

РАЗРАБОТКА ОДНОМЕРНОЙ ТРЕХПОЛЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ С ТЕЧАМИ ВОДЯНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТЖМТ

Мицкевич А.В., Попов А.О. (ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»,
г. Сосновый Бор, Россия); Грицай А.С. (ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»,
г. Сосновый Бор, Россия; Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого в г. Сосновый Бор Ленинградской обл., Россия)

Введение

В связи с проектированием реакторных установок с металлическим теплоносителем (свинец, свинцово-висмутный эвтектический сплав), повышенную актуальность приобретает задача разработки соответствующих расчетных кодов (РК), предназначенных для прогнозного анализа переходных и аварийных процессов в создаваемых реакторных установках. Одними из важнейших для анализа являются аварии с течами водяного теплоносителя в контур с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ).

С целью наиболее детального моделирования физических процессов, протекающих при данных аварийных режимах, необходимо учитывать наличие капельной влаги в объеме пара, для чего требуется разработка трехполевой модели, позволяющей моделировать режимы совместного течения трех сред: ТЖМТ, водяного пара и воды. Соответствующим образом была модернизирована версия РК КОРСАР/ЖМТ [1].

1. Методика расчета контурной теплогидравлики

Допущения модели:

1. В качестве сред в теплогидравлической модели рассматриваются ТЖМТ, водяной пар и вода.
2. Массообмен моделируется только между водой и паром.
3. Весь тепловой поток от ТЖМТ к воде идет на генерацию пара.
4. Отсутствует учет неконденсирующихся газов.
5. Фазы пароводяной смеси движутся в ТЖМТ с одинаковой скоростью (однако в отсутствие металлического теплоносителя скорости могут различаться).

В соответствии с принятыми допущениями, так же, как и в версии РК КОРСАР/ЖМТ [1], уравнения сохранения массы и энергии сред записываются в консервативной форме:

– уравнения сохранения массы:

$$\frac{\partial(\varphi_p \cdot \rho_p)}{\partial \tau} + \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial z} (\varphi_p \cdot \rho_p \cdot W_p \cdot A) = R_{\text{mass},p}; \quad (1)$$

– уравнения сохранения энергии:

$$\frac{\partial(\varphi_p \cdot \rho_p \cdot h_p)}{\partial \tau} + \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial z} (\varphi_p \cdot \rho_p \cdot h_p \cdot W_p \cdot A) - \varphi_p \cdot \left[\frac{\partial P}{\partial \tau} + W_p \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \right] = R_{\text{en},p}. \quad (2)$$

Уравнения сохранения количества движения записываются в неконсервативной форме:

$$\varphi_p \cdot \rho_p \cdot \frac{\partial W_p}{\partial \tau} + \varphi_p \cdot \rho_p \cdot W_p \cdot \frac{\partial W_p}{\partial z} + \varphi_p \cdot \frac{\partial P}{\partial z} = R_{\text{mom},p}. \quad (3)$$

В уравнениях (1–3) φ , h , P , W – неизвестные переменные системы: объемная доля среды, удельная энтальпия среды, давление, скорости среды соответственно,

R – источниковый член уравнения (индексы *mass*, *en*, *mom* обозначают массу, энергию и импульс соответственно), τ – время, z – координата, A – площадь проходного сечения, ρ – плотность, индекс p обозначает среду: $p=m$ – ТЖМТ, $p=g$ – водяной пар, $p=f$ – вода.

Очевидно, что:

$$\varphi_m + \varphi_g + \varphi_f = 1. \quad (4)$$

Первые члены уравнений в системе отражают изменение массы, энергии и скорости среды по времени в каждой точке пространства, вторые члены с производными по координате описывают конвективный перенос соответствующей величины. Выражения в квадратных скобках в уравнениях сохранения энергии моделируют работу сил сжатия, а третий член в уравнениях сохранения количества движения – поверхностные силы давления.

Источниковые члены характеризуют изменение массы и энергии среды вследствие подвода массы и энергии от внешнего источника, а также теплообмена между средами, межфазного тепломассообмена и теплообмена со стенками каналов. Источниковый член в правой части уравнений (3) обозначает интенсивность взаимодействия сред за счет трения между ними, интенсивность механического взаимодействия сред со стенками каналов (включая потери давления на местных сопротивлениях) и объемные силы.

Для сохранения баланса массы и энергии при теплообмене между средами и межфазном тепломассообмене необходимо выполнение условия:

$$\gamma = \frac{q_{fgi} + q_{gfi} + q_{wfgi} + q_{wgf} + q_{mf}}{h_{gfi} - h_{fgi}}, \quad (5)$$

где γ – генерация пара, q_{fgi} – тепловой поток от воды к межфазной поверхности с паром на единицу объема, q_{gfi} – тепловой поток от пара к межфазной поверхности с водой на единицу объема, q_{wfgi} – часть теплового потока от стенки канала к пару на единицу объема, идущая на генерацию пара, q_{wgf} – часть теплового потока от стенки канала к воде на единицу объема, идущая на генерацию пара.

Используемые в уравнениях ненулевые тепловые потоки изображены на рисунке 1.

