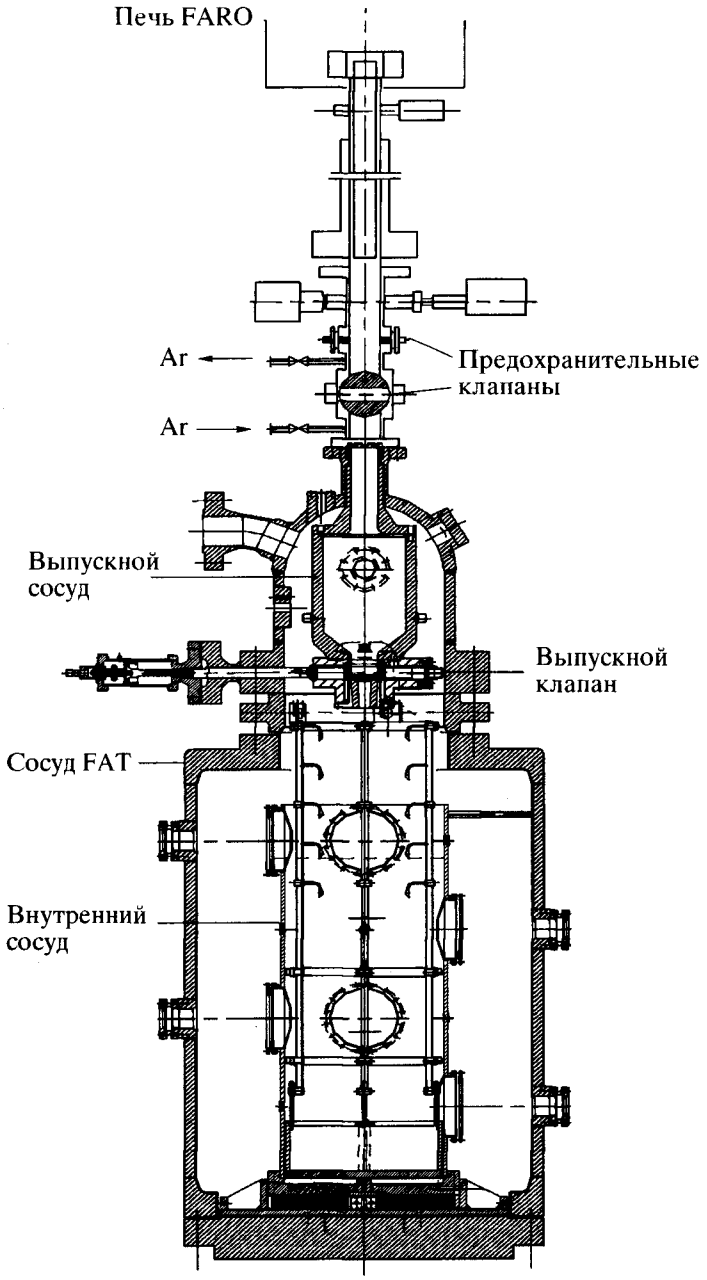

Рис. 1. Общий вид установки FARO с рабочим участком FAT.

новывается на эйлеровом (континуальном) подходе, а динамика расплава (струя, капли и пористая структура) описывается с помощью лагранжева подхода. Для определения межфазного трения, тепло- и массобмена используется подробный набор корреляций и соотношений, основанный на применении карты режимов течения дисперсного потока (пузырьковый, вспененный и капельный) [15, 16].

Для описания расплава рассматриваются три фазы: струя, капли расплава, образующиеся в результате фрагментации струи и пористая структура на дне сосуда.

Струя моделируется системой крупных частиц, движущихся с одинаковой скоростью. В данной работе скорость движения струи определялась следующим образом: до контакта струи с водой предполагалось свободное падение струи без учета трения о газ, а после входа в воду задавалась постоянная скорость для всех частиц, составляющих струю таким образом, чтобы большинство временных событий, наблюдавшихся в эксперименте

(например, момент времени вытекания хвоста струи из сбросного сосуда или момент времени достижения струей днища сосуда), воспроизводились в расчетах.

После входа в воду струя начинает фрагментироваться и соответственно масса и площадь поверхности частиц струи уменьшаются. Использовалась полуэмпирическая корреляция Саито [17] для вычисления длины распада струи, на базе которой определялась скорость распада струи.

