

УДК 532.529

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ РАСПЛАВА С ОХЛАДИТЕЛЕМ НА УСТАНОВКЕ FARO С ПОМОЩЬЮ КОДА VAPEX

Мелихов В.И., Мелихов О.И., Парфенов Ю.В., Соколин А.В (ЭНИЦ ВНИИАЭС)

В ходе развития тяжелой аварии на АЭС с плавлением активной зоны может возникнуть ситуация частичного разрушения корпуса реактора с проливом расплава в шахту, заполненную водой. При этом возможно взрывное взаимодействие расплава с водой (паровой взрыв), влекущее тяжелые последствия.

Экспериментальные и теоретические исследования взрывного взаимодействия расплава с охладителем (см., например, обзоры [1,2]) позволяют выделить следующие стадии крупномасштабного парового взрыва: предварительное перемешивание расплава с охладителем, инициирование парового взрыва, формирование и распространение фронта термической детонации, расширение продуктов взрыва.

Обеспечение требований к безопасности АЭС в случае гипотетического парового взрыва требует всестороннего экспериментального и теоретического исследования всех стадий парового взрыва. Особый интерес представляют эксперименты на крупномасштабных стендах, в которых исследуется взаимодействие большой массы расплава активной зоны с охладителем в условиях, близких к реальным. Численное моделирование подобных экспериментальных исследований является одним из важнейших этапов верификации теплогидравлических кодов, предназначенных для моделирования тяжелых аварий на АЭС.

В 1999 г. на крупномасштабной установке FARO, расположенной в Объединенном исследовательском центре Европейского сообщества (Испра, Италия), был выполнен эксперимент L-33, в котором впервые со времени начала экспериментальной программы, посвященной изучению перемешивания и охлаждения расплава активной зоны в воде, была сделана попытка инициировать паровой взрыв. Настоящая статья содержит анализ результатов эксперимента L-33, выполненный с помощью разработанного в ЭНИЦ ВНИИАЭС программного комплекса VAPEX.

Краткое описание кода VAPEX. Программный комплекс VAPEX (Vapor Explosion) состоит из кодов VAPEX-P и VAPEX-D, математические модели которых основаны на использовании методов механики многофазных сред. Первый код (Vapor Explosion — Premixing) предназначен для расчета предварительного перемешивания высокотемпературного расплава с охладителем. Рассматриваются следующие три фазы: вода, пар и расплав. Для анализа движения фаз воды и пара применяется эйлерово описание. Динамика расплава, который в свою очередь может находиться в виде струи, каплей или слоя на дне сосуда, описывается на основе лагранжева подхода. Код VAPEX-P был успешно верифицирован на результатах экспериментов MAGICO и QUEOS [3, 4]. Второй код (Vapor Explosion — Detonation) предназначен для описания взрывного взаимодействия расплава с водой. Математическая модель взрывного взаимодействия, принятая в этом коде, основана на концепции микровзаимодействий, впервые предложенной в работе [5]. Согласно концепции смешение образующихся фрагментов расплава начинается в непосредственной близости от границ исходной материнской капли и распространяется, вовлекая постепенно все больше фрагментов и охладителя. В математическую модель кода введена специальная фаза микровза-

модсий, состоящая из фрагментов расплава и прилегающего к ним охладителя. Всего в коде рассматриваются четыре фазы: крупные (исходные) капли и мелкие (образующиеся после дробления) фрагменты расплава, пароводяная смесь вблизи фрагментов и удаленная от них. Подробное описание математической модели содержится в работе [6].

Эксперимент L-33. Во второй половине 90-х годов на установке FARO была проведена серия экспериментов, в которой исследовали перемешивание расплава активной зоны с водой, в соответствии с внекорпусным сценарием развития тяжелой аварии [7]. Начальные условия в данной серии экспериментов выбирали в целях моделирования гипотетической аварийной ситуации на АЭС, когда расплав активной зоны проникнет через разрывы в нижней части корпуса реактора в шахту, заполненную водой. Низкое давление ($\sim 0,2\text{--}0,5$ МПа) и значительный недогрев воды (~ 100 К) должны были способствовать инициированию парового взрыва, однако спонтанных паровых взрывов не зарегистрировано. Эксперимент L-33 стал первым, проведенным на установке FARO, в котором была сделана попытка инициирования парового взрыва с помощью внешнего триггера.