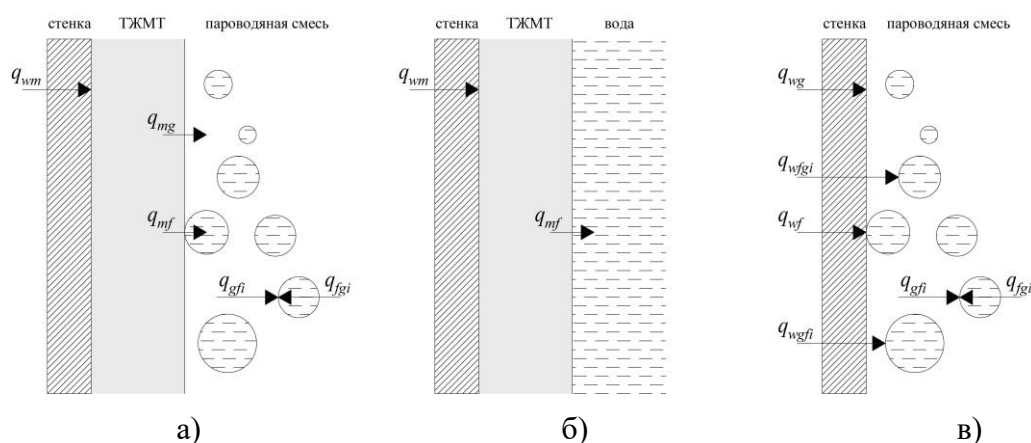


Рис.1. Схема учета тепловых потоков:

(а) – одновременное течение трех сред; (б) – прямой контакт ТЖМТ и неогретой воды в начальный момент впрыска; (в) – течение в отсутствие расплава

Тепловые потоки в системах ТЖМТ/пар, ТЖМТ/вода выражаются неявно по температурному напору:

$$Q_{mg}^{n+1} = \alpha_{mg}^n \cdot F_{mgi}^n \cdot (T_m^{n+1} - T_g^{n+1}), \quad (6)$$

$$Q_{mf}^{n+1} = \alpha_{mf}^n \cdot F_{mfi}^n \cdot (T_m^{n+1} - T_f^{n+1}), \quad (7)$$

где α_{mg} , α_{mf} – коэффициенты теплообмена между средами, F_{mgi} , F_{mfi} – поверхности взаимодействия ТЖМТ и пара, ТЖМТ и воды соответственно, T_m – температура ТЖМТ, T_g – температура пара, T_f – температура воды. $\alpha_{mg} \cdot F_{mgi}$ и $\alpha_{mf} \cdot F_{mfi}$ предлагается рассчитывать как среднее гармоническое коэффициентов теплоотдачи на поверхности взаимодействия сред:

$$\alpha_{mg} \cdot F_{mgi} = \frac{(\alpha_{mgi} \cdot F_{mgi}) \cdot (\alpha_{gmi} \cdot F_{mgi})}{\alpha_{mgi} \cdot F_{mgi} + \alpha_{gmi} \cdot F_{mgi}}, \quad (8)$$

$$\alpha_{mf} \cdot F_{mfi} = \frac{(\alpha_{mfi} \cdot F_{mfi}) \cdot (\alpha_{fmi} \cdot F_{mfi})}{\alpha_{mfi} \cdot F_{mfi} + \alpha_{fmi} \cdot F_{mfi}}, \quad (9)$$

где α_{mgi} , α_{mfi} – коэффициенты теплообмена со стороны ТЖМТ к поверхности взаимодействия с паром и водой соответственно, α_{gmi} , α_{fmi} – коэффициенты теплообмена со стороны пара (воды) к поверхности взаимодействия с ТЖМТ.

Тепловые потоки к межфазной поверхности в системе пар/вода вычисляются в соответствии с базовой версией РК КОРСАР [2]:

$$Q_{gfi}^{n+1} = \alpha_{gfi}^n \cdot F_{gfi}^n \cdot (T_g^{n+1} - T_s^{n+1}), \quad (10)$$

$$Q_{fgi}^{n+1} = \alpha_{fgi}^n \cdot F_{gfi}^n \cdot (T_f^{n+1} - T_s^{n+1}), \quad (11)$$

где α_{gfi} – коэффициент теплообмена со стороны пара к межфазной поверхности с водой, α_{fgi} – коэффициент теплообмена со стороны воды к межфазной поверхности с паром, F_{gfi} – поверхность взаимодействия пара и воды.

2. Замыкающие соотношения модели

2.1 Карты режимов течения в каналах

При возникновении межконтурной течи необходимо рассматривать область совместного течения трех сред, в которой, в предельных случаях, могут реализовываться режимы течения однофазного ТЖМТ, однофазного газа и однофазной воды. С целью наилучшего описания взаимодействий между всеми средами, приняты две карты режимов течения: для учета взаимодействия ТЖМТ с пароводяной смесью и для учета взаимодействия пара и воды в пароводяной смеси.

Для упрощения модели взаимодействия сред учет расслоенных режимов течения не производится. В соответствии с этим допущением карта режимов течения принята общей для вертикальных и горизонтальных каналов.

Карта режимов течения для системы ТЖМТ/пароводяная смесь принята одномерной, содержащей пузырьковый, пенно-турбулентный режимы течения, режим течения в отсутствие металлического теплоносителя и переходные области между ними. Снарядный и кольцевой режимы течения не включены в карту из предположения, что они не могут устойчиво сформироваться в ТЖМТ в связи с его

высокой плотностью, которая приводит к большим значениям чисел Рейнольдса, характерным для турбулентных режимов течения.