Частица струи может либо полностью фрагментировать, либо достигнуть дна сосуда и стать частью пористого образования (в английской литературе используется термин "cake"). Масса пористой структуры равна массе частиц струи и капель расплава, которые достигли дна сосуда. Эти частицы фиксируются на дне сосуда, суммарная площадь теплообмена принимается равной площади поперечного сечения сосуда TERMOS/FAT.

Описание движения капель расплава проводится на основе лагранжева подхода.

Несмотря на то что химический механизм образования водорода при взаимодействии кориума с водой на сегодняшний день неизвестен, в математической модели это явление необходимо учитывать, поскольку наличие неконденсирующегося газа (водорода) оказывает заметное влияние на процесс. Используемая в данной работе модель генерации водорода, предложенная в [8], основана на предположении о том, что скорость выделения водорода пропорциональна скорости фрагментации струи расплава, а константа пропорциональности определяется из экспериментальных данных:

$$\frac{dM_{H_2}}{dt} = C_{H_2}\frac{dM_{frag}}{dt},$$

где M_{H_2} – масса водорода, M_{frag} – масса фрагментированного расплава, C_{H_2} – константа.

Код VAPEX-D. В коде VAPEX-D рассматриваются пять фаз: пар (участвует в процессе микровзаимодействий), вода (не участвует в процессе микровзаимодействий), крупные капли расплава, мелкие капли расплава – фрагменты и неконденсирующийся газ (водород).

Для описания теплопередачи от расплава к охладителю в зоне фрагментации используется концепция микровзаимодействий расплава с охладителем [12, 18], в которой предполагается, что тепло от образующихся фрагментов расплава идет только в близлежащую к фрагментам часть охладителя. Размер этой "горячей" части определяется количеством "холодного" охладителя, переходящего в зону микровзаимодействий ("горячий" охладитель и фрагменты расплава). При этом зона микровзаимодействий рассматривается как отдельная фаза, при которой происходит обмен массой, импульсом и энергией с двумя другими фазами (исходные капли расплава и "холодный" охладитель). В этом случае рост давления связан в первую очередь с тепловым расширением "горячей" части охладителя.

Для описания фрагментации капли расплава используется предположение об относительно высоких скоростях фаз, когда основным механизмом фрагментации является неустойчивость Рэлея–Тейлора [18].

Одной из характерных особенностей модели микровзаимодействий является унос (захват) части "удаленного" охладителя в "близлежащий", находящийся в фазе микровзаимодействий, в результате фрагментации материнской капли расплава. Предполагается, что скорость "захвата" пропорциональна скорости фрагментации расплава в воде.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ FARO L-14 И L-24

Анализ этих экспериментов выполнялся кодом VAPEX-P. Сбросной сосуд в расчетах не моделировался; верхняя граница расчетной области располагалась на высоте 4 м, так что объем свободного пространства над начальным уровнем воды равнялся 0.77 м^3. Для того чтобы воспроизвести объем сепаратора пар/вода, был добавлен дополнительный свободный объем, обеспечивающий необходимый объем газовой фазы.

Константа пропорциональности между скоростью фрагментации струи и скоростью выделения водорода C_{H2} определялась на основе экспериментальных данных. В эксперименте L-14 по различным оценкам водорода образовалось M_{H_2} = = 0.155–0.248 кг, а фрагментированного кориума – 105 кг, следовательно $C_{H_2} = (1.5–2.4) \times 10^{-3}$. Масса водорода, образовавшегося в эксперименте L-24, составила M_{H_2} = 0.257–0.291 кг, а масса фрагментированного кориума – 141 кг, следовательно, $C_{H_2} = (1.8–2.1) \times 10^{-3}$. Учитывая неопределенность в оценках массы выделившегося водорода, константу пропорциональности в модели образования водорода можно принять равной $C_{H_2} = 2 \times 10^{-3}$ для обоих экспериментов.

