

УДК 536.24

Анализ экспериментов по термическому взаимодействию кориума с водой в условиях тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР/PWR

В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, Н.А. Ртищев, А.Е. Тарасов

Сведения об авторах

Мелихов Владимир Игорьевич — доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ»

Мелихов Олег Игорьевич — доктор физико-математических наук, зам. директора по научной работе АО «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций», профессор кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ»

Ртищев Никита Александрович — ведущий инженер кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: rtishchevna@mpei.ru

Тарасов Артем Евгеньевич — аспирант кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ»

Основная цель экспериментальной программы FARO — получение данных о механизмах термического взаимодействия большой массы высокотемпературного кориума с водой, моделируя тем самым внутрикорпусную стадию тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР/PWR. Работа посвящена валидации модели термического взаимодействия кода СОКРАТ/VAPEX-M. Приведена система уравнений модели, включая уравнения для динамики струи кориума с соответствующими замыкающими соотношениями для описания энергетического и силового взаимодействия струи кориума с пароводяной средой. Особое внимание уделено моделям фрагментации кориума, включая модель фрагментации исходной струи кориума, и, так называемую, модель вторичной фрагментации образовавшихся фрагментов. Выполнено численное моделирование экспериментов FARO L-14, L-19 по термическому взаимодействию кориума с водой с помощью кода СОКРАТ/VAPEX-M. Особенность экспериментов заключалась в том, что они были выполнены при высоком начальном давлении около 5 Мпа, а различие состояло в начальном уровне воды в сосуде. Таким образом, было исследовано влияние начального уровня воды на процесс термического взаимодействия. Полученные с помощью кода СОКРАТ/VAPEX-M расчетные временные зависимости по давлению в сосуде, скорости охлаждения кориума и распределению образующихся фрагментов, дали хорошее согласие с экспериментальными данными. Показано качественное и количественное согласие расчетных и опытных данных, свидетельствующее об адекватности теплофизических и гидродинамических моделей, заложенных в расчетный код СОКРАТ/VAPEX-M.

Ключевые слова: термическое взаимодействие, численное моделирование, валидация.

Analysis of experiments on the corium-to-water thermal interaction during a severe accident at a VVER/PWR-based NPP

V.I. Melikhov, O.I. Melikhov, N.A. Rtishchev, A.E. Tarasov

Information about authors

Melikhov Vladimir I. — Dr.Sci. (Techn.), professor of nuclear power plants dept., MPEI

Melikhov Oleg I. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), deputy director of scientific work of «Electrogorsk research centre for the safety of nuclear power plants», professor of nuclear power plants dept., MPEI

Rtishchev Nikita A. — lead engineer of nuclear power plants dept., MPEI, e-mail: rtishchevna@mpei.ru

Tarasov Artem E. — Ph.D.-student of nuclear power plants dept., MPEI

The basic aim of the FARO experimental program is to obtain data on the mechanisms governing thermal interaction between a large mass of high-temperature corium with water through simulating the in-vessel stage of a severe accident at an NPP equipped with VVER/PWR-type reactors. The study is devoted to validating the thermal interaction model used in the SOCRAT/VAPEX-M code. The article presents the system of model equations, including those describing the corium jet dynamics and the corresponding closing relations describing the energy and force interaction between the corium jet and steam--water medium. Special attention is paid to the corium fragmentation models, including the initial corium jet fragmentation model and the so-called model for secondary fragmentation of the produced fragments. The FARO L-14 and L-19 experiments aimed at investigating the corium-to-water thermal interaction were numerically simulated using the SOCRAT/VAPEX-M code. The specific feature of these experiments was that they were carried out at a high initial pressure of around 5 MPa. The experiments differed from each other in the initial water level inside the vessel. Thus, the effect the initial water level has on

the thermal interaction process was investigated. The time dependences for the pressure in the vessel, corium cooling rate, and distribution of the produced fragments calculated using the SOCRAT/VAPEX-M code were found to be in good agreement with the experimental data. Qualitative and quantitative agreement between the experimental data and calculation results has been shown, which confirms the adequacy of the thermophysical and hydrodynamic models laid down in the SOCRAT/VAPEX-M code.

