

КОНТЕЙНМЕНТНЫЙ КОД SIMCO В ПРИЛОЖЕНИИ К МОДЕЛИРОВАНИЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОДОРОДА В ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧКАХ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В.И. Доровских, С.Л. Дорохович, А.А. Зайцев, В.А. Левченко, И.Н. Леонов

ООО ЭНИМЦ «Моделирующие Системы»

249035, г. Обнинск, Калужская обл., пр. Ленина 133



Изложено общее описание расчетного кода SIMCO, разработанного для моделирования теплогидравлических и физико-химических процессов в контейментах (защитных оболочках) объектов атомной энергетики. Представлена методика расчета на основе физико-математической модели в сосредоточенных параметрах. В качестве численного метода решения используется модифицированная полуневная процедура SIMPLER. Проведено тестирование кода на основе аналитического и качественного тестов. Сопоставление численного и аналитического решений показало хорошее согласование. Выполнена верификация кода по экспериментальным данным, полученным на интегральном стенде NUPEC (Япония). По результатам тестирования и верификации сделан вывод, что в целом физико-математические модели кода достаточно адекватно описывают процессы теплопереноса в защитной оболочке. В связи с этим данная версия кода SIMCO может быть использована для анализа совокупности теплофизических и физико-химических процессов в объектах атомной энергетики, имеющих защитные оболочки, включая перенос паровоздушно-водородных смесей.

Ключевые слова: код SIMCO, физико-математическая модель в сосредоточенных параметрах, аналитический тест, верификация, распространение водорода.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ КОДА SIMCO

Модернизация действующих и разработка новых ЯЭУ, отвечающих повышенным требованиям надежности, безопасности и экономичности, делает необходимым совершенствование методов расчета реакторов, теплообменного оборудования, систем безопасности и локализации аварий. Контеймент является четвертым, последним барьером безопасности на пути распространения радиоактивных продуктов в окружающую среду. Он проектируется в соответствии с нормативными документами, и теплообменные процессы в контейменте при аварии с течью теплоносителя носят сложный пространственный характер, характеризуются многочисленными теплофизическими, физическими и химическими явлениями, которые определяют эффективность и надежность работы систем безопасности. В связи с этим исследования процессов в контейменте становятся неотъемлемой частью проек-

© **В.И. Доровских, С.Л. Дорохович, А.А. Зайцев, В.А. Левченко, И.Н. Леонов, 2018**

ных работ. Для АЭС нового поколения особое внимание уделяется водородной пожаро- и взрывобезопасности [1 – 4]. Актуальность проблемы эффективного и надежного обеспечения водородной взрывобезопасности возросла после аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» (Япония) 11 марта 2011 г.

Для моделирования герметичных помещений или гермозоны АЭС может быть использован код SIMCO, первоначально разрабатываемый как версия реального времени кода КУПОЛ-М [2]. Моделирование динамических процессов в режиме реального времени (или максимально приближенного к этому) является особенно актуальным при разработке аналитических и полномасштабных тренажеров действующих, строящихся и проектируемых объектов атомной энергетики. Наличие тренажеров на объектах атомной энергетики позволяет наиболее эффективно осуществлять подготовку оперативного персонала АЭС. Код SIMCO предназначен для расчета теплотехнических и физико-химических параметров среды в объеме защитных оболочек (ЗО) для АЭС, либо иных объектов атомной энергетики, имеющих контеймент, при различных сценариях аварийных процессов.

Моделирование проводится с использованием произвольной топологии контрольных объемов внутри гермозоны.

Рассчитываются следующие основные величины:

- изменение во времени температуры и давления газа в помещениях ЗО;
- нестационарное распределение температуры в стенах и оборудовании;
- временные зависимости плотности азота, кислорода, пара, водорода, гелия, двуокиси углерода, монооксида углерода, произвольного инертного компонента и мелкодисперсной влаги в помещениях ЗО;
- интенсивность конденсации пара и температура образующегося конденсата в каждом помещении ЗО;
- температура сливающейся воды в нижние помещения;
- расходы газовой смеси в проходках между помещениями.