На рис. 2 сопоставлены расчетные кривые изменения давления (с учетом и без учета образования водорода) и экспериментальные зависимости. После проникновения расплава в воду она начинает испаряться и давление растет, однако если не учитывать, что одновременно с процессом испарения начинает генерироваться водород, то одного образующегося пара недостаточно для обеспечения роста давления до экспериментального уровня (без учета образования водорода конеч-

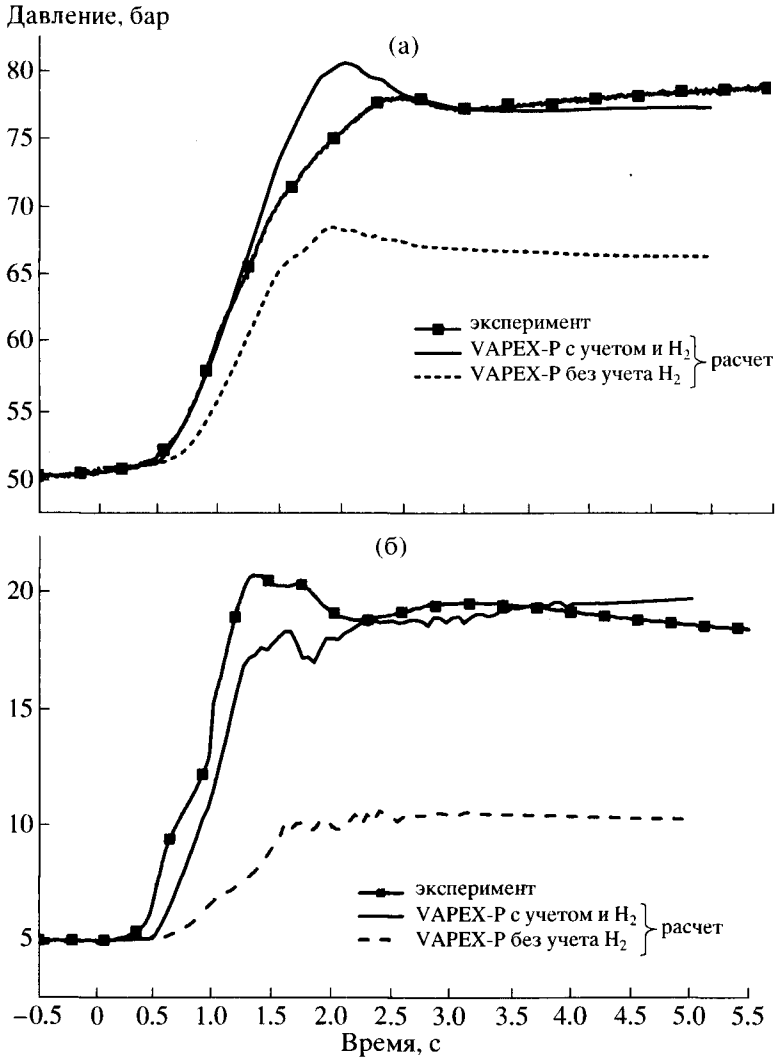

Рис. 2. Изменение давления в сосуде: (а) – для условий эксперимента L-14, (б) – для условий эксперимента L-24.

ное расчетное давление ниже экспериментального на 12 бар для L-14 и на 8 бар для L-24).

На рис. 3 приведены осредненные данные по объему газосодержания, полученные в расчетах с учетом и без учета генерации водорода. В обоих случаях интегрирование выполнялось по объему, соответствующему начальному объему воды, т.е. высота менялась от нуля до начального уровня воды. Максимальное газосодержание в эксперименте L-14 составило около 20%. С учетом выделения водорода объемное паросодержание увеличилось на ~5%. Расчет эксперимента L-24 с моделью образования водорода дал значение максимального газосодержания 40%. Интересно отметить, что расчет эксперимента L-24 без учета водорода, в отличие от L-14, привел к более высокому значению среднего газосодержания (штриховая линия), которое, однако, не должно интерпретироваться как более интенсивное испарение. Детальный анализ показал, что увеличенное среднее газосодержание (рис. 3б) после $t = 1.5$ с связано с вытеснением воды паром из нижней половины сосуда в его верхнюю часть. Такое вытеснение не наблюдается в расчетах с водородом, где газовая и жидкая фазы лучше перемешиваются друг с другом, вызывая более быстрое набухание уровня воды (см. рис. 4б). Без водорода фазы остаются более сепарированными и пар вытесняет объем воды, действуя как поршень. Похожее поведение наблюдается в расчетах эксперимента L-14, в котором скорость выделения водорода не так велика, как в L-24 (см. рис. 4а).