Key words: thermal interaction, numerical simulation, validation.

Введение

Интегральный код СОКРАТ [1] разработан для расчетного анализа тяжелых аварий на реакторных установках с водой под давлением. Существенным для безопасности АЭС в ходе тяжелой аварии является процесс термического взаимодействия расплавленных материалов активной зоны (кориума) с теплоносителем, который может протекать как внутри корпуса, так и в шахте реактора. Для моделирования данного процесса был разработан и имплементирован в код СОКРАТ специальный модуль VAPEX-M [2] и проведена его валидация на экспериментальных данных, полученных на зарубежных установках FARO, QUEOS и MAGICO [3]. Настоящая работа посвящена валидации текущей версии кода СОКРАТ/VAPEX-M на экспериментах FARO, в которых исследовалось влияние начального уровня воды в сосуде на процессы термического взаимодействия.

Краткое описание кода СОКРАТ/VAPEX-M

Расчетный код СОКРАТ/V1

Расчетный код СОКРАТ/V1 предназначен для сквозного моделирования тяжелых аварий реакторов с водяным теплоносителем. Математическая модель кода основана на нестационарном двухскоростном двухтемпературном описании теплогидравлических процессов в реакторной установке, дополненном набором математических моделей, специфических теплофизических процессов, возникающих в ходе тяжелой аварии на АЭС. Заложенные в расчетный код модели позволяют описывать динамику физико-химических, теплогидравлических и термомеханических процессов, происходящих в реакторных установках с водяным теплоносителем типа ВВЭР и PWR при тяжелых запроектных авариях (ЗПА), и могут использоваться для оценки основных параметров РУ, необходимых для расчетного обоснования безопасности, на внутрикорпусной стадии тяжелых ЗПА, включая аварии с плавлением топлива.

Расчетный код СОКРАТ/V1 состоит из нескольких основных функциональных модулей:

- РАТЕГ — моделирование теплогидравлических процессов в РУ ВВЭР с учетом течения теплоносителя с примесями газов в двухжидкостном термогидравлическом приближении, переноса тепла в элементах конструкции в двумерном/одномерном приближениях и др.;

- СВЕЧА — моделирование процессов разрушения активной зоны при ЗПА с учетом взаимосвязи физико-

химических процессов в активной зоне, взаимодействия материалов и сред, перемещения стекающих жидких компонентов, термомеханики оболочек, теплопереноса излучением;

- HEFEST — моделирование теплофизических явлений в расплаве активной зоны (кориуме) и внутрикорпусных устройств, происходящих в нижней камере смешения на поздней стадии тяжелой ЗПА, а также разрушения корпуса реактора и выхода материалов из корпуса.

VAPEX-M

Модуль VAPEX-M предназначен для использования в составе расчетного кода СОКРАТ для детального численного моделирования физических процессов и явлений на внутрикорпусной фазе запроектных аварий на АЭС с реакторами ВВЭР. Основной целью использования модуля является расчет динамики движения расплава под действием сил тяжести, фрагментации струи и капель расплава при взаимодействии с окружающей парожидкостной средой, окисления кориума и выделения неконденсируемого газа (водорода), выпадения расплава на поверхность с образованием слоя дегриза. Модуль позволяет рассчитывать физические явления, сопровождающие взаимодействие высокотемпературного расплава кориума с холодным теплоносителем, получать количественные характеристики такого взаимодействия, необходимые для анализа соответствующих опасностей, связанных с интенсивным вскипанием теплоносителя и выделением больших количеств энергии, запасенной в высокотемпературном кориуме.