Схема установки FARO приведена на рис. 1. Экспериментальный сосуд FAT состоит из внешнего и внутреннего сосудов. Внешний заполнен инертным газом, внутренний — водой, в которую выливается расплав активной зоны из выпускного сосуда. Сосуд FAT через выпускной сосуд и выпускную трубу, оборудованную специальными клапанами, сообщается с печью FARO, в которой происходит плавление путем прямого нагрева смеси гранул $\text{UO}_2\text{--ZrO}_2$ между двумя электродами. Группа клапанов, расположенных на выпускной трубе, предназначена для изоляции печи от экспериментального сосуда на время проведения эксперимента. Выпускной сосуд оборудован специальным клапаном для выравнивания давления в экспериментальном и выпускном сосудах. Благодаря этому клапану истечение расплава происходит исключительно под действием силы тяжести. Истечение расплава начинается в момент подрыва мембраны клапана, расположенного выше выпускного отверстия. Триггер — таблетка взрывчатого вещества, предназначенная для инициирования парового взрыва — был расположен на дне экспериментального сосуда.

В эксперименте L-33 100 кг расплава (80% $\text{UO}_2\text{--}20\%$ ZrO_2) под действием силы тяжести выливались из выпускного сосуда во внутренний, содержащий 531 кг недогретой воды при давлении 0,41 МПа и температуре 294 К (недогрев 122 К). Температура расплава составляла 3070 К, высота падения — 0,77 м, уровень воды в сосуде — 1,62 м. Объем газовой смеси (99,65% $\text{Ag} + 0,35\%$ пара) был равен $3,496\text{ м}^3$.

Эксперимент начался подрывом мембраны выпускного клапана, после чего струя расплава под действием силы тяжести стала выливаться из выпускного сосуда. Передняя кромка струи расплава коснулась поверхности воды через 0,4 с. После вхождения в воду теплоотдача от расплава значительно возросла за счет фрагментации струи расплава в воде. Однако температура воды не достигла температуры насыщения за все время проведения эксперимента вследствие ее значительного начального недогрева. Рост давления, наблюдавшийся в эксперименте до и после парового взрыва, был обусловлен, главным образом, нагревом неконденсирующегося газа и генерацией водорода, вызванной взаимодействием расплава с охладителем.

Эксперимент начался подрывом мембраны выпускного клапана, после чего струя расплава под действием силы тяжести стала выливаться из выпускного сосуда. Передняя кромка струи расплава коснулась поверхности воды через 0,4 с. После вхождения в воду теплоотдача от расплава значительно возросла за счет фрагментации струи расплава в воде. Однако температура воды не достигла температуры насыщения за все время проведения эксперимента вследствие ее значительного начального недогрева. Рост давления, наблюдавшийся в эксперименте до и после парового взрыва, был обусловлен, главным образом, нагревом неконденсирующегося газа и генерацией водорода, вызванной взаимодействием расплава с охладителем.