АНАЛИЗ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ FARO L-33

Взаимодействие расплава с водой в условиях недогрева, как это имело место в эксперименте L-33, характеризуется тем, что большая часть пара, ге-

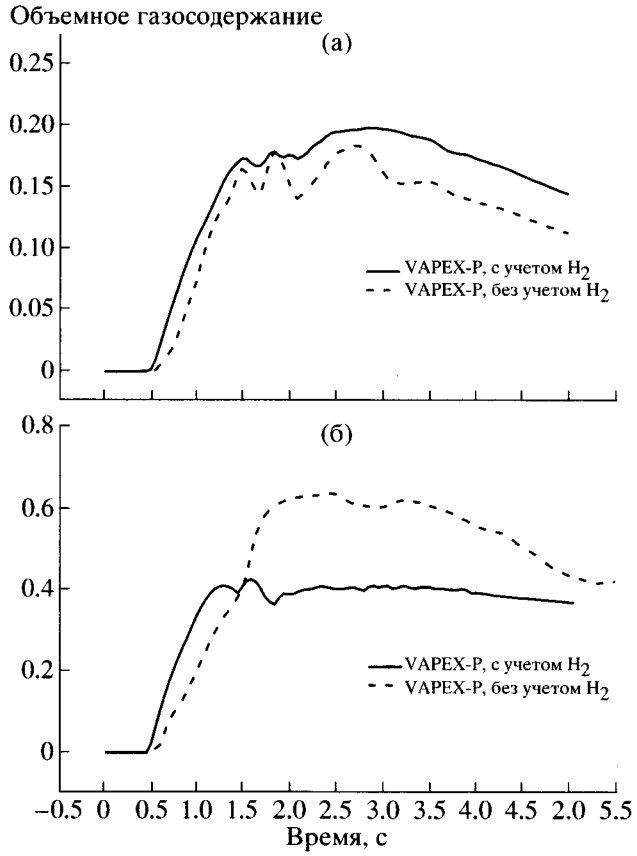

Рис. 3. Расчетное изменение объемного газосодержания в сосуде: (а) – для условий эксперимента L-14, (б) – для условий эксперимента L-24.

нерируемого при кипении воды вблизи горячего расплава, смешивается затем с недогретой водой и быстро конденсируется, не давая вклад в увеличение давления. Расчеты с помощью кода VAPEX-P показали высокую чувствительность получающихся решений к размеру расчетных ячеек. В частности, когда по радиусу сосуда задавалась лишь одна ячейка (по высоте – 25 ячеек), то тепло, получаемое водой от струи и капель расплава, распределялось на объем этой большой ячейки, так что кипение не реализовывалось во время взаимодействия расплава с водой. Однако в этом случае среднее газосодержание было низким даже при учете выделения водорода. С другой стороны, когда применялась подробная сетка 4 × 80 ячеек (примерно такое же разбиение использовалось в расчетах экспериментов L-14 и L-24), наблюдался более интенсивный нагрев в ячейках, содержащих струю расплава, поэтому там выделялось некоторое количество пара и рассчитанное среднее газосодержание на момент инициирования взрыва хорошо согласовывалось с экспериментальными оценками (5%). Однако попытки рассчитать весь процесс взаимодействия расплава с водой потерпели неудачу из-за неустойчивости, развивающейся после начала локального кипения в ячейках, содержащих струю расплава, где жидкость достигала температуры кипения при локальном давлении. Быстрое вскипание и увеличение удельного объема смеси сопровождались конденсацией пара, что в результате после нескольких осцилляций приводило к остановке расчетов.

В этих обстоятельствах был использован следующий подход. Во-первых, расчеты взаимодействия расплава с охладителем были выполнены с одной расчетной ячейкой по радиусу. Во-вторых, начальная стадия взаимодействия расплава с водой была рассчитана с использованием полноценной двухмерной сетки (4 ячейки по радиусу и 80 ячеек по высоте) до момента возникновения численной неустойчивости кода. Следует отметить, что рассчитанный период времени включал в себя момент t = 1.125 с, когда в эксперименте L-33 инициировался паровой взрыв. Поля всех переменных, соответствующих этому моменту времени использовались как начальные условия для расчета парового взрыва кодом VAPEX-D.