Карта режимов течения приведена на рисунке 2.

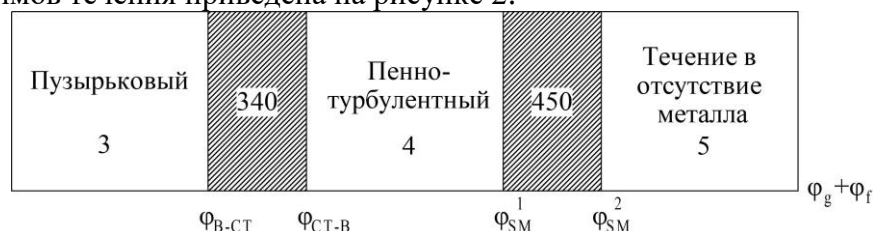


Рис.2. Карта режимов течения теплоносителя для системы ТЖМТ/пароводяная смесь

Для системы пар/вода карта режимов течения принята, исходя из допущения, что режимы течения при движении пароводяной смеси в ТЖМТ аналогичны таковым при протекании в круглой трубе, и предположения, что при впрыске воды в ТЖМТ температура металла всегда выше минимальной температуры его смачивания.

Вследствие этого карта принята одномерной, содержащей режим пленочного кипения, дисперсный режим течения, а также переходную область между ними.

Карта режимов течения приведена на рисунке 3.

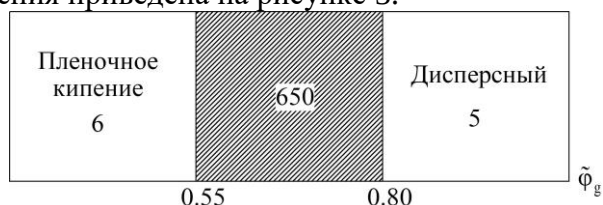


Рис.3. Карта режимов течения теплоносителя для системы пар/вода

На рисунке 3 $\tilde{\varphi}_g$ – паросодержание в объеме пароводяной смеси, вычисляемое следующим образом:

$$\tilde{\varphi}_g = \frac{\varphi_g}{\varphi_g + \varphi_f}. \quad (12)$$

Интерполяция в переходных областях карт режимов течения производится по аналогии с базовой версией РК КОРСАР [3].

2.2 Карты режимов теплообмена со стенкой в каналах

Согласно результатам работы Сибамото и др. [4] при возникновении межконтурной течи с попаданием пароводяной смеси из второго контура в металлический теплоноситель формируется пароводяная каверна. Для описания данного явления и учета вертикальной стратификации необходимо учесть возможность отсутствия металлического теплоносителя в ячейке обогреваемого канала.

В соответствии с этим была принята карта режимов теплообмена, включающая конвективный теплообмен ТЖМТ со стенкой, а также дисперсный режим для описания контакта пароводяной смеси со стенкой.

Карта режимов теплообмена потока со стенкой приведена на рисунке 4.



Рис.4. Карта режимов теплообмена со стенкой

2.3 Замыкающие соотношения по теплообмену со стенкой

Конвективный теплообмен ТЖМТ со стенкой аналогичен КОРСАР/ЖМТ [1] и опирается на рекомендации РБ 075-12 [5].

Механизм теплообмена пароводяной смеси со стенкой принят аналогичным механизму теплообмена со стенкой в закритических режимах, используемому в базовой версии РК КОРСАР [3] (режим пленочного кипения, дисперсный режим и переходная область).

2.4 Замыкающие соотношения по трению между средами

Удельная сила трения между средами в полунявной численной схеме модели контурной теплогидравлики рассчитывается аналогично версии РК КОРСАР/ЖМТ [6]:

$$F_{i,(p1p2)}^{n+1} = \tau_{i,(p1p2)}^{n+1} \cdot \Pi_{i,(p1p2)}^n / A = f_{i,(p1p2)}^n \cdot (C_{p1}^n \cdot W_{p1}^{n+1} - C_{p2}^n \cdot W_{p2}^{n+1}) / \Delta z, \quad (13)$$

где $(p1, p2)$ – индексы, соответствующие (g, m) при взаимодействии пара с ТЖМТ, (f, m) при взаимодействии воды с ТЖМТ на начальной стадии впрыска, (g, f) при взаимодействии пара с водой, $\tau_{i,(p1p2)}$ – напряжение трения между средами, $\Pi_{i,(p1p2)}$ – периметр поверхности взаимодействия сред, $f_{i,(p1p2)}$ – коэффициент, характеризующий трение между средами в системе разностных уравнений сохранения, C_{p1}, C_{p2} – коэффициенты, учитывающие распределение скоростей сред в поперечном сечении канала.

При расчете трения между ТЖМТ и пароводяной смесью делается несколько предположений:

1. Предполагается, что фазы пароводяной смеси движутся в металлическом теплоносителе с одинаковой скоростью (образуются пузырьки пара с каплями воды внутри). При отсутствии ТЖМТ скорости могут быть не равны.
2. В момент впрыска недогретой воды в металлический теплоноситель необходимо рассматривать возможность прямого контакта ТЖМТ с водой для ограничения скорости последней.

Для реализации данных предположений при расчете интенсивности трения между средами производится корректировка размеров площади поверхности взаимодействия сред в зависимости от доли пара в объеме пароводяной смеси.