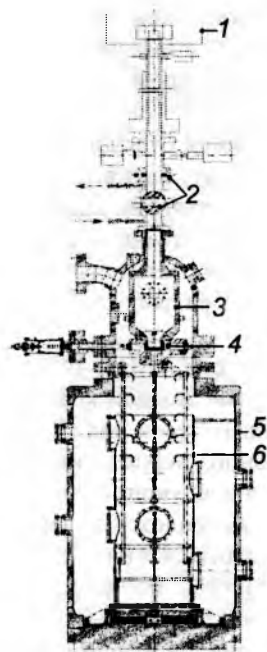


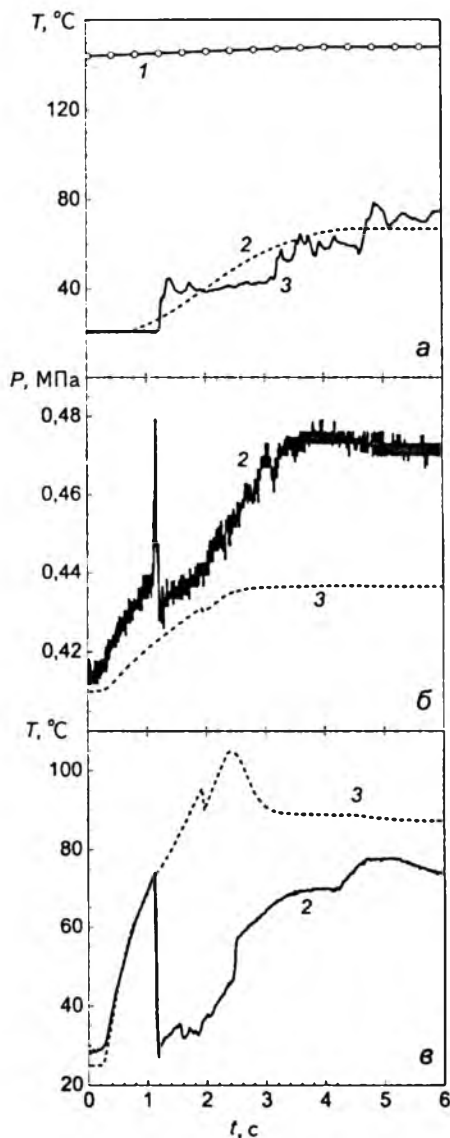
Рис. 1. Экспериментальная установка FARO: 1 — печь; 2 — предохранительные клапаны; 3 — выпускной сосуд; 4 — выпускной клапан; 5 — сосуд FAT; 6 — внутренний сосуд

дителем. На 1,01 с эксперимента передний фронт струи расплава коснулся дна сосуда, на 1,124 с был активирован триггер. Триггер вызвал паровой взрыв, максимальное давление на стенке внутреннего сосуда достигло 10,5 МПа, скорость распространения взрывной волны составила 370 м/с. Истечение расплава из выпускного сосуда продолжалось до 2,4 с, на 2,84 с весь расплав погрузился в воду.

Анализ эксперимента. Перемешивание струи расплава с водой и последующее его охлаждение моделировали кодом VAPEX-P. Ключевым процессом стадии предварительного перемешивания является фрагментация струи, поскольку количество и размер образовавшихся при фрагментации капель расплава определяет интенсивность последующего взрывного взаимодействия. Размер фрагментированных капель расплава вычисляли на основе результатов анализа устойчивости системы струя расплава — паровая пленка — вода [8]. Для условий эксперимента L-33 средний размер капель составил 3 мм. Скорость фрагментации струи расплава определяли исходя из корреляции Саито для длины распада струи [9].

На рис. 2 приведены расчетные зависимости давления, температуры воды и газовой смеси в сопоставлении с экспериментальными данными. Как видно, результаты расчета хорошо согласуются с экспериментом, что подтверждает адекватность моделей фрагментации и пленочного кипения, используемых в коде VAPEX-P. В расчете, как и в эксперименте, температура воды не достигла температуры насыщения. Из рис. 2 видно, что расчетная кривая давления расположена ниже экспериментальной зависимости. Рассогласование вызвано, главным образом, тем, что в расчете кодом VAPEX-P не моделировали генерацию водорода. Тем не менее, как и в эксперименте, скорость роста давления как до вхождения расплава в воду, так и после погружения постоянна. Таким образом, результаты расчета указывают на то, что рост давления обусловлен исключительно нагревом газовой смеси и генерацией водорода, но не парообразованием. Температура газовой смеси хорошо согласуется с экспериментальной зависимостью на начальном этапе эксперимента до 1,1 с (время инициирования взрывного взаимодействия). «Провал» на экспериментальных зависимостях температуры газа и давления примерно на 1,1 с связан с тем, что при взрыве уровень воды поднялся до верхней крышки экспериментального сосуда, горячий газ в верхней области сосуда охладился при контакте с относительно холодной водой, вследствие чего произошло также и понижение давления.

