

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ MAGICO И QUEOS ПО ПЕРЕМЕШИВАНИЮ ОБЛАКА ЧАСТИЦ С ВОДОЙ (ПАРОВЫЕ ВЗРЫВЫ ПРИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ) С ПОМОЩЬЮ КОДА VAPEX

М.В. Давыдов, В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, Ю.В. Парфенов

Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций, г.Электрогорск



Цель работы состояла в расчетном анализе с помощью теплогидравлического кода VAPEX, разработанного в ЭНИЦ ВНИИАЭС, экспериментов MAGICO и QUEOS, посвященных изучению процесса предварительного перемешивания расплава с водой. В экспериментах MAGICO и QUEOS поведение облака капель расплава моделировалось с помощью облака металлических шариков, перемешивавшихся под действием силы тяжести с водой. Были рассмотрены эксперименты как с холодными, так и с горячими частицами. Проводилось сопоставление как интегральных параметров, таких как скорость перемещения передней кромки облака, динамика уровня смеси, скорость парообразования, так и локальных значений величины паросодержания. В целом результаты моделирования кодом VAPEX-P разумно согласуются с опытными данными.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование проблемы парового взрыва является важной составной частью общего анализа развития тяжелой аварии на ядерной энергетической установке, т.к. паровой взрыв представляет собой серьезную потенциальную угрозу целостности оборудования и сооружений АЭС. Реалистичная оценка безопасности АЭС в случае парового взрыва может быть сделана на основе глубокого качественного понимания и надежной количественной оценки явлений, сопровождающих паровой взрыв. В частности, для того, чтобы определить, какая часть расплава и воды принимает эффективное участие в процессах инициирования и распространения парового взрыва, необходимо экспериментально и теоретически изучить начальную стадию парового взрыва - стадию предварительного перемешивания расплава с водой (премиксинг). Однако экспериментальные исследования премиксинга, в основном, характеризуются существенно меньшим пространственным масштабом, нежели характерные размеры ядерной энергетической установки; при этом теории, позволяющей экстраполировать результаты маломасштабных экспериментов непосредственно на ядерную энергетическую установку, не существует. Корректное моделирование начальной стадии крупномасштабного парового взрыва в случае гипотетической тяжелой аварии на АЭС может быть проведено только расчетным путем с помощью кода, верифицированного на результатах экспериментальных исследований. Подобный расчетный код требует использования нестационарных

© М.В. Давыдов, В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, Ю.В. Парфенов, 2001

многомерных и многожидкостных моделей не менее чем с тремя полями для описания фаз расплава, воды и пара. При этом код должен содержать корректные замыкающие соотношения для всех потенциально важных процессов, сопровождающих премиксинг, и быть верифицирован на максимально возможном числе доступных экспериментальных работ.

На протяжении ряда лет в ЭНИЦ ВНИИАЭС разрабатывается программный комплекс VAPEX (VAPor Explosion), предназначенный для моделирования всех стадий крупномасштабного парового взрыва в ходе развития тяжелой аварии на АЭС. Исходя из существенно различного характера протекания стадии предварительного перемешивания и взрывной стадии парового взрыва программный комплекс состоит из двух независимых программ: программы VAPEX-P (VAPor Explosion – Premixing) [1], предназначенной для моделирования стадии предварительного перемешивания, и VAPEX-D (VAPor Explosion – Detonation) [2], предназначенной для моделирования взрывной стадии.

Следует отметить, что при экспериментальном изучении процесса премиксинга крайне важно минимизировать экспериментальную неопределенность результатов ввиду многообразия процессов, которые могут существенным образом повлиять на ход процесса в целом. Так для важнейшего процесса премиксинга – фрагментации струи – до сегодняшнего дня не разработано общепризнанной модели. В то же время коллективное поведение облака частиц расплава, образовавшихся в результате фрагментации струи, также представляет сложность для моделирования. Поэтому в начале девяностых годов в ведущих международных центрах по безопасности АЭС были проведены серии экспериментов, в частности MAGICO [3] и QUEOS [4], в которых исследовалось перемешивание облака частиц с водой в широком диапазоне экспериментальных условий. В данной работе приводится анализ некоторых результатов, полученных в рамках экспериментальных программ MAGICO и QUEOS, выполненный с помощью кода VAPEX-P.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КОДА VAPEX-P

Код VAPEX-P основан на трехжидкостной модели, описывающей динамику трех фаз – пара, воды и расплава – в нестационарном осесимметричном приближении. Законы сохранения массы, импульса и энергии формулируются отдельно для каждой фазы, что позволяет моделировать термодинамически и механически неравновесные системы. Процессы конденсации, испарения, межфазного трения и теплопередачи описываются источниковыми членами в уравнениях баланса.