Расчет трения между ТЖМТ и пароводяной смесью производится в соответствии со специализированной версией РК КОРСАР/ЖМТ [6] с той разницей, что вместо газа используется гомогенизированная смесь воды и пара.

Расчет трения между паром и водой в режиме пленочного кипения происходит аналогично обращенному кольцевому режиму в базовой версии РК КОРСАР [3]; расчет трения в дисперсном режиме также аналогичен базовой версии.

2.5 Замыкающие соотношения по теплообмену между средами

При расчете теплообмена со стороны ТЖМТ площадь поверхности взаимодействия определяется общей для пароводяной смеси ($F_{\text{imix}} = F_{\text{mfi}} + F_{\text{mgi}}$), а после распределяется по фазам.

Коэффициент теплообмена от ТЖМТ к поверхности взаимодействия сред не зависит от фазы пароводяной смеси, с которой происходит взаимодействие, и принимает равное значение для воды и для пара ($\alpha_{\text{mi}} = \alpha_{\text{mgi}} = \alpha_{\text{mfi}}$).

Механизм теплообмена со стороны пароводяной смеси к ТЖМТ принят аналогичным механизму теплообмена со стенкой в закризисных режимах, используемому в базовой версии РК КОРСАР [3], однако исключен учет радиационного теплообмена, так как предполагается, что температура металлического теплоносителя недостаточно высока для этого.

В дисперсном режиме течения коэффициенты теплоотдачи со стороны пара и воды к ТЖМТ рассчитываются по методике для теплового взаимодействия пара и капель со стенкой аналогично базовой версии РК КОРСАР [3].

Теплообмен между водяной и паровой средами учитывается аналогично базовой версии РК КОРСАР [3].

3. Особенности моделирования межконтурных течей

При моделировании межконтурных течей с использованием модифицированной версии кода контуры являются гидродинамически несвязанными, и впрыск воды или пароводяной смеси из второго контура в первый (контур с расплавом) производится при помощи элементов «источник массы» *smass_t* и «заданная граничная ячейка» *bvol_t*.

При проведении расчетов необходимо учесть влияние на испарение воды перепада давления и дросселирования, для чего необходимо решить следующее уравнение:

$$h_I = h_{II} + \frac{P_I}{\rho_I(P_I, h_I)} - \frac{P_{II}}{\rho_{II}(P_{II}, h_{II})}, \quad (16)$$

где h_I – энтальпия потока в первом контуре (после точки впрыска), h_{II} – энтальпия потока во втором контуре (до точки впрыска), P_I , P_{II} – давление первого (после точки впрыска) и второго (до точки впрыска) контуров соответственно, ρ_I , ρ_{II} – плотности пароводяной смеси в первом (после точки впрыска) и во втором (до точки впрыска) контурах соответственно. Уравнение (16) решается итерационно относительно h_I .

4. Анализ результатов расчетов

4.1 Характеристики установки LIFUS 5

В экспериментах на стенде LIFUS 5 производилось моделирование аварии с разрывом трубки парогенератора на экономайзерном участке. Данный аварийный режим занимает особое место при расчетном обосновании безопасности реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем. Поскольку теплоносителем второго контура является вода, а давление второго контура значительно выше давления первого контура, пароводяная смесь попадает в жидкий металл.

Экспериментальная установка представляет собой систему сосудов (S1, S2, S3), соединенных между собой трубами малого диаметра. Сосуд S.T использовался

для подачи в S1 расплава на этапе подготовки к эксперименту, в моделировании аварийного режима не участвовал.

Схема установки показана на рисунке 5.

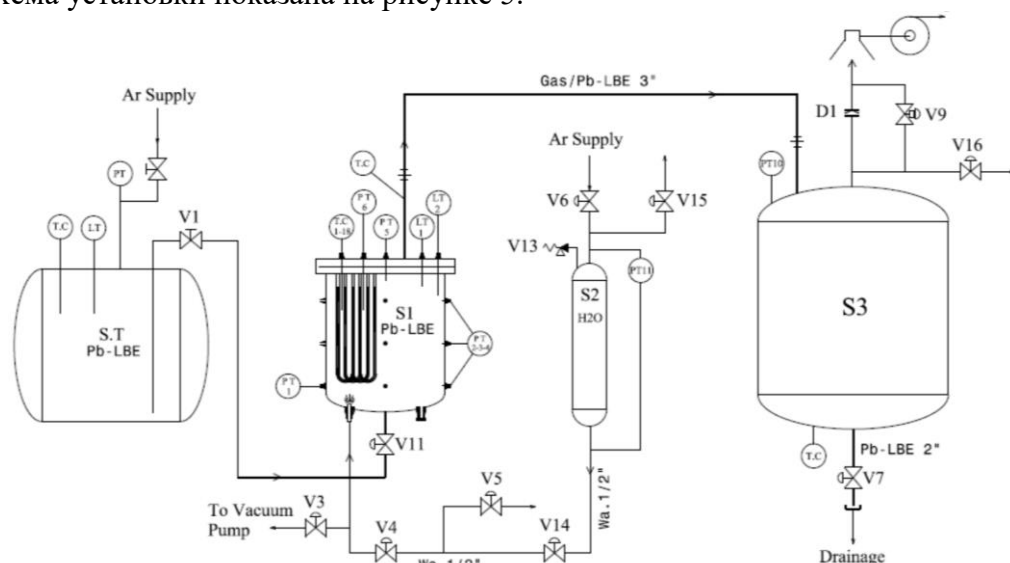


Рис.5. Схема установки LIFUS 5 [7]

В сосуде S1, представляющем собой закрытый крышкой стальной цилиндрический бак со сферическим дном объемом 100 л, находится эвтектический свинцово-висмутовый сплав. Свободный объем занят аргоном при атмосферном давлении. Внутри корпуса помещена сборка ELSY, имитирующая трубчатку парогенератора. Впрыск пароводяной смеси осуществляется под уровнем жидкометаллического теплоносителя. Также на этом рисунке отображены точки установки датчиков давления.