Параметры физических моделей в коде VAPEX-P при расчете эксперимента L-33 были те же самые, что и для L-14 и L-24, за исключением константы C_{H_2} в модели образования водорода. Масса образовавшегося водорода в эксперименте L-33 составила 0.0298 кг, а масса фрагментированного кориума – 89 кг. Таким образом, в соответствии с этими данными константа C_{H_2} равнялась 3.3×10^{-4}. Однако после некоторых предварительных расчетов это значение было увеличено до $C_{H_2} = 4 \times 10^{-4}$ для улучшения совпадения расчетного значения среднеобъемного газосодержания на момент инициирования взрыва с экспериментальным значением 5%.

На рис. 5 показаны временные зависимости давления в сосуде FAT, полученные в расчетах с различными сетками. Видно, что кривые давления для расчетных сеток, содержащих 1 × 25 и 2 × 50 ячеек, с учетом выделения водорода практически совпадают также и с начальной частью кривой давления, полученной на сетке 4 × 80 (до t = 1.25 с, далее развивается численная неустойчивость). Давление растет со скоростью, близкой (но несколько меньшей) к скорости, наблюдаемой в эксперименте. Расчеты без учета генерации водорода показывают заметно большую чувствительность к расчетной сетке.

На рис. 6 показано осредненное по объему расчетное газосодержание с учетом генерации водорода. Интегрирование выполнялось по начальному объему жидкости, т.е. высота менялась от нуля до начального уровня воды 1.62 м. Расчеты на