Для описания динамики расплава в коде VAPEX-P можно использовать как лагранжев подход, так и подход Эйлера. При этом для описания динамики струи расплава, капель расплава, образовавшихся в результате фрагментации струи, и слоя расплава на дне сосуда используются различные модели. Для расчетного анализа экспериментов MAGICO и QUEOS, в которых исследовалось поведение облака частиц, содержавшего тысячи металлических шариков, было достаточно использовать лишь модель капель расплава. Описание индивидуального поведения каждой экспериментальной частицы в экспериментах MAGICO и QUEOS было крайне затруднительно ввиду значительного машинного времени, которое бы потребовал подобный расчет. Облако частиц при лагранжевом подходе моделировалось с помощью набора так называемых макрочастиц, каждая из которых могла содержать несколько экспериментальных частиц.

На сегодняшний день экспериментально установлено, что на стадии предварительного перемешивания под уровнем воды может формироваться достаточно плотная смесь капель расплава с водой. В подобном случае большой интерес представляет взаимодействие капель расплава друг с другом, т.к. данное взаимодействие определяет дополнительный обмен импульсом в системе. Для описания подобного взаимодействия в случае лагранжева подхода к описанию частиц в расчетный код VAPEX-P была введена

модель соударений.

Подход Лагранжа к описанию частиц имеет ряд преимуществ по отношению к эйлерову подходу, так, например, лагранжев подход позволяет решить проблему численной диффузии при расчетном моделировании облака частиц и вследствие этого более точно описать динамику продвижения фронта облака частиц и его форму. В то же время для описания динамики облака частиц с плотной упаковкой (в пределе сплошной струи расплава) в рамках лагранжева подхода достаточно трудно построить и реализовать модели взаимодействия между частицами для моделирования таких явлений как, скажем, столкновение струи расплава с дном сосуда и дальнейшее ее растекание. Поэтому в расчетном коде, подобном VAPEX-P, желательно предусмотреть возможность использования эйлерова подхода к описанию фазы расплава. В данной работе эйлеров подход к описанию частиц использовался для моделирования экспериментов QUEOS, в которых плотность облака частиц была выше, нежели в экспериментах MAGICO.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ MAGICO

Моделирование экспериментов MAGICO проводилось с использованием лагранжева подхода к описанию частиц. В экспериментах MAGICO падающее облако металлических шариков перемешивалось с водой в прямоугольном сосуде высотой 200 см с поперечным сечением в виде квадрата со стороной 60 см. Специальное выпускное устройство позволяло создавать однородное облако частиц. Начальные условия экспериментов с холодными частицами (холодных пусков) представлены в табл.1.

Эксперименты моделировались в рамках осесимметричного подхода. Диаметр расчетной области определялся исходя из условия сохранения площади поперечного сечения. Динамика пара в верхней части сосуда ввиду особенностей постановки эксперимента не влияла на процесс перемешивания, поэтому в расчетах моделировалась лишь нижняя часть экспериментального сосуда (высота расчетной области 99 см). Использовалась сетка 12x34 (размер ячейки 3 см), временной шаг равнялся $5 \cdot 10^{-4}$ с. Число макрочастиц изменялось от 1500 до 2000.

Типичные результаты численного моделирования представлены на рис.1, 2. Поля скорости, объемного содержания воды (рис.1), облака частиц (рис.2) представлены через каждые 0,05 с. В расчете, как и в эксперименте, падающее облако частиц вытесняет воду из зоны смешения с образованием “воронки” за облаком частиц, в то время как на переднем фронте облака плотность упаковки частиц возрастает. По мере падения облака протяженность “воронки” за облаком частиц увеличивается и через некоторое время “воронка” схлопывается. Расчеты без учета соударения между частицами привели к нереалистично большому объемному содержанию частиц (~1), в то время как теоретический предел этой величины не превышает 0,7. Учет столкновений между частицами привел к уменьшению объемного содержания частиц вплоть до 0,4.