Сосуд S1 трубой с внешним диаметром 88.9 мм соединен с сосудом S3, представляющим собой стальной цилиндрический бак внутренним диаметром 1 м и объемом 2 м³, заполненный аргоном.

Также сосуд S1 соединен с сосудом S2 трубой диаметром 12.7 мм. Через данную трубу, имеющую на конце инжектор диаметром выходного отверстия 4 мм, помещенный внутрь сосуда S1, происходит впрыск пароводяной смеси из сосуда S2. В начальный момент в трубе создан вакуум. Задвижка (V14) закрыта. Сосуд S2 – стальной цилиндрический бак объемом 15 л, заполненный 7 л воды и 8 л аргона.

Было произведено моделирование трех экспериментов, проведенных на данной установке: ELSY [7], ELSY-2 [8], ELSY Test №3 [9]. Условия проведения экспериментов сведены в таблицу.

Условия проведения экспериментов на установке LIFUS

	ELSY	ELSY-2	ELSY Test №3
Температура CBT	400 °C	400 °C	350 °C
Давление в сосуде S2	18.5 МПа	18.5 МПа	4 МПа
Температура воды в сосуде S2	300 °C	300 °C	235 °C
Интервал времени, в течение которого задвижка V14 остается открытой	3 с	3 с	3 с
Объемная доля аргона в сосуде S1	20 %	20 %	0 %
Глубина проникновения инжектора в сосуд S1	5 мм	250 мм	5 мм

4.2 Расчетные схемы

При моделировании экспериментов на установке LIFUS 5 были сделаны некоторые допущения:

1. Ввиду невозможности произведения расчетов с неконденсирующимися газами заполненный аргоном объем моделируется как паровой (при моделировании с использованием двухполевой модели существенных различий в результатах расчетов при использовании пара и аргона не наблюдалось).
2. Объем расплава в сосудах S1, находящийся ниже уровня впрыска, считается застойной областью и исключается из модели, так как движение ТЖМТ на данном участке невозможно замоделировать в рамках одномерного расчетного кода.
3. Проходное сечение сосуда S1 уменьшено примерно в 4 раза по сравнению с реальным для учета застойных областей. Так как код одномерный, распределение сред происходит по всему объему расчетной ячейки, вследствие чего невозможно учесть реальное распределение пароводяной смеси в большом объеме (каковым является сосуд S1). Для анализа динамики давления наиболее важную роль играют взаимодействия между средами, в особенности процессы испарения воды и прохождения пара через ТЖМТ на входе в трубу малого диаметра.
4. При численном моделировании установка разделяется на две не связанные между собой напрямую системы: первая моделирует систему впрыска, состоящую из сосуда S2 и трубы с инжектором, вторая – сосуды S1 и S3 с соединяющей их трубой. Связь данных систем реализована за счет обмена граничными условиями на шаге интегрирования.

Нодализационные схемы для экспериментов ELSY, ELSY-2 и ELSY Test №3 представлены на рисунках 7-9 соответственно.

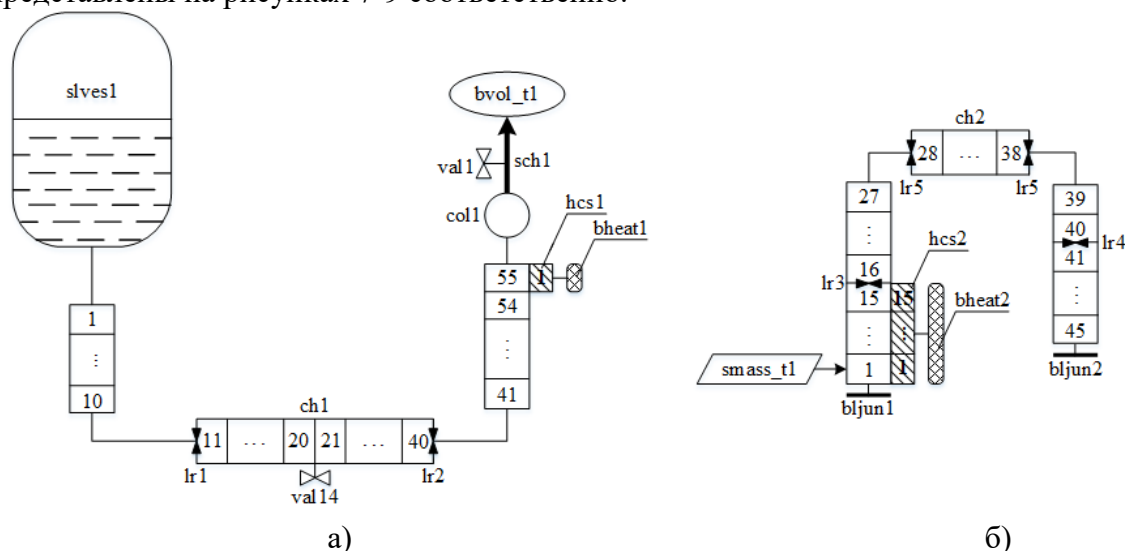


Рис.7. Нодализационная схема для моделирования эксперимента ELSY:
(а) – система впрыска, (б) – сосуды S1 и S3