Уравнения, описывающие эволюцию макрочастиц, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{r}_k}{dt} &= \mathbf{U}_k; \quad \rho_d \frac{d\mathbf{U}_k}{dt} = -\mathbf{F}_{ld} - \mathbf{F}_{vd} - (\rho_d - \rho_a) \mathbf{g}; \\ \rho_d \frac{dh_k}{dt} &= -R_{dl}(T_k - T_l) - R_{dv}(T_k - T_v) + \dot{q}_k + \dot{Q}_k; \\ \rho_a &= (1 - \phi)\rho_l + \phi\rho_v, \end{aligned}$$

где r_k , \mathbf{U}_k , T_k — координата, скорость и температура k -й макрочастицы; ρ_d , ρ_a — плотности расплава и окружающей среды; ϕ — объемное паросодержание; \mathbf{F}_{ld} , \mathbf{F}_{vd} — силы сопротивления со стороны жидкости и паровой фазы соответственно; \mathbf{g} — ускорение силы тяжести; h_d — удельная энтальпия расплава, T_l , T_v — температуры жидкой и паровой фаз; R_{dl} , R_{dv} — коэффициенты теплообмена с жидкостью и паром.

В правой части уравнения притока тепла стоят скорости внутреннего тепловыделения за счет нейтрон-

ных реакций в материале \dot{q}_k и тепловыделение за счет химических реакций окисления материала водяным паром \dot{Q}_k .

Для вычисления характеристик силового и теплового межфазного обмена привлекаются описываемые ниже корреляционные соотношения.

Силовое межфазное взаимодействие

Для описания силового взаимодействия между фазами используются следующие соотношения для определения силы сопротивления:

$$\mathbf{F}_{dj} = c_{dj} |\mathbf{U}_d - \mathbf{U}_j| (\mathbf{U}_j - \mathbf{U}_d);$$

$$c_{ij} = \frac{3}{4} \alpha_i \varphi_{ij} \rho_j \frac{C_{Dij}}{l_i}.$$

Индексы i и j в относятся к дисперсной и непрерывной (несущей) фазам соответственно; C_D — коэффициент трения. Множитель $\varphi_{ij} = \alpha_j / (\alpha_j + \alpha_k)$, позволяет приближенно учитывать эффект влияния фазы k на площадь поверхности i -ой фазы при ее взаимодействии с j -ой фазой.

Для дисперсных частиц коэффициент C_{Dij} рассчитывается по следующей формуле:

$$C_{Ddj} = C_{Ddj}^* \left\{ \frac{1 + 17,67 (f(\alpha_d))^{6/7}}{18,67 f(\alpha_d)} \right\}^2;$$

$$f(\alpha_d) = \sqrt{1 - \alpha_d} \left(1 - \frac{\alpha_d}{0,62} \right)^{1,55};$$

$$C_{Ddj}^* = \frac{24}{\text{Re}_{dj}} + \frac{4}{\sqrt{\text{Re}_{dj}}} + 0,4;$$

$$\text{Re}_{dj} = \frac{dV_{rel} \rho_j}{\mu_j}; \quad V_{rel} = |\mathbf{U}_k - \mathbf{U}_j|.$$

Энергетическое межфазное взаимодействие

При расчете энергетического взаимодействия капля расплава со средой используются замыкающие соотношения, зависящие от величины объемной доли парогазовой смеси.

При $\varphi < 0,7$ предполагается, что капли расплава, окруженные паровой пленкой, находятся в воде. Теплопередача от капли к воде осуществляется излучением в воду и через пленочное кипение (соответствующие коэффициенты лучистого и конвективного теплообмена обозначаются h_r и h_c), скорость теплообмена выражается уравнением:

$$Q_{dl} = n_d (h_r + h_c) \pi l_d^2 \varphi_{dl} (T_d - T_l).$$

Здесь $n_d = \frac{6\alpha_d}{\pi l_d^3}$, l_d — концентрация и диаметр капель;

$h_r = \sigma E_d \frac{T_d^4 - T_l^4}{T_d - T_l}$; σ — постоянная Стефана–Больцмана;

E_d — коэффициент излучения ($E_d = 0,7$); h_c — коэффициент теплоотдачи, рассчитываемый по [4].