Важным интегральным параметром, характеризующим процесс премиксинга в целом, является скорость продвижения фронта частиц. На рис.3 представлены результаты

Таблица 1

Начальные условия холодных пусков MAGICO

| Эксперимент | Материал | Диаметр, мм | Общая масса, кг | Скорость вхождения в воду, м/с | Начальное объемное содержание частиц | Соотношение длина/ диаметр облака, см | Глубина бассейна, см |
|-------------|--------------------------------|-------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| MA.AX | Al ₂ O ₃ | 1,5-2,5 | 5,4 | 5,0 | 0,094 | 43/22 | 60 |
| MZ.AX | ZrO ₂ | 2,4-3,4 | 8,6 | 5,0 | 0,109 | 37/22 | 60 |
| MZD.AX | ZrO ₂ | 2,4-3,4 | 8,6 | 4,0 | 0,109 | 37/22 | 120 |
| MF.AX | Steel | 2,4 | 12,2 | 5,0 | 0,133 | 37/20 | 60 |

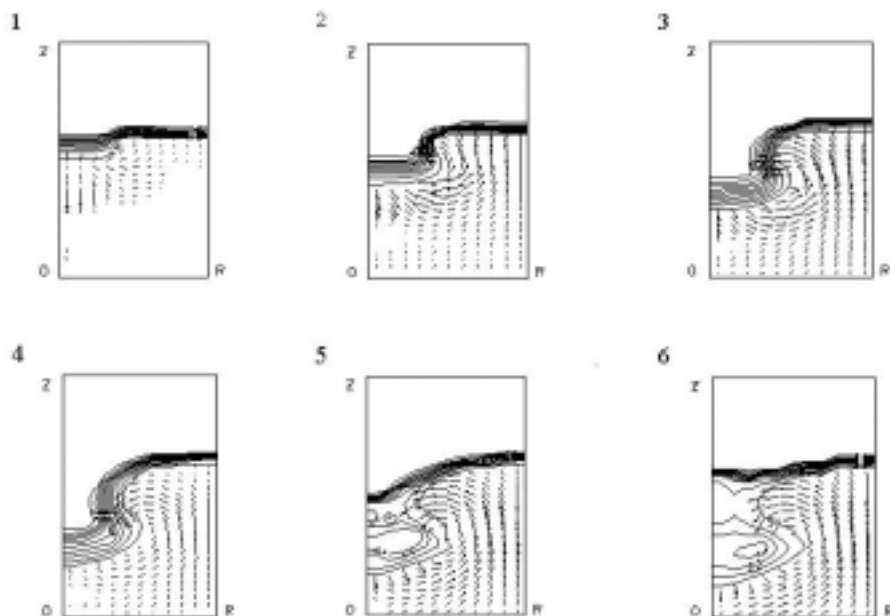


Рис. 1. Рассчитанные поля скорости воды и объемного содержания воды через каждые 0,05 с (эксперимент MAGICO - MZ.AX): 1-0,05 с, 2-0,1 с, 3-0,15 с, 4-0,2 с, 5-0,25 с, 6-0,3 с