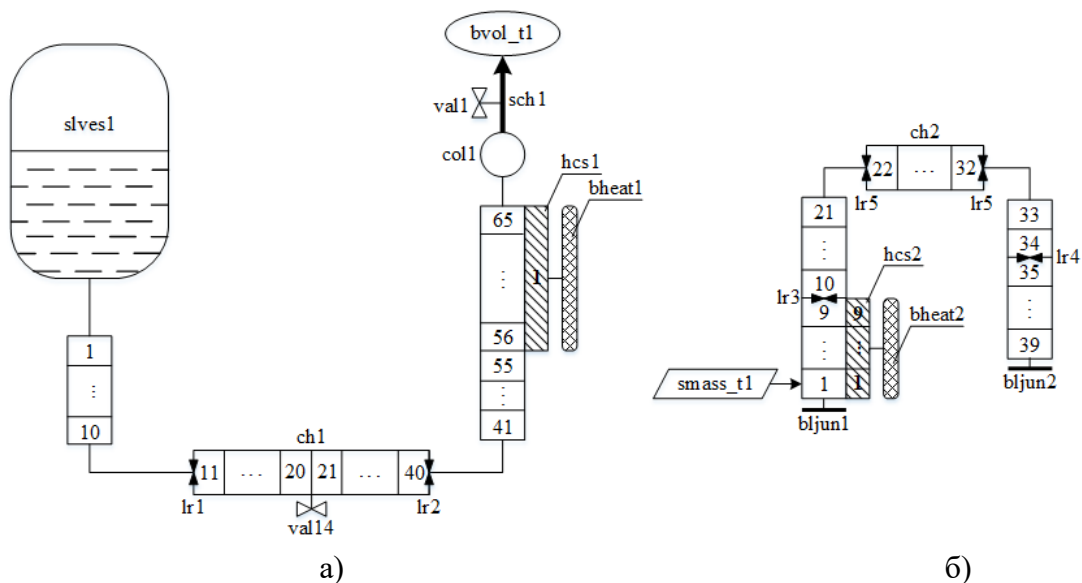


Рис.8. Нодализация схема для моделирования эксперимента ELSY-2:
(а) – система впрыска, (б) – сосуды S1 и S3

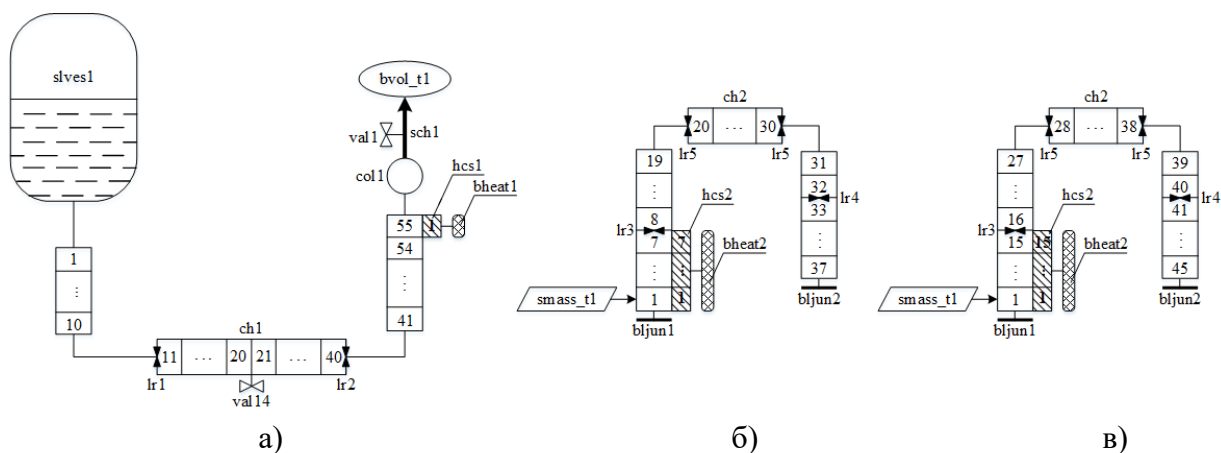


Рис.9. Нодализация схема для моделирования эксперимента ELSY Test №3:
(а) – система впрыска, (б) – сосуды S1 и S3 (для двухполевой модели),
(в) – сосуды S1 и S3 (для трехполевой модели)

4.3 Результаты расчетов

По итогам численного моделирования получены кривые давления внутри сосуда S1. Сравнение данных кривых с давлением, измеренным в экспериментах по датчикам PT1 (в экспериментах ELSY и ELSY Test №3) и PT6 (в эксперименте ELSY-2), приведено на рисунках 10-12.