Множитель $\varphi_{dl} = \frac{\alpha_l}{\alpha_l + \alpha_g}$ учитывает влияние парогазовой фазы на теплообмен между каплями и водой.

Теплопередача от капель к парогазовой среде в данном режиме не учитывается.

При $\varphi \geq 0,7$ считается, что капли расплава находятся в парогазовой смеси вместе с каплями воды. Теплопередача от расплава к пароводяной смеси осуществляется излучением от капель расплава к каплям воды и конвекцией от капель расплава в парогазовую среду и записана уравнениями:

$$Q_{dl} = \min \{ n_l \pi l_l^2, n_d \pi l_d^2 \} \sigma E_d E_l (T_d^4 - T_l^4);$$

$$Q_{dg} = n_d \varphi_{dg} \pi l_d^2 h'_c (T_d - T_g),$$

где $n_l = \frac{6\alpha_l}{\pi l_l^3}$ — концентрация водяных капель; l_l — диаметр капель воды, $E_l = 0,3$; $\varphi_{dg} = \frac{\alpha_g}{\alpha_g + \alpha_l}$;

$$h'_c = \frac{\lambda_g}{l_d} \{ 2 + 0,6 \text{Re}_g^{1/2} \text{Pr}_g^{1/3} \}, \quad \text{Re}_g = \frac{\rho_g |\vec{V}_g - \vec{V}_d| l_d}{\mu_g};$$

μ_v — динамическая вязкость парогазовой смеси.

Диаметр капелек воды l_l и пузырьков пара l_g получаются из условия устойчивости, основанного на критерии Вебера:

$$\frac{\rho_j^2 |V_l - V_g| l_i}{\sigma} = \text{We}_{cr} \begin{cases} 8, i = g, j = l \\ 12, i = l, j = g \end{cases}$$

где σ — поверхностное натяжение между водой и парогазовой средой.

Модель фрагментации кориума

В настоящей работе используется подход для описания процесса фрагментации струи, основанный на применении так называемой интегральной корреляции Саито [5], которая опирается на обобщение опытных данных по фрагментации струи в объеме вскипающей жидкости. Длина полного распада струи, отнесенная к ее диаметру выражается следующим образом:

$$\frac{L_{brk}}{D_j} = 2,1 \left(\frac{\rho_j}{\rho_l} \right)^{0,5} \text{Fr}_j^{0,5},$$

где L_{brk} — длина полного распада струи; D_j — диаметр струи при входе в охладитель; ρ_j, ρ_l — плотности струи и охладителя; $\text{Fr}_j = V_j^2 / g D_j$ — число Фруда; V_j — скорость струи при входе в воду.

Помимо описания фрагментации струи кориума в модели, показывающей динамику кориума, используется предположение о вторичной фрагментации. Имеется ввиду, что образующиеся в результате фрагментации струи кориума капли также подвергаются

фрагментации. Динамику уменьшения диаметра капли со временем можно представить как:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{d_{smx} - D}{\tau_{brk}}$$

Здесь d_{smx} — максимальный устойчивый диаметр капли, определенный по соотношениям Пилча и Эрдмана; τ_{brk} — характерное время вторичной фрагментации. Данные параметры определяются по эмпирической модели [6].

Из этого уравнения вычисляется новый диаметр капля на каждом временном шаге.

Модель окисления кориума

Отличительной особенностью модели, реализованной в модуле VAPEX-M, является детальный учет процессов окисления расплава и выделения водорода. При поступлении очередной порции расплава в модуль VAPEX-M передается его покомпонентный состав, что дает возможность расчета процессов окисления отдельных компонент. В качестве активных рассматриваются Zr и сталь (причем можно рассматривать сталь как Fe, но есть возможность учета отдельно Cr и Ni).