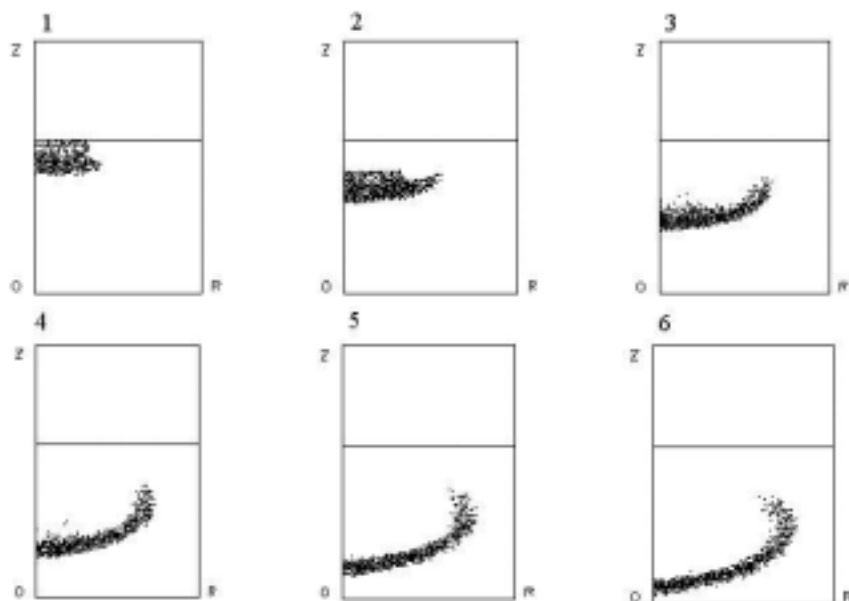


Рис. 2. Облако частиц через каждые 0,05 с (расчет эксперимента MAGICO - MZ.AX): 1- 0,05 с, 2 - 0,1 с, 3 - 0,15 с, 4-0,2 с, 5-0,25 с, 6-0,3 с

моделирования кодом VAPEX-P с учетом и без учета соударений в сопоставлении с результатами эксперимента и результатами расчета американским кодом PM-ALPHA [3]. Видно, что учет соударений несколько улучшает воспроизведение экспериментальных данных. Рассогласование между экспериментальными результатами холодных пусков и расчетными результатами связано, главным образом, с неустойчивостью фронта час-

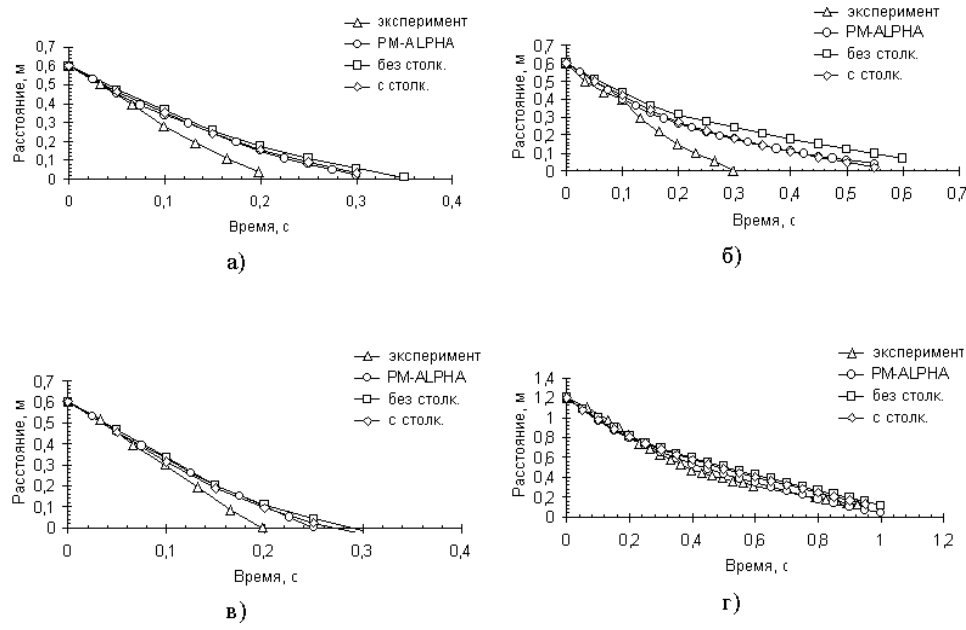


Рис. 3. Положение переднего фронта частиц: а – MZ.AX, б - MA.AX, в-MF.AX, d – MZD.AX

тиц, наблюдавшейся в данных экспериментах и не моделировавшейся в расчете.

В табл.2 приведены начальные условия экспериментов MAGICO с горячими частицами (горячие пуски). Уровень воды в горячих пусках был выше, чем в случае холодных, и равнялся 80 см, поэтому аксиальная длина расчетной области была увеличена до 120 см, размер ячеек равнялся 3х3 см. Временной шаг варьировался в диапазоне 10^{-5} – $5 \cdot 10^{-4}$ с.