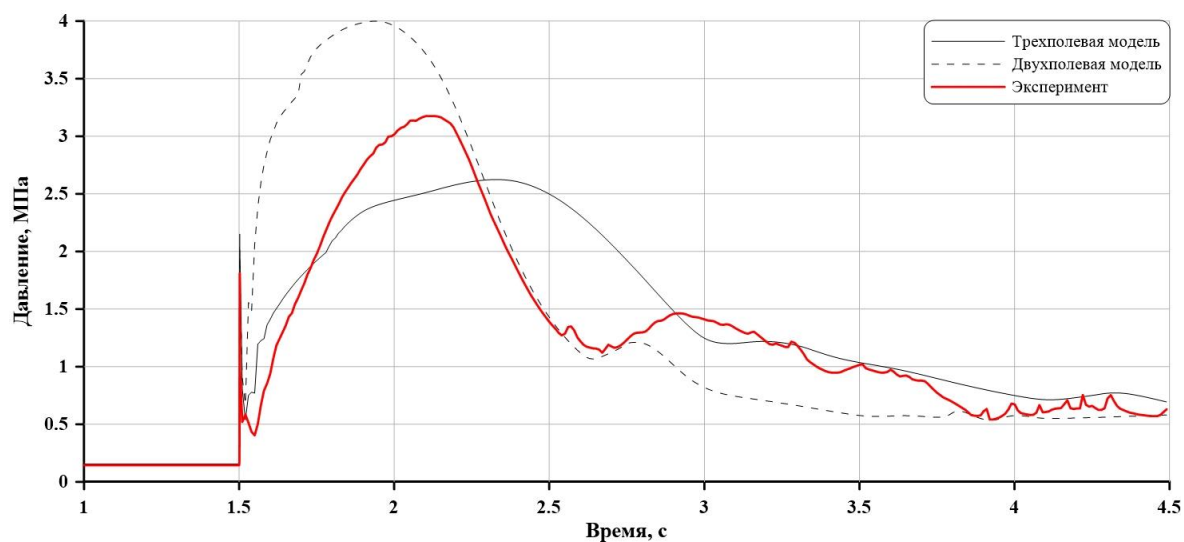


Рис.10. Сопоставление изменения расчетного давления с экспериментальным для эксперимента ELSY

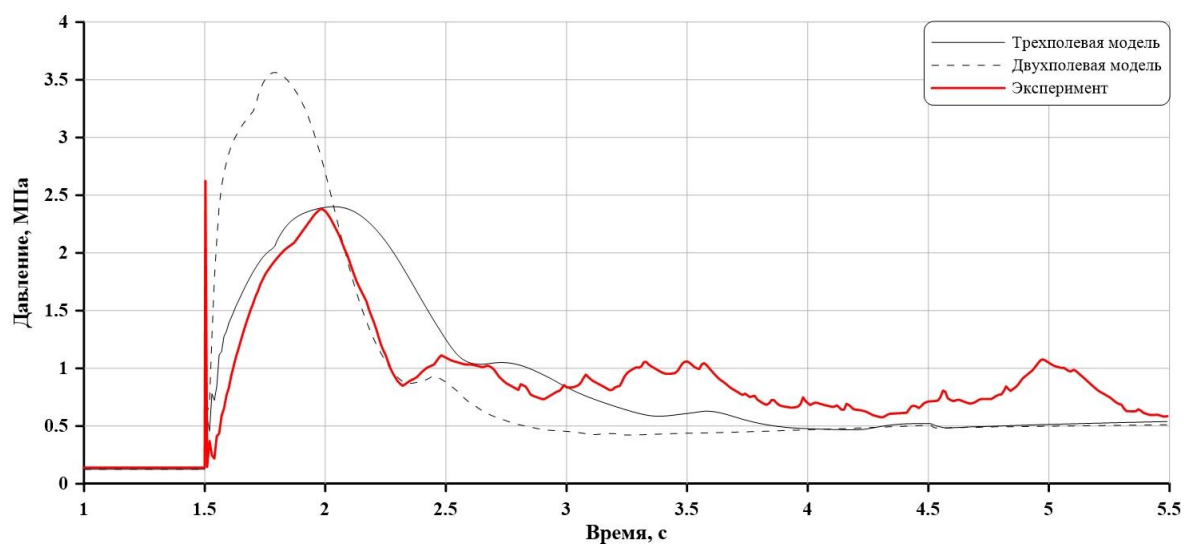


Рис.11. Сопоставление изменения расчетного давления с экспериментальным для эксперимента ELSY-2