При расчете учитываются эффекты нестационарного тепломассопереноса газовой смеси, объемной и поверхностной конденсации пара, естественной конвекции газовой смеси; учитывается функционирование спринклерной системы и функционирование пассивных каталитических рекомбинаторов водорода, насосов и вентиляционных систем.

Ограничения на применение.

1. Применение кода SIMCO ограничено областью термодинамических параметров атмосферы в объеме ЗО при авариях с течью теплоносителя на АЭС.

2. Код требует задания следующих граничных условий:

- расхода и энтальпии (температуры) пароводяной смеси, поступающей под оболочку из течи;
 - расходов и температур парогазовых компонентов, поступающих в помещения ЗО;
 - расхода вытяжной вентиляции;
 - расхода и энтальпии воды, подаваемой в спринклерное устройство.
3. Допустимые значения параметров газовой смеси:
- давление от 0.07 до 1.5 МПа;
 - температура от 275 до 1200 К.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Математическая модель тепломассопереноса в помещениях ЗО [5, 6] представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений сохранения импульса, энергии и компонентов газовой смеси, записанных для каждого выделенного контрольного объема. Данный подход (моделирование в сосредоточенных параметрах)

получил широкое распространение [7 – 9]. При существенном влиянии сжимаемости на характеристики газового потока вместо уравнения сохранения импульса используются зависимости, полученные для адиабатического истечения газа из сосудов под давлением. В качестве уравнения состояния принят универсальный газовый закон. Модель теплообмена со стенами и различным оборудованием включает в себя одномерное уравнение теплопроводности для плоской, цилиндрической и сферической стенок. Моделируются эмпирические зависимости для суммарного коэффициента теплоотдачи для расчета поверхностной конденсации пара и для конвективных коэффициентов теплоотдачи. Процесс объемной конденсации пара включает в себя моделирование формы спектра капель по размерам.

Численное решение полученной системы уравнений проводится на базе модифицированной полунеявной процедуры SIMPLER [10 – 13]. Скалярные величины (давление, температура и плотность) определяются в контрольных объемах, скорости парогАЗокапельной смеси – на границах контрольных объемов (в связях, соединяющих контрольные объемы). На первом этапе определяются давление в контрольных объемах и расходы смеси в связях между ними. Далее решаются уравнения переноса энергии и компонентов смеси. На последнем этапе шага интегрирования по времени решаются локальные задачи объемной и поверхностной конденсации пара и определяются температурные поля в стенах и оборудовании.

Непосредственно конечно-разностная система алгебраических уравнений, в общем случае имеющая разреженную матрицу коэффициентов, решается методом Гаусса или методом нижней релаксации. Обыкновенное дифференциальное уравнение для скорости парогАЗовой смеси в связи решается методом Рунге-Кутты. Уравнение теплопроводности для стен, аппроксимируемое неявной разностной схемой, решается методом прогонки.

ТЕСТИРОВАНИЕ КОДА

Аналитический тест «газодинамическая пружина». Подобная задача для линейризованного режима течения рассмотрена в [14]. Также подобный тест был использован для тестирования кода КУПОЛ-М [15].

Рассмотрим аналитическое решение линейной задачи сжатия газа в открытом сосуде под действием внешнего постоянного давления. В целях линейризации задачи пренебрежем изменением температуры газа за счет работы внешних сил, тогда уравнение движения можно записать в виде

$$\frac{du}{d\tau} = -\frac{\xi}{2\Delta X}u + \frac{1}{\rho_0\Delta X}(P_0 - P), \quad (1)$$

где u – скорость газа в связи; ξ – линейный коэффициент гидравлического сопротивления, м/с; ρ_0, P_0 – плотность и давление газа во внешней среде (кг/м³ и Па соответственно); ΔX – характерная длина связи, м; P – давление в открытом сосуде, Па.

Уравнение для плотности газа в открытом сосуде имеет вид

$$\frac{d\rho}{d\tau} = \frac{\rho_0 S}{V}u, \quad (2)$$

где S – сечение связи; V – объем сосуда.