Поведение облака частиц при вхождении в воду в экспериментах с горячими частицами было сходным с поведением облака в экспериментах с холодными частицами. Результаты моделирования процесса продвижения фронта частиц в горячих пусках приведены на рис.4. Как видно из рисунка, результаты моделирования кодом VAPEX-P хорошо согласуются с экспериментом.

В горячих пусках MAGICO также измерялась величина среднего паросодержания в сосуде. Измерение производилось вдоль хорды, проходившей через небольшую область экспериментального сосуда, расположенную на 15 см ниже начального уровня воды. Результаты моделирования в сопоставлении с экспериментальными данными приводятся на рис.5. Как видно, код VAPEX-P дает слегка заниженную оценку величины паросодержания, что связано, по-видимому, с ограничениями модели парообразования.

В целом результаты моделирования кодом VAPEX-P хорошо согласуются с экспериментальными результатами как для горячих, так и для холодных пусков.

Таблица 2

Начальные условия горячих пусков MAGICO

| Эксперимент | Материал/размер частиц, мм | Общая масса, кг | Эквивалентный диаметр облака, см | Время вхождения в воду, с | Скорость частиц, м/с | Объемное содержание, % | Температура частиц, °С | Недогрев воды/глубина, °С/см |
|-------------|----------------------------|-----------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|
| Z1500/0-2 | ZrO ₂ /2.4 | 6,2 | 22,5 | 0,33 | 4,8 | 1,71 | 1300-1450 | 0/80 |
| S1200/0-6 | SiCo ₂ /1.0-4 | 2,85 | 22,5 | 0,33 | 4,8 | 1,46 | 1150-1200 | 0/80 |

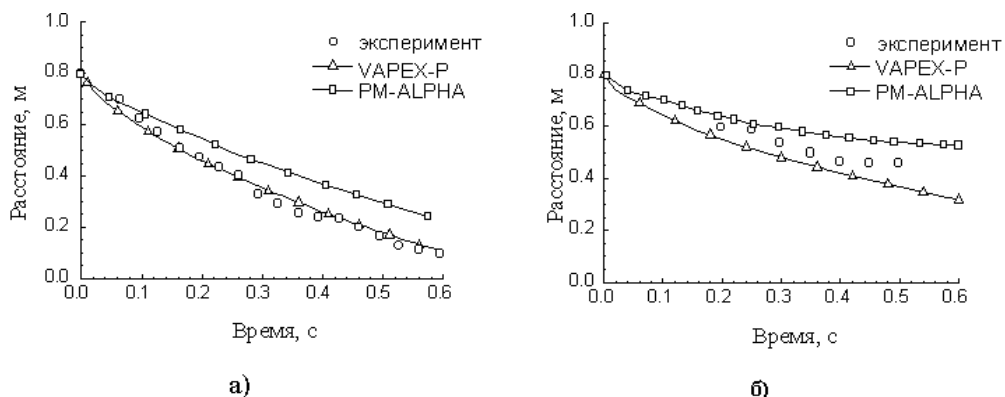


Рис. 4. Положение переднего фронта частиц: а – Z1500/0-2, б – S1200/0-6

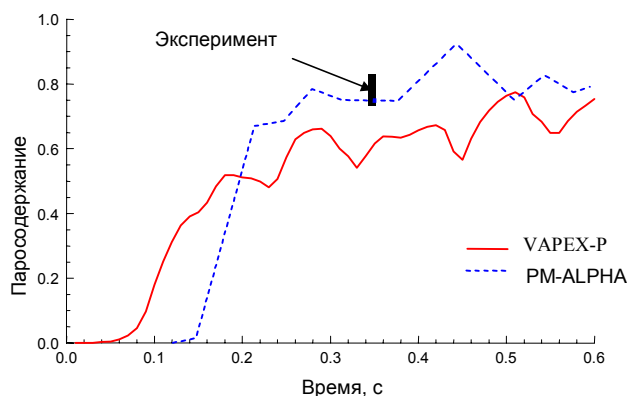


Рис. 5. Сопоставление рассчитанного и измеренного объемного паросодержания в эксперименте Z1500/0-2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ QUEOS