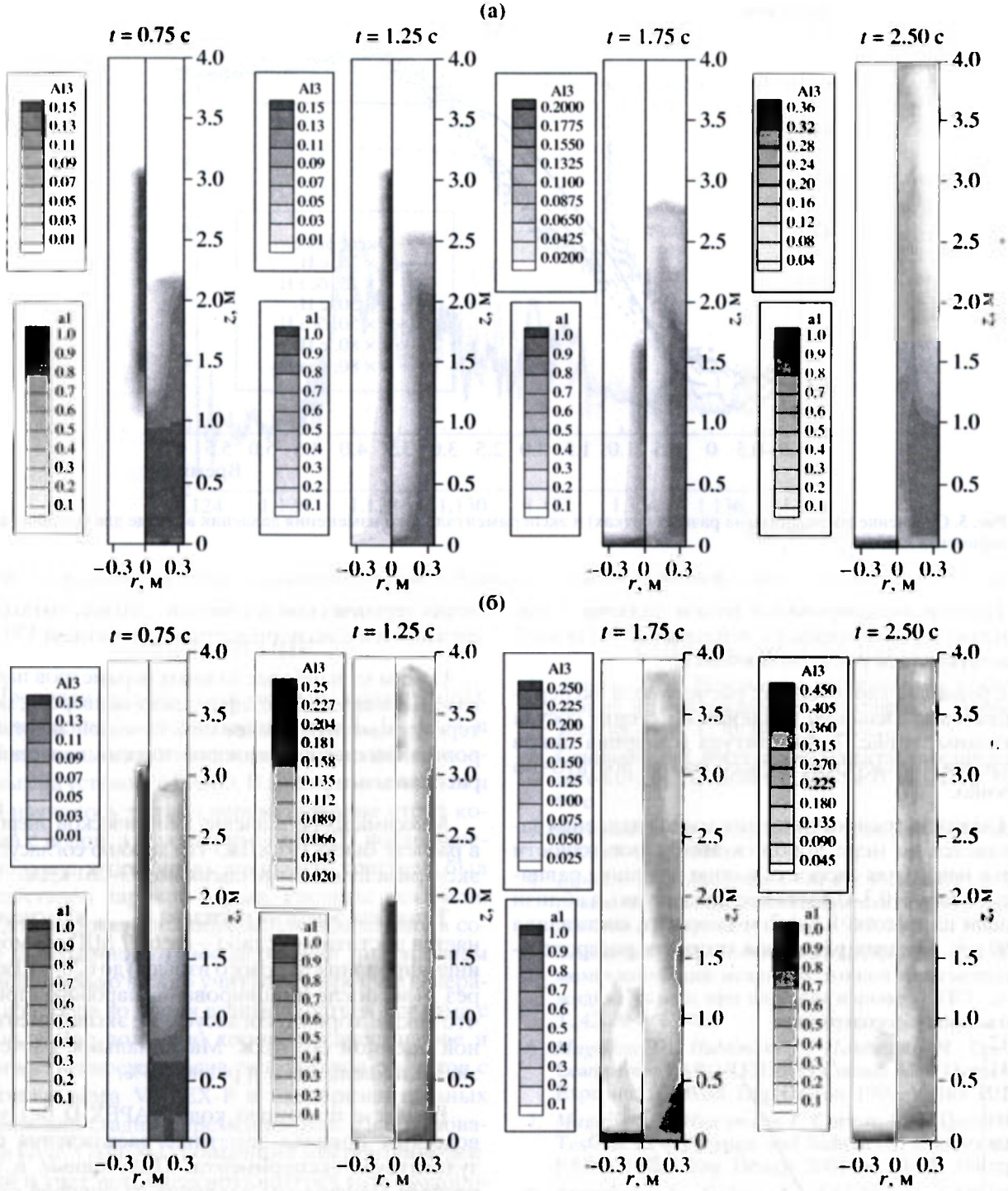

Рис. 4. Проникновение струи расплава (слева) в воду. В левой части сосуда показана объемная доля расплава, справа – воды. (а) – эксперимент L-14, (б) – эксперимент L-24.

грубых сетках приводили к низкому значению газосодержания: на момент времени $t = 1.125$ с (инициирование триггера) эта величина не превосходила 2.5–3%. На подробной сетке среднее газосодержание достигает к этому моменту времени значения ~4.2%, что немного ниже экспериментальной оценки этой величины 5%.

АНАЛИЗ ВЗРЫВА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ FARO L-33

В качестве начальных условий расчета парового взрыва использовались результаты анализа стадии перемешивания с помощью кода VAPEX-P на расчетной сетке 4 × 80.

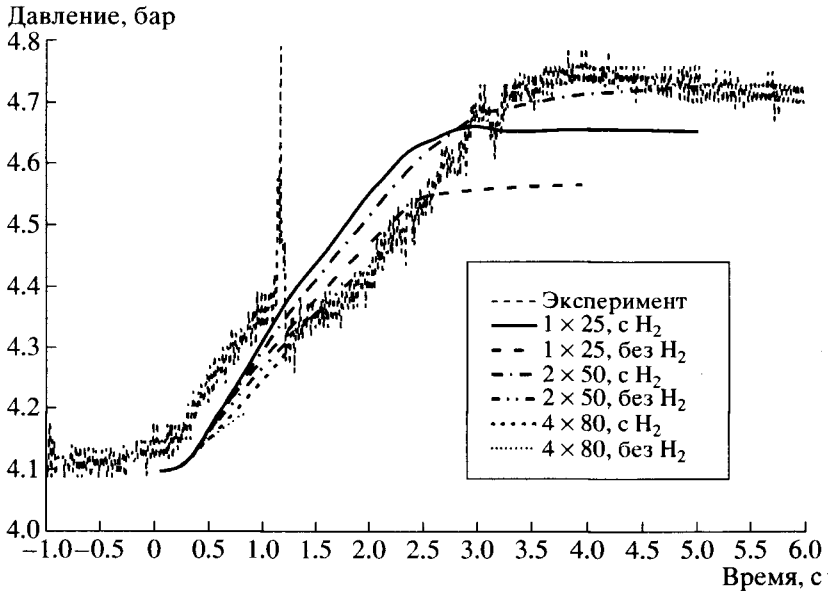

Рис. 5. Сравнение расчетного (на разных сетках) и экспериментального изменения давления в сосуде для условий эксперимента L-33.

Триггер моделировался путем задания в начальный момент высокого давления 20 МПа в соответствующей расчетной ячейке.

Сравнение характерных расчетных и экспериментальных значений давления на стенке сосуда показаны на рис. 7. Амплитуда и ширина пиков давления согласуются между собой достаточно хорошо.

Скорость распространения волны давления замедляется по мере приближения к поверхности воды: начальная скорость волны давления равнялась ~520 м/с (0.3–0.4 м выше дна сосуда), а вблизи уровня на высоте 1.1–1.2 м скорость составляла ~260 м/с. Средняя расчетная скорость распространения термической детонации ~380 м/с, что хорошо согласуется с экспериментальной оценкой 370 м/с.