С помощью универсального газового закона заменим давление в сосуде в уравнении (1) на плотность и после дифференцирования по времени получим

$$\ddot{u} + a\dot{u} + bu = 0, \quad (3)$$

где $a = \xi / (2\Delta X)$; $b = RT_0 S / (M_G V \Delta X)$; R – универсальная газовая постоянная; T_0 – температура газа в сосуде; M_G – молекулярная масса газа.

Полагая, что газ в сосуде идентичен внешнему газу и учитывая начальные условия

$$\left. \begin{aligned} u|_{\tau=0} &= 0, \\ \frac{du}{d\tau} \Big|_{\tau=0} &= \frac{\Delta P_0}{\rho_0 \Delta X}, \end{aligned} \right. \quad (4)$$

получим решение уравнения в виде

$$u = 2\Delta P_0 \lambda^{-1} \exp(at) \sin(\lambda\tau/2), \quad (5)$$

где $\lambda = (4b - a^2)^{1/2}$; ΔP_0 – начальный перепад давления между боксами.

Численное моделирование данного теста проводилось по двухбуксовой нодализационной схеме с линеаризованной моделью для уравнения движения в изотермическом приближении. Внешняя среда моделируется большим боксом, объем которого на несколько порядков превосходит объем открытого сосуда. При равных начальных плотностях газа в боксах необходимый перепад давления создается за счет веса столба газа в большом боксе.

Таблица 1

Исходные данные для теста «газодинамическая пружина»

Объем верхнего бокса, м ³	10 ⁶
Объем нижнего бокса, м ³	1.0
Высота верхнего бокса, м	10.0
Проходное сечение связи, м ²	0.1
Характерная длина связи, м	1.0
Коэффициент гидравлического сопротивления, м/с	0.5
Начальная плотность газа, кг/м ³	1.0
Температура, К	333
Молекулярная масса газа, кг/моль	0.028

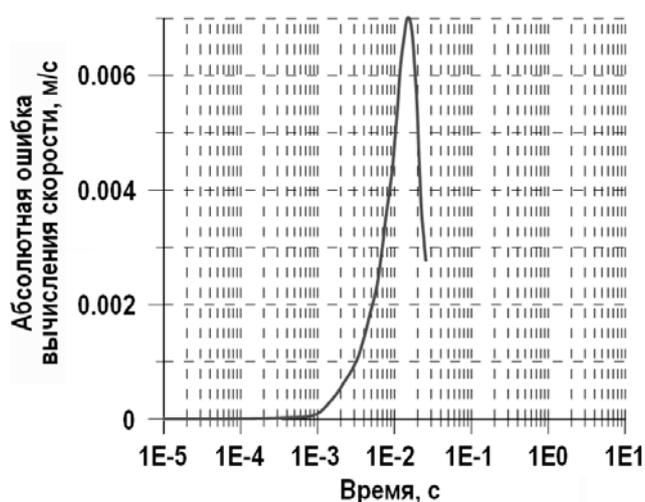


Рис. 1. Разность аналитического и численного решений

Уравнение для плотности газа в открытом сосуде (2) справедливо только при положительных значениях скорости (газ из окружающей среды входит в открытый сосуд), так как плотность газа окружающей среды в правой части данного уравнения постоянна. Поэтому численное решение сопоставляется с аналитическим решением в начальный период времени. Геометрические характеристики нодализационной схемы приведены в табл. 1.

Вид зависимости абсолютной погрешности решения приведен на рис. 1 (максимальная относительная погрешность составляет $\sim 0.8\%$). Заметим, что погрешность примерно линейно зависит от шага интегрирования уравнения движения по времени.

Численное решение после момента времени $\tau > 0.03$ секунды носит колебательный характер. Затухание колебаний происходит из-за диссипации механической энергии ввиду наличия гидравлического сопротивления. В реальных объектах, описываемых квадратичным законом сопротивления (а также повышением температуры за счет работы внешних сил сжатия), колебания затухают значительно быстрее.