Окисление активных компонент рассчитывается по модели, в которой скорость реакции лимитируется диффузионным подводом пара к поверхности капли. Скорость химического взаимодействия циркония с водяным паром определяется:

диффузией пара через газовый слой (водород + водяной пар) к поверхности капли;

диффузией кислорода через оксидный слой (если он существует).

Вычисление коэффициентов тепломассообмена, задающих скорость окисления поверхности капли, производится для двух возможных режимов — пленочного кипения или конвективного теплообмена. При этом используются эмпирические формулы для числа Шервуда и аналогия между процессами переноса массы и тепла.

Подробный анализ модели окисления кориума приведен в [7].

Анализ экспериментов FARO кодом СОКРАТ/VAPEX-M

Краткое описание экспериментов

Крупномасштабная установка FARO (рис. 1), расположена в Исследовательском центре Европейского Союза (Испра, Италия) и предназначена для исследования основных явлений, связанных с протеканием тяжелых аварий на АЭС с водяным теплоносителем.

Были рассмотрены два эксперимента FARO (L-14 и L-19) [8, 9], особенностью которых было то, что они выполнялись при высоких начальных давлениях (~5 МПа), но разных начальных уровнях воды. Их основные параметры приведены в таблице.

Цель экспериментов заключалась в исследовании механизмов фрагментации струи кориума при ее взаи-

модействии с водой, а также скорости охлаждения кориума.

Моделирование кодом СОКРАТ/VAPEX-M экспериментов FARO. Сравнение расчетных результатов с опытными данными

Кодом СОКРАТ/VAPEX-M было выполнено численное моделирование экспериментов FARO L-14 и L-19. При этом были воспроизведены все основные теплофизические и гидродинамические процессы, наблюдавшиеся в ходе экспериментов:

- проникновение струи расплава в воду;
- фрагментации струи и образовавшихся капель расплава;
- осаждение расплава на днище сосуда и образование пористого слоя;
- теплообмен горячего кориума с пароводяной средой;

набухание физического уровня в сосуде

На рисунках 2—5 ниже представлены результаты расчетов по коду СОКРАТ/VAPEX-M в сравнении с опытными данными.

На рисунке 2 приведена временная зависимость массы образовавшихся фрагментов для экспериментов FAROL-14, FAROL-19. На рисунке 3 показано значение текущего среднего диаметра образующихся фрагментов. Для сравнения на оси ординат отмечены итоговые экспериментальные значения этих величин. Из зависимостей на рис. 2, 3 можно сделать вывод, что имплементированные в код СОКРАТ/VAPEX-M модели фрагментации струи и капель кориума позволяют адекватно воспроизводить динамику процессов фрагментации кориума. Расхождение с экспериментом при определении получившейся массы фрагментов и диаметров капель не превышает 10%.

Одним из важных параметров, характеризующим процесс термического взаимодействия горячего кориума с водой, является рост давления в сосуде, вызванный ее вскипанием. Также отметим, что эта экспериментальная величина была получена в результате прямых измерений датчиками давления, что придает ей особую ценность для верификации расчетного кода, поскольку многие другие опытные данные были получены путем обработки первичных показаний датчиков (косвенные измерения). На рисунках 4, 5 (FAROL-14 и FAROL-19) изображены полученные расчетные временные зависимости давления в сосуде, а также скорости охлаждения кориума в сравнении с экспериментальными данными. Видно хорошее согласие полученных расчетных давлений с опытными данными для обоих экспериментов, что свидетельствует об адекватности заложенных в код СОКРАТ/VAPEX-M модели теплообмена кориума с пароводяной смесью и модели фрагментации кориума.