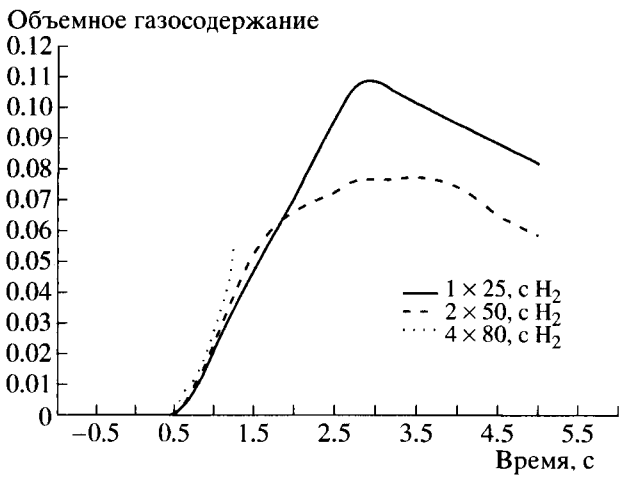

Рис. 6. Расчетное изменение объемного газосодержания в сосуде для условий эксперимента L-33.

Одним из наиболее важных параметров парового взрыва является коэффициент конверсии, характеризующий отношение кинетической энергии пароводяной смеси к тепловой энергии, запасенной в расплаве.

Максимальное значение кинетической энергии K в расчете было 191 кДж, что хорошо согласуется с экспериментальными оценками 93–261 кДж.

Тепловая энергия расплава $E_{th,\,melt}$ в расчете меняется достаточно слабо – от 63.7 МДж (в момент инициирования парового взрыва) до 62.5 МДж (через 14 мс после инициирования парового взрыва), что также хорошо согласуется с экспериментальной оценкой 66 МДж. Максимальное расчетное значение величины η равно 0.3%.

Расчет с помощью кода VAPEX-D без учета водорода показал заметные расхождения с результатами эксперимента. Полученные в этом расчете максимумы давления на боковой стенке сосуда превышают экспериментальные значения в полтора–два раза. Средняя скорость распространения волны термической детонации без учета неконденсирующегося газа равна ~1200 м/с (экспериментальная оценка – 370 м/с). Присутствие неконденсирующегося газа в смеси расплава с охладителем снижает ее упругие свойства, что приводит к уменьшению скорости распространения волны и ее амплитуды, наблюдавшимся в эксперименте.