Качественный тест «естественная циркуляция газа». Данный тест иллюстрирует возможность возникновения «паразитной» естественной циркуляции газовой смеси в замкнутом контуре в том случае, если численная модель не учитывает сжимаемость газа за счет собственного веса по высоте расчетного бокса. Важность данного эффекта особенно актуальна при моделировании концентрационной и температурной стратификации легкого компонента (водорода) [16].

Рассмотрим циркуляционный контур, нодализационная схема которого представлена на рис. 2.

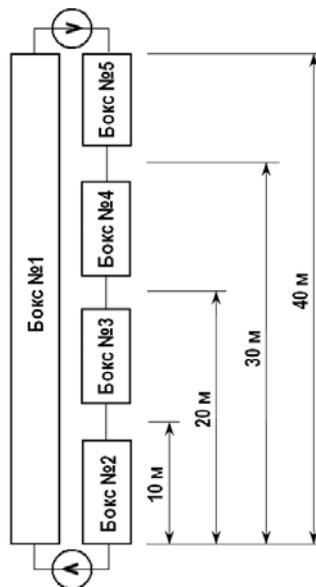


Рис. 2. Нодализационная схема замкнутого контура естественной циркуляции

Контур теплоизолирован, источники тепла и массы отсутствуют, газ однороден.

При несжимаемом газе внутри бокса давление по его высоте изменяется линейно. Если перепад давления на верхней связи равен нулю, то плотность газа в обеих ветвях на верхней отметке одинакова и равна ρ_0 . Давление в левой ветви на отметке 0 м равно $P_0 + 40\rho_0g$. Давление в правой ветви на отметке 0 м будет больше, так как средняя по высоте ветви плотность газа из-за его сжимаемости в расчетных

боксах № 4, 3 и 2 больше ρ_0 , т.е. данная нодализационная схема при неучете бoльцмановского распределения плотности по высоте бокса приводит к возникновению некоторого, отличного от нуля, перепада давления, вызывающего движение газа.

Таблица 2

Параметры замкнутого контура естественной циркуляции

Бокс	№1	№2	№3	№4	№5
Отметка пола бокса, м	0.0	0.0	10.0	20.0	30.0
Отметка потолка бокса, м	40.0	10.0	20.0	30.0	40.0
Начальная плотность газа в боксе, кг/м ³	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
Связи					
Сечение связей, м ²					0.1
Кэффициент гидравлического сопротивления связей					0.5

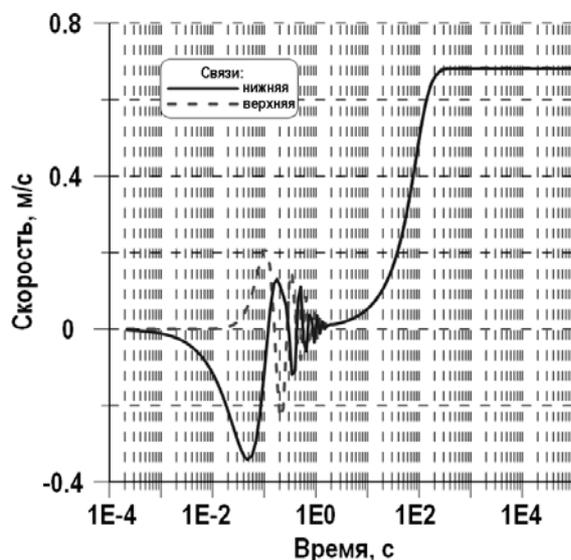


Рис. 3. Возникновение стационарной «паразитной» естественной циркуляции в контуре (модель без учета сжимаемости газа внутри бокса)