В экспериментах QUEOS, как и в MAGICO, исследовался процесс падения облака металлических шариков в воде; при этом характерная величина суммарной массы частиц в QUEOS совпадала с характерной величиной в экспериментах MAGICO. Основная разница состояла в более высокой плотности облака частиц (облако частиц было компактнее) и отчасти в более высоких температурах горячих пусков. Другое отличие состояло в том, что если в экспериментах MAGICO исследовалась, главным образом, внутренняя структура облака частиц, то в QUEOS особое внимание обращалось на скорость парообразования. Величина среднего паросодержания в горячих пусках QUEOS непосредственно не измерялась, и ее значение можно было оценить лишь исходя из поднятия уровня смеси в сосуде. В табл.3 приведены начальные условия двух горячих пусков Q10 и Q11, которые были выбраны для моделирования как типичные эксперименты со сред-

Таблица 3

Начальные условия экспериментов QUEOS

| Эксперимент | Материал | Диаметр, мм | Масса, кг | Объем, см ³ | Число частиц | Температура, К |
|-------------|------------------|-------------|-----------|------------------------|--------------|----------------|
| Q6 | ZrO ₂ | 10 | 7 | 1900 | 2340 | 300 |
| Q10 | ZrO ₂ | 10 | 6.3 | 1740 | 2100 | 1800 |
| Q11 | Mo | 4,2 | 5,7 | 1025 | 13700 | 1800 |

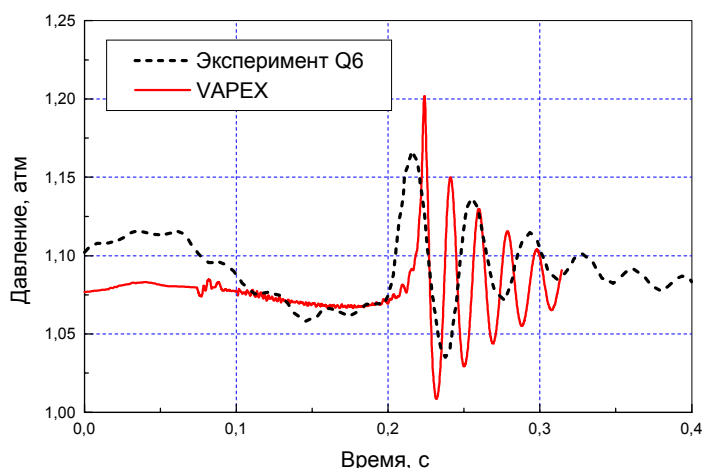


Рис. 6. Давление на дне сосуда (QUEOS – эксперимент Q6)

ней или малой скоростью парообразования и холодного пуска Q6. В расчете (в соответствии с экспериментом) моделировалось однородное облако со средним объемным содержанием частиц 17%. Экспериментальный сосуд QUEOS моделировался как цилиндр с постоянной площадью сечения (80 см в диаметре). Расчетная область разбивалась на ячейки со стороной 2,5 см, временной шаг равнялся $2 \cdot 10^{-5}$ с.

Первоначально моделирование экспериментов QUEOS осуществлялось в рамках лагранжева подхода к описанию частиц. Результаты расчетного моделирования динамики облака частиц разумно согласовывались с экспериментальными результатами, как и в случае экспериментов MAGICO. Из наиболее интересных результатов можно отметить расчетную зависимость давления на дне экспериментального сосуда, приведенную на рис.6, в сопоставлении с экспериментальной зависимостью для холодного пуска Q6. Начальный рост давления (за начальный момент времени принято время соприкосновения переднего фронта облака частиц с поверхностью воды) соответствует соударению облака частиц с поверхностью воды, а начало осцилляций давления соответствует моменту схлопывания воронки за облаком частиц. Некоторое различие в частоте осцилляций давления вызвано тем, что в расчете неконденсирующийся газ моделировался насыщенным паром.