Следует отметить, что в расчете эксперимента L-14 наблюдается качественное воспроизведение временной зависимости скорости охлаждения, однако, для скоро-

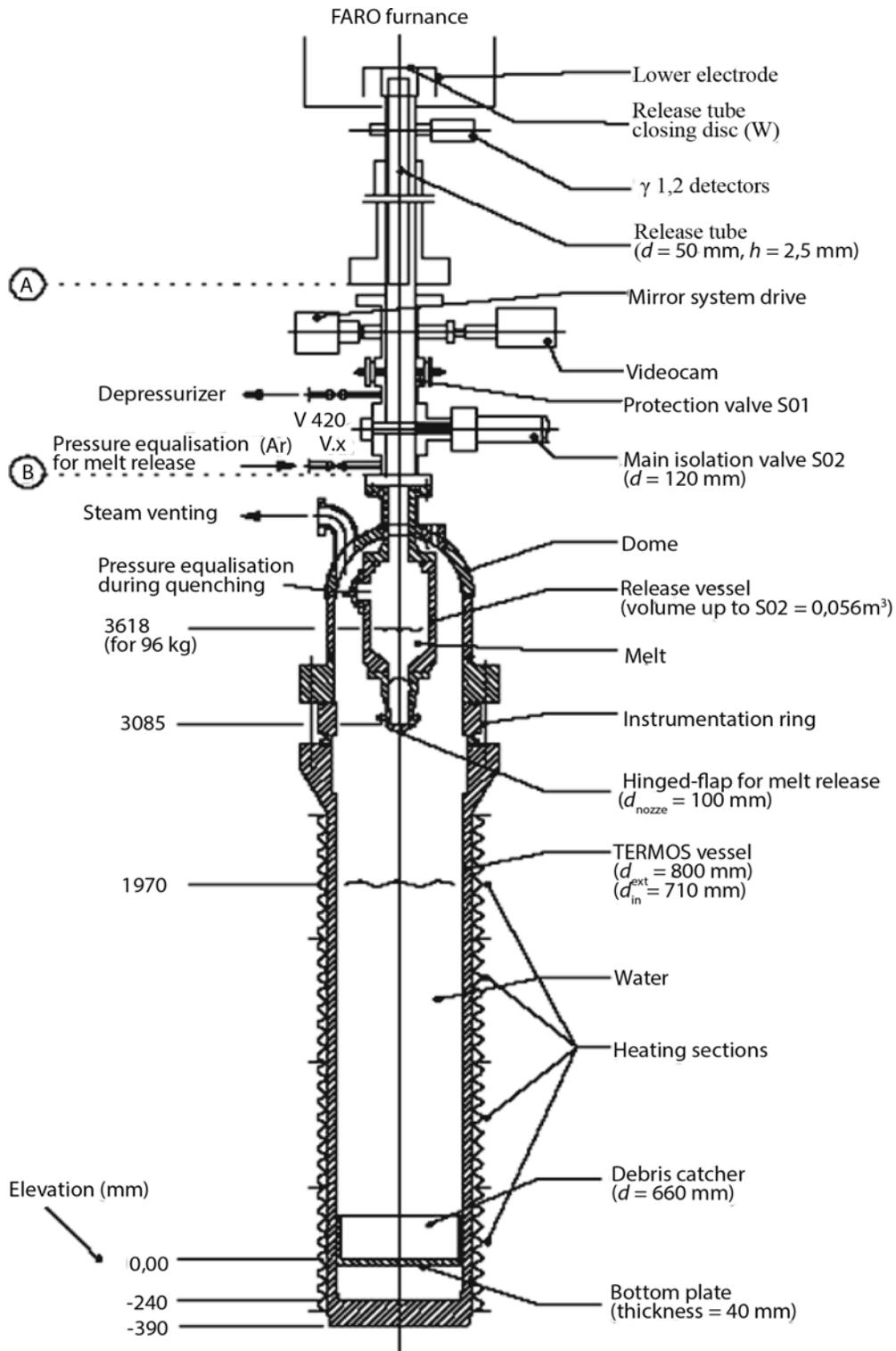


Рис. 1. Рабочий участок экспериментальной установки FARO

сти охлаждения имеет место завышение — в расчете максимальное значение 85 МВт, а в эксперименте — 70 МВт (см. рис. 4). Возможно это связано с тем, что экспериментальное значение данного параметра не измерялось напрямую (в отличие от давления), а явля-

лось результатом обработки показаний около 40 термопар, расположенных в различных областях сосуда.