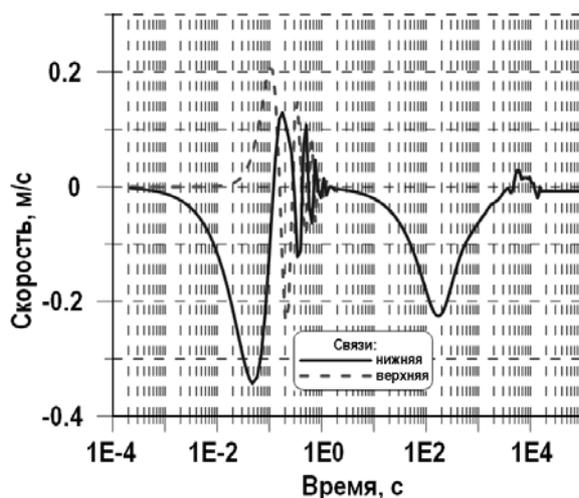


Рис. 4. Отсутствие стационарной циркуляции в контуре (модель кода SIMCO)

Результаты численного расчета рассмотренного замкнутого контура с параметрами, близкими к натурным величинам контейнментов современных АЭС (табл. 2), по двум математическим моделям (модели несжимаемого газа внутри бокса и модели кода SIMCO с учетом сжимаемости [9]) приведены на рис. 3 и 4.

Скорость газа «паразитной» циркуляции в контуре без источников достигает примерно 0.7 м/с. Модель кода SIMCO, учитывающая сжимаемость парогазовой смеси в объеме расчетного бокса, после переходного этапа, связанного с начальными условиями, показывает отсутствие «паразитной» циркуляции в системе связанных боксов. Длительность переходного периода определяется гидравлическими характеристиками, геометрией боксов и компонентным составом газовой смеси. Таким образом, некорректность физико-математической модели естественной конвекции газа может привести к существенным ошибкам в расчете циркуляционных контуров в контейнменте, что особенно важно при расчете стратифицированных течений при анализе водородной безопасности.

ВЕРИФИКАЦИЯ КОДА

Верификация кода проводилась по экспериментальным данным, полученным на стенде NUPEC (Япония) [17]. Интегральный стенд NUPEC представляет собой модель контейнмента АЭС с PWR (линейный масштаб 1:4) объемом 1300 м³ (высота 17.4 м, внутренний диаметр 10.8 м). Внутреннее пространство защитной оболочки (контейнмента) разделено на 25 помещений, моделирующих внутренние помещения контейнмента-прототипа.

В таблице 3 приведены основные геометрические характеристики внутренних помещений модели контейнмента.

На данном экспериментальном стенде был проведен ряд интегральных экспериментов. В отличие от экспериментов на стенде HDR [18] на стенде NUPEC моделировалось функционирование спринклерной системы в контейнменте. Для верификации кода SIMCO был использован эксперимент M-7-1 (перемешивание и распределение водорода в защитной оболочке, функционирование спринклерной системы). Данный эксперимент был использован в качестве международной стандартной задачи ISP-35. В качестве имитатора водорода в целях безопасности использовался гелий. Целью эксперимента являлось изучение распределения гелия в защитной оболочке при функционировании спринклерной системы. Основными факторами, влияющими на распределение легкого компонента (гелия), были естественная конвекция и функционирование спринклерной системы.

Необходимые начальные условия в помещениях модели защитной оболочки (1.4 бар, 70°C) обеспечивались предварительным прогревом за счет подачи пара в течение 3.5 часов. Подача смеси пара и гелия во время эксперимента осуществлялась с линейным изменением расхода компонентов. Расход пара уменьшался от 0.08 до 0.03 кг/с за время впрыска, составляющее 30 минут. Расход гелия за это же время возрастал от нуля до максимума (0.03 кг/с) и вновь уменьшался до нуля. Расход подаваемой спринклерной воды выдерживался постоянным в течение 30 мин и составлял 19.4 кг/с.

Согласно [17], для сравнения доступны

- давление в экспериментальном стенде;
- две точки по температуре парогазовой смеси;
- две точки по локальным концентрациям легкого компонента (гелий).

Несмотря на то, что начальные условия в модели защитной оболочки, установленные в результате предварительного прогрева, содержат ряд неопределенностей,

возможно верифицировать код по доступным экспериментальным данным.