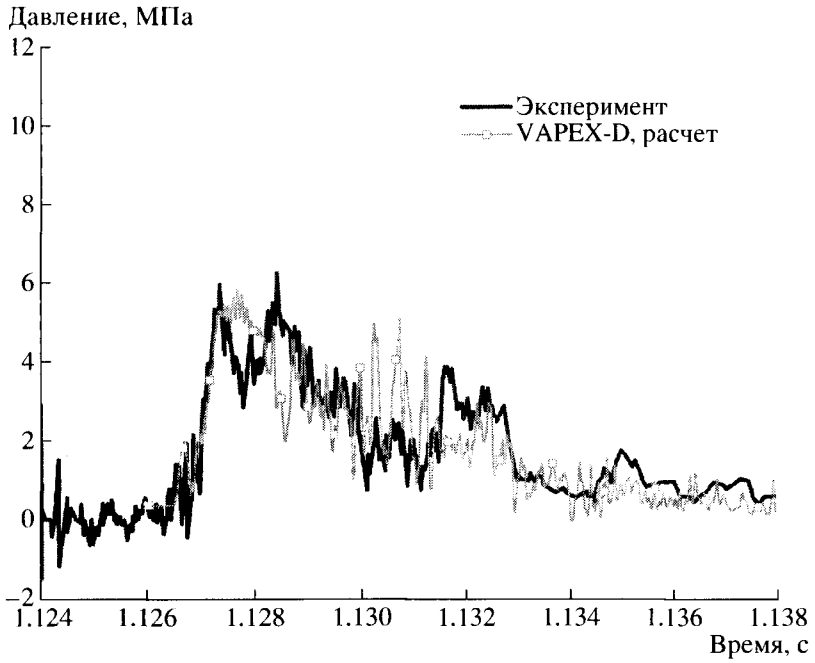

Рис. 7. Сравнение расчетного и экспериментального изменения давления на боковой стенке сосуда на высоте 0.715 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ с помощью кода VAPEX крупномасштабных экспериментов L-14, L-24 и L-33 по взаимодействию кориума с водой, выполненных на установке FARO. В экспериментах L-14 и L-24 изучалось только перемешивание струи кориума с водой, а в эксперименте L-33 после перемешивания с помощью внешнего триггера был осуществлен паровой взрыв. Расчеты показали, что для корректного определения давления в сосуде и объемного газосодержания под уровнем принципиально важно учитывать процесс генерации водорода во время взаимодействия кориума с водой. Было получено хорошее качественное и количественное согласие результатов расчетов с помощью кода VAPEX-P и экспериментальных данных для стадии перемешивания. Использование в коде VAPEX-D концепции микровзаимодействий и учет неконденсирующегося газа (водорода) позволили адекватно воспроизвести паровой взрыв (распространение волны термической детонации) в эксперименте L-33.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 04-02-17571-а и № 06-08-00445-а) и Объединенного исследовательского центра Европейской Комиссии (контракт № 320209 (ADM/PL/hv320209-1102)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Асмолов В.Г.* Результаты исследований тяжелых аварий водоохлаждаемых реакторов // Атомная энергия. 1994. Т. 76. Вып. 4. С. 282.
2. *Степанов Е.В.* Физические аспекты явления парового взрыва. Препринт ИАЭ–5450. М.: ИАЭ, 1991. 96 с.
3. *Berthoud G.* Vapor Explosions // Ann. Rev. Fluid Mech. 2000. V. 32. P. 573.
4. *Ефанов А.Д., Загорулько Ю.И., Ремизов О.В.* Паровые взрывы: анализ экспериментальных исследований // Теплоэнергетика. 1997. № 8. С. 14.
5. *Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Король Е.З.* Термомеханический механизм тонкой фрагментации жидких капель при паровом взрыве // ТВТ. 2004. Т. 42. № 3. С. 491.
6. *Magallon D., Huhtiniem I., Hohhmann H.* Lessons Learnt from FARO/TERMOS Corium Melt Quenching Experiments // Nucl. Eng. Design. 1999. V. 189. P. 223.
7. *Magallon D., Huhtiniemi I.* Corium Melt Quenching Tests at Low Pressure and Subcooled Conditions in FARO // Nucl. Eng. Design. 2001. V. 204. P. 369.
8. *Annunziato A., Yerkess A., Addabbo C.* FARO and KROTOS Code Simulation and Analysis at JRC Ispra // Nucl. Eng. Design. 1999. V. 189. P. 359.
9. *Nigmatulin B.I., Melikhov V.I., Melikhov O.I.* VAPEX Code for Analysis of Steam Explosions under Severe Accidents. In: Heat and Mass Transfer in Severe Nuclear Reactor Accidents / Ed. Rogers J.T. N.Y.: Begell House, 1995. P. 540.
10. *Мелихов В.И., Мелихов О.И., Соколин А.В.* Взрывное взаимодействие расплава с водой. Моделирование кодом VAPEX-D // ТВТ. 2002. Т. 40. № 3. С. 466.

11. *Мелихов В.И., Мелихов О.И., Парфенов Ю.В.* Численное моделирование процесса предварительного перемешивания струи расплава с водой с помощью кода VAPEX-P // Теплоэнергетика. 2003. № 11. С. 35.

12. *Соколин А.В., Кузнецов В.Д., Мелихов О.И.* Расчетный анализ взаимодействия кориума с водой // Теплоэнергетика. 2004. № 8. С. 73.

13. *Melikhov V.I., Melikhov O.I., Sokolin A.V., Yakush S.E.* Analysis of FARO Tests on Corium-Water Interaction with VAPEX Code // Proc. 11th Intern. Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-11). Avignon, France. 2005. Paper 067.

14. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. Т. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.

15. *Ishii M., Mishima K.* Two-Fluid Model and Hydrodynamic Constitutive Relations // Nucl. Eng. Design. 1984. V. 82. P. 107.

16. *Angelini S., Yuen W.W., Theofanous T.G.* Premixing-Related Behavior of Steam Explosions // Proc. CSNI Specialists Meeting on Fuel-Coolant Interactions. Santa Barbara, USA, 1994. P. 99.

17. *Saito M.* Experimental Study on Penetration Behaviors of Water Jet into Freon-11 and Liquid Nitrogen // ANS Proc. of National Heat Transfer Conf. Houston, USA, 1988. P. 37.

18. *Chen X., Yuen W.W., Theofanous T.G.* On the Constitutive Description of the Microinteractions Concept in Steam Explosions // Proc. 7th Intern. Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-7). N.Y., USA. 1995. V. 3. P. 1586.