Горячие пуски QUEOS моделировались с использованием эйлера подхода к описанию частиц. На рис.7 приводятся расчетные и экспериментальные зависимости расхода пара через сбросную трубу и суммарного объема пара, образовавшегося в результате парообразования. Эти величины можно рассматривать как интегральные параметры, характеризующие взаимодействие горячих частиц с водой в экспериментах QUEOS. В целом, результаты моделирования согласуются с экспериментальными результатами. Наличие осцилляций на расчетных кривых давления связано, главным образом, с тем фактом, что парообразование в расчете шло путем образования, отрыва и всплытия более крупных пузырей пара, нежели в эксперименте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведена верификация кода VAPEX-P (ЭНИЦ ВНИИАЭС), предназначенного для моделирования перемешивания высокотемпературного расплава с охладителем, на результатах экспериментов MAGICO и QUEOS, посвященных взаимодействию облака частиц с водой. Были рассмотрены эксперименты как с холодными, так и с горячими частицами. Проводилось сопоставление как интегральных параметров, таких как скорость перемещения передней кромки облака, динамика уровня смеси, скорость парооб-

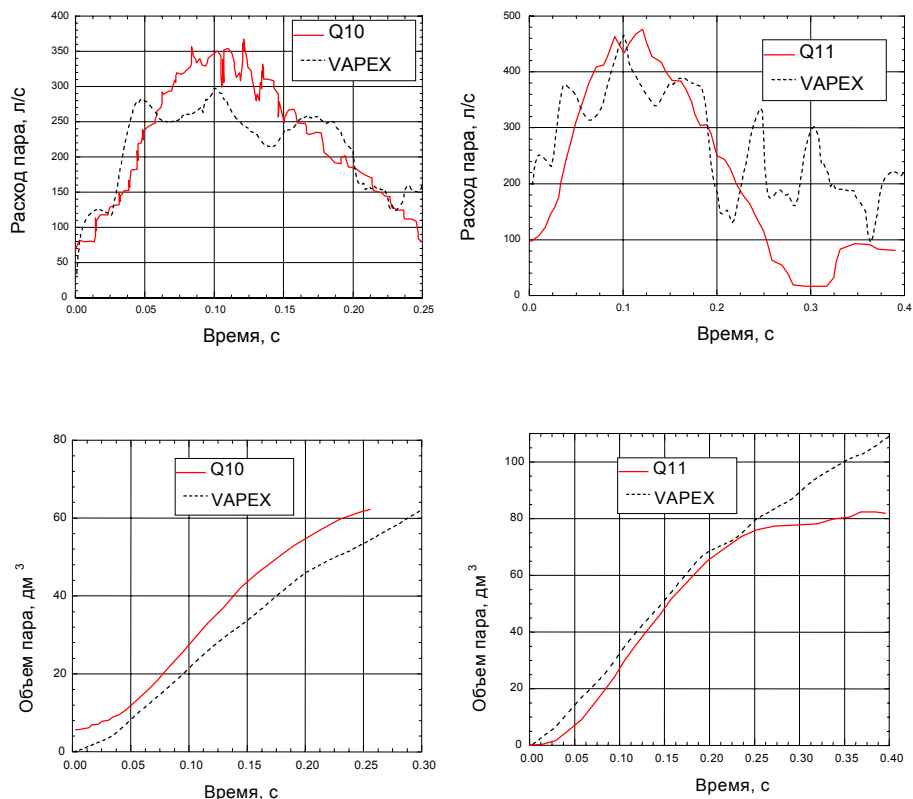


Рис. 7. Сопоставление результатов VAPEX с экспериментальными результатами горячих пусков QUEOS

разования, так и локальных значений величины паросодержания. В целом результаты моделирования кодом VAPEX-P разумно согласуются с опытными данными.