Таблица 3

Характеристики внутренних помещений

Поперечное сечение, м ²	Объем, м ³	Отметка пола, м	Высота, м
4.54	5.95	2.097	3.316
6.76	14.95	3.200	2.213
13.06	28.91	3.200	2.213
14.84	32.84	3.200	2.213
14.84	32.84	3.200	2.213
13.06	28.91	3.200	2.213
4.88	10.80	3.200	2.213
5.72	12.66	3.200	2.213
1.46	3.74	3.200	2.563
5.72	12.66	3.200	2.213
4.88	10.80	3.200	2.213
28.10	53.05	5.425	1.888
28.10	53.05	5.425	1.888
4.88	9.22	5.425	1.888
5.72	10.80	5.425	1.888
1.46	2.14	5.775	1.463
5.72	10.80	5.425	1.888
4.88	9.22	5.425	1.888
12.70	24.14	5.425	1.900
1.465	2.01	7.325	1.371
1.47	2.016	7.325	1.371
1.46	5.44	7.250	3.725
1.47	2.016	7.325	1.371
1.465	2.01	7.325	1.371
91.8	931.3	7.325	12.1175
Всего	1312.272		

Помещение с течью пара и гелия моделировалось двумя расчетными боксами.

Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных зависимостей термодинамических параметров атмосферы в помещениях контейнента стенда (давление, температура и концентрация гелия как имитатора водорода) приведены на рис. 5 – 7.

Максимальные расхождения расчетных и экспериментальных данных для давления и температуры газовой смеси наблюдаются на стадии отключения спринклерной системы. Аналогичные результаты для этого периода эксперимента получены при расчетах по другим контейментным кодам [17] в рамках международной стандартной задачи ISP-35. Возможно, истинный сценарий проведения эксперимента несколько отличался от описываемого в [17] на стадии отключения спринклерной системы.