Моделирование кодом VAPEX-P приводит к значительно меньшему объемному парогазовому содержанию в воде на момент взрыва по сравнению с экспериментальным значением,



Р и с. 2. Температура воды на высоте 520 мм от дна экспериментального сосуда (а), давление в экспериментальном сосуда FAT (б), температура в газовом объеме сосуда (в): 1 — температура насыщения; 2 — эксперимент; 3 — расчет

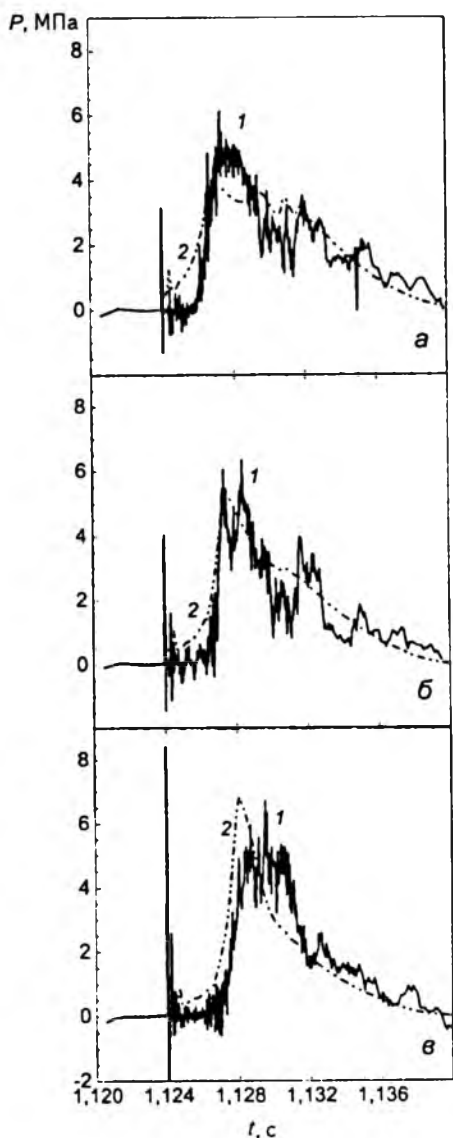


Рис. 3. Давление на высоте 0,49 м (а), 0,715 м (б), 0,94 м от дна сосуда (в): 1 — эксперимент; 2 — расчет

ного изучению взаимодействия расплава активной зоны с водой. Расчет перемешивания струи расплава с водой и последующего охлаждения удовлетворительно предсказал такие экспериментальные параметры, как температура воды и газа в сосуде. Хорошее согласие результатов расчета стадии взрывного взаимодействия с опытными данными свидетельствует о правильном предсказании объемной доли капель расплава, образовавшихся в результате фрагментации струи, поскольку именно эта величина в значительной степени определяет интенсивность взрыва. В то же время такие расчетные параметры, как давление и объемное содержание газовой фазы в воде, занижены по отношению к экспериментальным вследствие отсутствия в коде VAPEX модели генерации водорода.

Результаты расчета стадии формирования и распространения волны термической детонации согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает справедливость концепции микровзаимодействий, принятой в математической модели кода.

которое оценивалось исходя из повышения уровня смеси в сосуде и составило 5% объема воды. При этом экспериментальный недогрев воды на момент взрыва равен почти 100 К, что исключает кипение. Повышение уровня может быть объяснено лишь наличием значительного (примерно несколько процентов) объема водорода в воде к моменту инициирования парового взрыва. К сожалению, в эксперименте определяли лишь суммарную массу водорода, образовавшегося на протяжении всего опыта, которая составила 29,8 г. Генерация водорода, как отмечалось, в коде VAPEX-P не моделируется. Следует, однако, отметить, что экспериментальный расплав не содержал чистого циркония и образование водорода, наблюдавшееся в эксперименте, по-видимому, было обусловлено такими процессами, как окисление диоксида урана и диссоциация воды, для которых на сегодняшний день не разработано адекватных моделей.

Взрывное взаимодействие расплава с водой, инициированное на 1,1 с, моделировалось кодом VAPEX-D. Объемная доля жидких капель расплава диаметром 3 мм составляла на момент взрыва 0,024% согласно расчету кодом VAPEX-P, что соответствует 1,2 кг расплава. В качестве начального значения объемной доли газовой фазы было выбрано экспериментальное 5%. На рис. 3 приведены расчетные зависимости давления на различных высотных отметках в сопоставлении с опытными данными. Результаты расчета согласуются с экспериментом. Расчетная скорость волны термической детонации составила 360 м/с, что близко к экспериментальному значению 370 м/с.