Литература

1. Davydov M.V., Melikhov V.I., Melikhov O.I. Numerical Analysis of Multiphase Premixing of Steam Explosions // Third Int. Conference on Multiphase Flow. - ICMF 98. - Lyon. - France. - June 8-12. - 1998. - P.1-8.
2. Melikhov V.I., Melikhov O.I., Sokolin A.V. Propagation of Thermal Detonation Wave with Microinteraction // Proc. Intern. Conf. on Multiphase Systems "Dynamics of Multiphase Systems" - Ufa. - Bashkortostan. - RUSSIA. - June 15-17. - 2000. - P.253-257.
3. Angelini S., Theofanous T.G., Yuen W.W. Premixing-related behavior of steam explosions // Proc. 7th Int. Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics. - NURETH-7. - Saratoga Springs. - NY. - Sept. 10-15 - V.3 - 1995. - 1754-1778.
4. Meyer L. QUEOS, an Experimental Investigation of the Premixing Phase with Hot Spheres // Proc. of the OECD/CSNI specialists meeting on fuel-coolant interactions. - Tokai-Mura. - Japan. - May 19-21. - 1997. - P.155-165.

Поступила в редакцию 07.06.2001

metastable, 6 summed independent metastable plus ground, and 104 cumulative yields of radionuclide products. The experimental data were compared with theoretical yields predicted via 7 simulation codes: CEM95, CEM2k, LAHET, CASCADE, HETC, INUCL, YIELDX. Results are analyzed from a point of formation of secondary products that may be of large ecological and technological hazard.

УДК 621.039.51

Ballslayer as a core for the fast reactor \G.B. Usynin, S.G. Usynina; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 6 pages, 6 illustrations, 2 tables. - References - 5 titles.

The analysis of pebbly bed conception for the fast reactor is carried out. Balls medley from plutonium oxide and depleted uranium carbide are considered. The neutronic and hydraulic characteristics of such core is given. The opportunities deep burnout of heavy nuclei are discussed in the paper.

УДК 502.3

Geoinformation System of Radioactive Contaminated Territories \B.I.Yatsalo I.A.Pichugina, G.V.Kozmin, O.A.Mirzeabassov, I.V.Okhrimenko, M.F.Kanevsky, E.A.Savelieva; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 5 pages, 2 illustrations, 1 table. - References - 8 titles.

Description of Geographic Information System as a part of the Decision Support System PRANA for rehabilitation of radioactive contaminated territory of Bryansk region is presented. Developed vector electronic maps and databases of attributive information are pointed out.

УДК 621.039.75

Immobilization of Radioactive Waste in Ceramet Materials by the Method of Self-propagating High Temperature Synthesis \E.N. Ilyin, I.Yu. Pashkeev, A.V. Senin; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 9 pages, 3 illustrations, 2 tables. - References - 7 titles.

For the immobilization of solid high-level waste (HLW) to use self-propagating high temperature synthesis (SPHTS) is proposed, which allowing to raise the temperature of the reaction mixture from 1500 to 4000°C due to the heat-evolution of the chemical reactions. As a initial reaction mixture thermite mixture Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , Al , SiO_2 , CaO , Na_2O and CeO_2 , which imitating composition of HLW is being considered. As a result of SPHTS, ceramet block is formed. Ceramet block consist of corrosion-proof iron-chromium metal matrix and ceramic matrix based on aluminates, silicates and alumosilicates. The estimation of chemical resistance of material-immobilizators, obtained by means of leaching in water has revealed their preference for the conventional borosilicate glass.

УДК 532.529

Analysis of the MAGICO and QUEOS experiments on the premixing of the clouds of particles with water with the VAPEX code \M.V.Davydov, V.I.Melikhov, O.I.Melikhov, I.V.Parfenov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 8 pages, 3 tables, 7 illustrations. - References, 4 titles.

The objective of the investigation was to simulate the MAGICO and QUEOS experiments devoted to the study of the melt-water premixing with the thermohydraulic code VAPEX developed at the EREC VNIIAES. The behavior of the melt drops cloud was simulated in the MAGICO and QUEOS experiments by the cloud of the metal spheres, mixing with the water under gravitational force. Both, the experiments with cold and hot particles were considered. The integral parameters, such as the velocity of the leading edge of the cloud, the mixture level dynamic, the rate of the vaporization and local values of the void fraction were compared with the experimental results. Generally, the calculation results are in a reasonable agreement with the experimental ones.

УДК 621.039.517

Relap5 Modeling of the NPP VVER-1000 Steam Generator \S.A.Rouhanifard, A.A. Kazantsev, V.V. Sergeev; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 11 pages, 13 illustrations, 3 tables. - References - 7 titles.