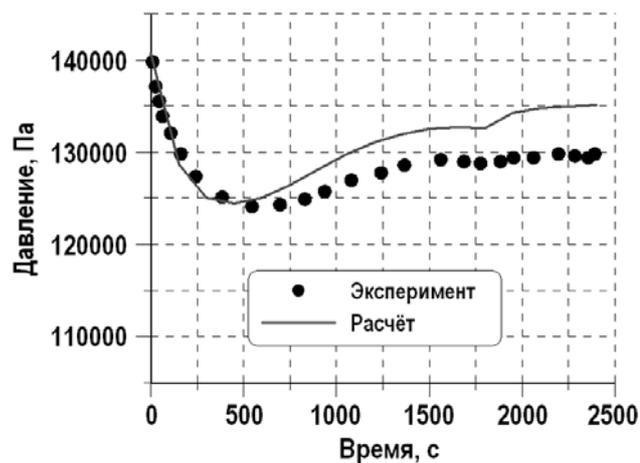


Рис. 5. Динамика давления в эксперименте М-7-1

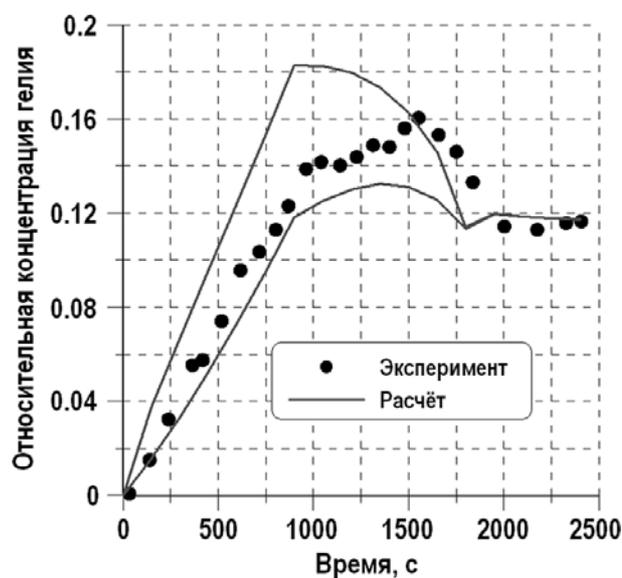


Рис. 6. Динамика концентрации гелия в боксе истечения в эксперименте М-7-1

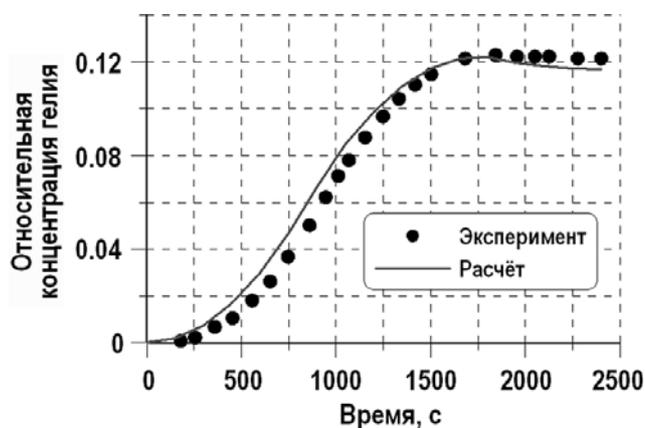


Рис. 7. Динамика концентрации гелия в подкуольном пространстве в эксперименте М-7-1

Расчетные данные по концентрации легкого компонента (гелия) хорошо согласуются с экспериментальными данными. Максимальная погрешность не превышает 15% в боксе истечения. Необходимо учитывать, что это локальная характеристика, – помещение с течью гелия моделируется двумя расчетными боксами. В подкупольном пространстве погрешность расчета концентрации гелия не превышает 10%. Максимальная погрешность в определении давления (интегральная характеристика) до начала функционирования спринклерной системы составляет ~ 5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ООО ЭНИМЦ «Моделирующие Системы» разработана версия кода SIMCO ver. 1.0. На основании проведенных тестовых и верификационных расчетов можно сделать вывод, что физико-математические модели кода достаточно адекватно описывают процессы тепломассопереноса в защитной оболочке. Представленная версия кода SIMCO может быть использована для анализа совокупности теплофизических и физико-химических процессов в объектах атомной энергетики, имеющих защитные оболочки.

Литература

1. International Atomic Energy Agency (IAEA), Mitigation of hydrogen hazards in water cooled power reactors. IAEA-TECDOC-1196. – Vienna, 2001. – 42 p.
2. Кириллов И.А., Харитонов Н.Л., Шарафутдинов Р.Б., Хренников Н.Н. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Современное состояние проблемы // Ядерная и радиационная безопасность. – 2017. – №2(84). – С. 26-37.
3. Shapiro Z.M., Moffette T.R., Hydrogen Flammability Data and Application to PWR LOCA, WAPD-SC-545, Westinghouse Electric Corp. – Bettis Plant, Pittsburgh, 1957. – 23 p.
4. Солдатов Г.Е., Голоднова О.С. О путях снижения риска пожаров в машинных залах АЭС // Атомкон. – 2009. – №2(3). – С. 42-46.
5. Зайцев А.А. Теплогидравлическое обоснование защитных оболочек АЭС с ВВЭР. / Автореф. дис. канд. техн. наук. – Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2005. – 10 с.
6. Левченко В.А. Моделирование динамических процессов энергоблоков АЭС в режиме реального времени. / Автореф. дис. канд. техн. наук. – Обнинск: ОГТУАЭ, 2007. – 21 с.
7. Gauntt R.O., Cole R.K., Erickson C.M., MELCOR Computer Code Manuals, NUREG/CR-6119, SAND2001-0929P. – Sandia National Labs, Albuquerque, NM 87185-0739, 2001. – 231 p.
8. Murata K.K. Code Manual for CONTAIN 2.0: A Computer Code for Nuclear Reactor Containment Analysis, Rep. NUREG/CR-6533, Rep. SAND97-1735, Sandia Natl Labs, NM, 1997. – 388 p.
9. Povilaitis M., Kacegavicius T., and Urbonavicius E. Simulation of the ICE P1 test for a validation of COCOSYS and ASTEC codes. // Fusion Engineering and Design. – 2015. – Vol. 94. – No. 1. – PP. 42-47.
10. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
11. Launder R.E. Heat and Mass Transport Turbulence. Topics in Applied Physics. – Berlin: Springer, 1976. – 232p.
12. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 592 с.
13. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. – Томск: Изд-во ТГУ, 2001. – 448 с.
14. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Изд. 4-е, стереотипное. – М.: Наука, 1988. – 736 с.
15. Код КУПОЛ-М. Версия 1.10. Описание программы. Отчет ГУП ТЦ ФЭИ, инв. № 82022/4, 2002. – 42 с.