Таким образом, численное моделирование экспериментов FARO L-14, L-19 по термическому взаимодействию кориума с водой, выполненное с помощью кода

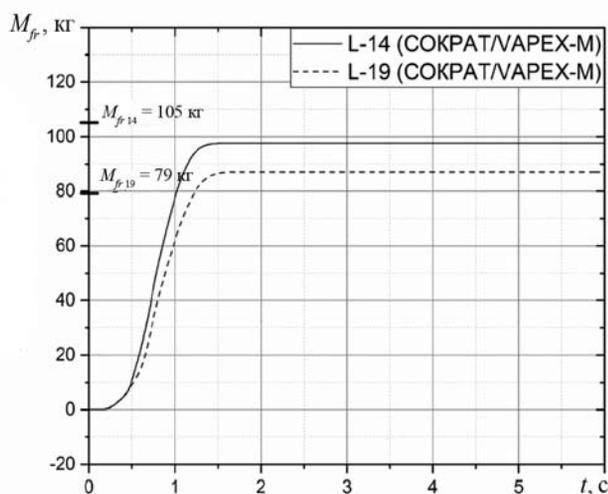


Рис. 2. Временная зависимость массы образовавшихся фрагментов M_{fr} .

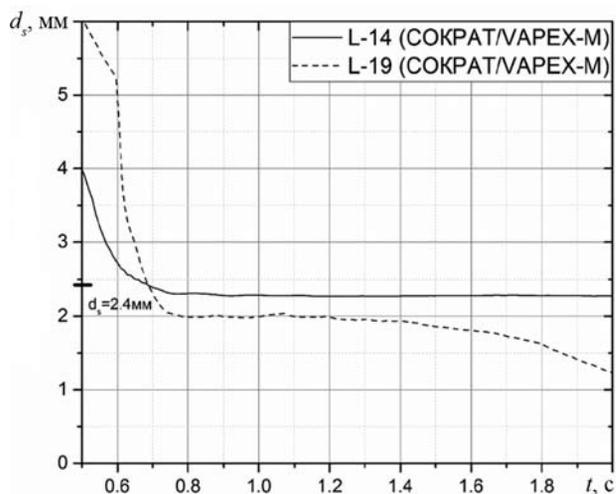


Рис. 3. Временная зависимость среднего диаметра капель кориума d_s .

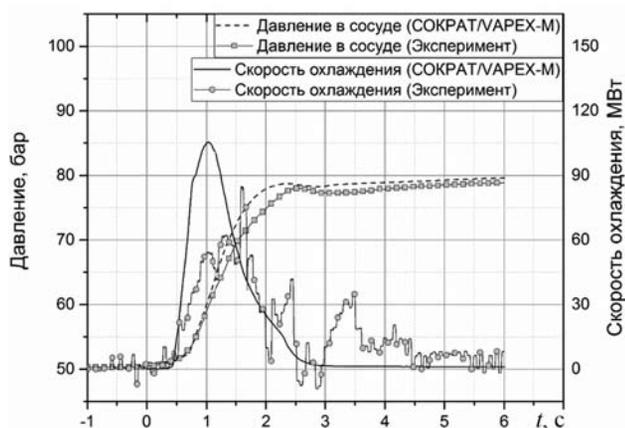


Рис. 4. Временная зависимость давления в сосуде и скорости охлаждения кориума для эксперимента FARO L-14