Заключение. С помощью кода VAPEX выполнен анализ эксперимента L-33, посвященного

Анализ показал, что код VAPEX способен адекватно предсказывать важнейшие характеристики процесса взаимодействия расплава с теплоносителем в ходе развития тяжелой аварии на АЭС в соответствии с внекорпусным сценарием развития тяжелой аварии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов Е.В. Физические аспекты явления парового взрыва: Препринт ИАЭ-5450/3, 1991.
2. Berthoud G. Vapor Explosions. — In: Ann. Rev. Fluid Mech., 2000, 32, p. 573—611.
3. Davydov M.V., Melikhov V.I., Melikhov O.I. Numerical analysis of multiphase premixing of steam explosions. — In: Third Intern. Conf. on Multiphase Flow, ICMF 98, Lyon, France, June 8—12, 1998, p. 1—8.
4. Davydov M.V., Melikhov V.I., Melikhov O.I. e.a. Validation VAPEX code on MAGICO and QUEOS tests. — In: Intern. Conf. Nuclear Energy in Central Europe 2000, Bled, Slovenia, 11—14 September, 2000.
5. Chen X., Yuen W., Theofanous T. On the constitutive description of the microinteractions concept in steam explosions. — In: NURETH-7, Saratoga Springs, NY, September 10—15, 1995, NUREG/CP-0142, v. 1, p. 1586—1606.
6. Melikhov V.I., Melikhov O.I., Sokolin A.V. Propagation of thermal detonation wave with microinteraction. — In: Proc. Intern. Conf. on Multiphase Systems «Dynamics of Multiphase Systems», June 15—17, 2000, Ufa, Bashkortostan, Russia, p. 253—257.
7. Magallon D., Huhtiniemi I. Corium melt quenching tests at low pressure and subcooled water in FARO. — In: Ninth Intern. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, San Francisco, USA, October 3—8, 1999.
8. Мелихов О.И. Определение устойчивости и длины распада струи расплава в воде. — Журн. прикл. механики и техн. физики, 1995, № 1, с. 99—106.
9. Annunziato A., Addabbo C., Hohmann H. e.a. Cometa code calculation of FARO melt quenching tests. — In: Proc. of Intern. Conf. «New Trends in Nuclear System Thermohydraulics», Pisa, Italy, May 30 — June 2, 1994.

Поступила в Редакцию 4.05.01

УДК 621.039.586:536.42

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛООТВОДА ОТ ПОДДОНА ДЛЯ УДЕРЖАНИЯ РАСПЛАВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ В КОРПУСЕ БН-800 В СЛУЧАЕ ТЯЖЕЛОЙ ЗАПРОЕКТНОЙ АВАРИИ

*Власичев Г.Н. (Нижегородский гос. технический ун-т),
Кузавков Н.Г. (ОКБМ им. И.И. Африкантова)*

Необходимыми предпосылками для реализации требований, которые сформулированы для реакторов нового поколения [1], обладают быстрые реакторы. Проект БН-800 за счет введения пассивных средств воздействия на реактивность, системы аварийного расхолаживания через воздушные теплообменники, поддона для расплавленной массы топлива выведен на уровень, соответствующий таким требованиям [2]. Главным решением, обеспечившим качественно новый уровень безопасности, явилось исключение положительного натриевого пустотного эффекта реактивности [3]. В техническом обосновании безопасности БН-800 показано, что при запроектной аварии с потерей энергопитания без срабатывания всех средств воздействия на реактивность не происходит расплавления активной зоны, так как отрицательные обратные связи по реактивности даже в условиях кипения натрия снижают мощность. Тем не менее, несмотря на такие качества БН-800, в проекте предусмотрен специальный поддон внутри корпуса для удержания и охлаждения расплавленных компонентов активной зоны.

Для обоснования работоспособности поддона требуется анализ теплоотвода от лежащего на нем слоя из фрагментов разрушенной активной зоны. Температурное поле и фазовое состояние компонентов внутри слоя фрагментов на поддоне представляют интерес в плане оценок степени повышения температуры поддона за счет теплового