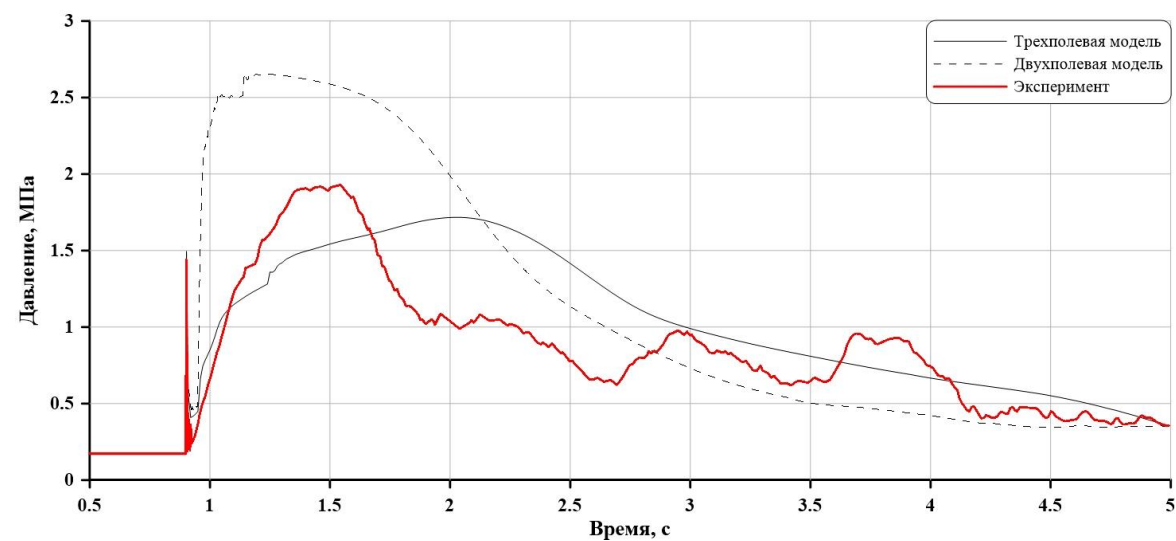


Рис.12. Сопоставление изменения расчетного давления с экспериментальным для эксперимента ELSY Test №3

Основным процессом, влияющим на изменение давления в эксперименте, является «выдавливание» металлического теплоносителя из сосуда S1 в сосуд S3 и дальнейшее протекание потока, состоящего из трех сред (ТЖМТ, пар, вода), через связывающую данные сосуды трубку. Динамика изменения давления зависит от объемного расхода поступающей в сосуд S1 среды (пар/пароводяная смесь).

В целом во всех случаях динамика изменения давления близка к наблюдаемой в экспериментах, однако в расчетах с использованием двухполевой модели получен более быстрый рост давления в начале впрыска и, соответственно, завышение значений максимального давления. Наиболее вероятно это связано с допущением о полном мгновенном испарении воды, приводящим к большим объемным расходам поступающего в сосуд S1 пара. На этом основании можно сделать предположение, что вода и пар в пароводяной смеси находятся в неравновесном состоянии, и процесс доиспарения воды значительно влияет на динамику давления. Учесть неравновесность пароводяного потока в рамках имеющейся двухполевой модели не представляется возможным, вследствие чего расчеты по данной модели являются консервативными.

После перехода на трехполевую модель расчетные кривые значительно приблизились к экспериментальным, особенно в областях максимальных значений давления, что, вероятно, связано с уменьшением объемного расхода пара. Стоит отметить, что динамика изменения давления относительно эксперимента растянута во времени. Предположительно, это связано с принятыми допущениями: о равенстве скоростей фаз и о расчете теплообмена между ТЖМТ и пароводяной смесью аналогично теплообмену пароводяной смеси со стенкой.

Заключение

1. С целью проведения исследования влияния наличия капельной влаги в объеме пара на моделирование аварийных процессов с течами водяного теплоносителя в контур с ТЖМТ в РК КОРСАР/ЖМТ внесены изменения, базирующиеся на ранее разработанной трехжидкостной версии кода.
2. Соответствующим образом модифицирована система уравнений сохранения, карты режимов течения и теплообмена и замыкающие соотношения моделей.
3. С использованием полученной версии кода выполнено моделирование экспериментов на установке LIFUS 5, по результатам которого сделан вывод о необходимости учета капельной влаги в потоке с целью более корректного учета изменения давления в динамических режимах.

Список литературы

1. Волкова С.Н. и др. Разработка, верификация и практическое использование расчетного кода КОРСАР/ЖМТ / Волкова С.Н., Бенедиктов Д.В., Вакарин А.В., Данилов И.Г., Мицкевич А.В., Попов А.О., Ярушина А.В. // Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ, 2021, № 2, С. 25–35.
2. Юдов Ю.В. Разработка двухжидкостной модели контурной теплогидравлики реакторных установок с водяным теплоносителем // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 188 с. 2001 г.
3. Юдов Ю.В., Волкова С.Н., Мигров Ю.А., Замыкающие соотношения теплогидравлической модели расчетного кода КОРСАР // Теплоэнергетика, 2002, № 11, С. 22—29.

4. Sibamoto, Y., et.al. Visualization and measurement of subcooled water jet injection into molten alloy // 8th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 8), April 2-6, 2000, Baltimore, MD USA.
5. Расчетные соотношения и методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования ядерных энергетических установок с жидкометаллическим теплоносителем (РБ-075-12) // Руководство по безопасности. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва, 2012.
6. Мицкевич А.В., Попов А.О., Грицай А.С. Анализ замыкающих соотношений по межфазному трению для систем газ-ТЖМТ // Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ, 2021, № 3, С. 9–23.
7. Bernardi, D., Ciampichetti, A., Tarantino, M., Coccoluto, G., Forgione, N., Poli, F., Catanorchi, M., LBE-water interaction in the LIFUS 5 facility to study a SGTR event under ELSY reactor conditions// 18th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 18), May 17-21, 2010, Xi'an, China.
8. Bernardi, D., Ciampichetti, A., Forgione, N., Poli, F. Analysis of the LBE-water interaction in the LIFUS 5 facility to support the investigation of a SGTR event in LFRs. ENEA Report NNFISS-LP3-005, 27.09.2010.
9. Ciampichetti, A., Bernardi, D., Cadiou, T., Forgione, N., Poli, F., Pellini, D. LBE-water interaction in LIFUS 5 facility under different operating conditions// Journal of Nuclear Materials, 2011, No. 415, p. 449–459.