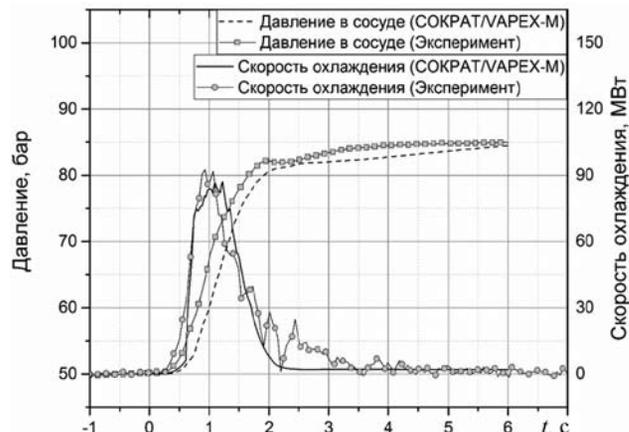


Рис. 5. Временная зависимость давления в сосуде и скорости охлаждения кориума для эксперимента FARO L-19

Основные параметры экспериментов FARO

Параметр	Значение L-14	Значение L-19
Параметры кориума		
Масса, кг	125	157
Состав	80% UO ₂ 20% ZrO ₂	80% UO ₂ 20% ZrO ₂
Температура, °C	2850	2800
Диаметр струи, м	0,092	0,092
Параметры среды		
Масса воды в сосуде, кг	623	338
Уровень воды в сосуде, м	2,05	1,1
Температура воды в сосуде, °C	264	263
Давление, бар	51	51
Объем газа, м ³	1,26	1,635
Расстояние от места подачи кориума до уровня воды, м	1,04	1,99

СОКРАТ/VAPEX-M, показало качественное и количественное согласие расчетных и опытных данных, что свидетельствует об адекватности теплофизических и гидродинамических моделей, заложенных в расчетный код СОКРАТ/VAPEX-M.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (научные проекты № 14-08-00393, № 16-38-00151 мол_а, № 16-08-00239), Министерства образования и науки РФ (Государственное задание № 13.1544.2014/К).

Авторы выражают благодарность Институту энергии и транспорта Объединенного европейского исследовательского центра (Institute for Energy and Transport, JRC © Euratom) за предоставление опытных данных экспериментов FARO L-14, L-19 [8, 9].

Литература

1. **Bolshov L., Strizhov V.** SOCRAT: The System of Codes for Realistic Analysis of Severe Accidents // Proc. Intern. Congress on Advances in Nuclear Power Plants. Reno, 2006. P. 1415—1422.
2. **Мелихов В.И. и др.** Моделирование взаимодействия высокотемпературного расплава материалов активной зоны реактора с теплоносителем // Известия РАН. Сер. «Энергетика». 2007. № 6. С. 11—28.
3. **Melikhov V.I., Melikhov O.I., Yakush S.E., Rtishchev N.A.** Validation of Fuel-Coolant Interaction Model for Severe Accident Simulations // Sci. and Tech. of Nuclear Installations. 2011. DOI:10.1155/2011/560157.
4. **Kolev N.I.** Film Boiling in Vertical Plates and Spheres // Experimental Thermal and Fluid Sci. 1998. V. 18. P. 97—115.
5. **Saito M., Sato K., Imahori S.** Experimental studies on penetration behaviours of water jet into freon-11 and liquid nitrogen // Nat. Heat transfer Conf. Houston (USA), 1988. P. 173.
6. **Pilch M., Erdman C.** Use of Break-Up Time Data and Velocity History Data to Predict the Maximum Size of Stable Fragments for Acceleration-Induced Break-up of a Liquid drop // Int. J. Multiphase Flow. 1987. V. 13. P. 741—757.
7. **Мелихов О.И., Мелихов В.И., Ртищев Н.А., Тарасов А.Е.** Численное моделирование процесса выделения водорода при взаимодействии расплава циркония с водой // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54. № 4. С. 553—562.
8. **Benuzzi A., Magallon D.** FARO-LWR Programme L-14 Test Quick-Look Report. Techn. Note № I.94.171. Institute for Energy and Transport, 1994.
9. **Benuzzi A., Magallon D.** FARO-LWR Programme L-19 Test Quick-Look Report. Tech. Note № I.96.27. Institute for Energy and Transport, 1996.

Статья поступила в редакцию 11.05.2016