16. *Gupta S., Schmidt E., von Laufenberg B., Freitag M., Poss G., Funke F., Weber G.*, THAI test facility for experimental research on hydrogen and fission product behavior in light water reactor containments // Nuclear Engineering and Design. – 2015. – Vol. 294. – PP. 183-201.

17. NUPEC Hydrogen Mixing and Distribution Test (Test M-7-1), Final Comparison Report on ISP-35, NEA/CSNI/R(94)29, December 1994. – 109 p.

18. *Valencia L., Schrammel D., Cron T., Wolf L.* Design Report, Hydrogen Distribution Experiments E11.1-E11.5, PHDR Working Report No. 10.004/89, August 1992. – 95 p.

Поступила в редакцию 15.02.2018 г.

Авторы

Доровских Вячеслав Иванович, начальник отдела тренажеростроения

E-mail: dorovskikh@ssl.obninsk.ru

Дорохович Сергей Леонидович, главный инженер, канд. техн. наук

E-mail: SDorohovich@ssl.obninsk.ru

Зайцев Алексей Александрович, старший научный сотрудник, канд. техн. наук

E-mail: AlexeyZaycev@ssl.obninsk.ru

Левченко Валерий Алексеевич, директор, канд. техн. наук

E-mail: lev@ssl.obninsk.ru

Леонов Игорь Николаевич, зав. лабораторией разработки тренажеров

E-mail: leonov@ssl.obninsk.ru

UDC 621.039.584

THE SIMCO CONTAINMENT CODE APPLIED TO MODELING HYDROGEN DISTRIBUTION IN CONTAINMENTS OF NUCLEAR POWER FACILITIES

Dorovskikh V.I., Dorokhovich S.L., Zaitsev A.A., Levchenko V.A., Leonov I.N.

Experimental Scientific Research and Methodology Center

«Simulation Systems» (SSL)

133, Lenin str., Obninsk, Kaluga reg., 249035 Russia

ABSTRACT

The general description of the SIMCO code developed for modeling of thermo-hydraulic and physical and chemical processes in the containment is submitted. The calculation procedure on the basis of physical and mathematical model in the lumped parameters is presented. Lumped parameters codes are based on the fundamental assumption that within a chosen volume, called a control volume, spatial differences of thermohydraulic variables – like fluid density, concentration and temperature – are neglected. While only the time-dependent behaviour is represented in conservation equations that describe containment transport processes. As a numerical method the modified semi-implicit SIMPLER procedure is used. Testing of a code on the basis of analytical and qualitative tests is held. A good agreement of calculation and analytical solution is obtained for the analytical test.

Verification of a code on the experimental data obtained at the NUPEC installation (Japan) is executed. ISP-35 – hydrogen mixing and distribution test M-7-1, performed

by Nuclear Power Engineering Corporation (NUPEC, Japan). NUPEC's hydrogen mixing and distribution test, M-7-1, was conducted as a part of the Proving Test on the Reliability for Reactor Containment Vessel Project. The NUPEC model containment at the Tadotsu Engineering Laboratory consists of a one-quarter linearly scaled PWR dry, insulated steel containment vessel with a free volume of 1300 m³. The purpose of the hydrogen mixing and distribution test, part of the program to evaluate containment integrity, was to investigate hydrogen distribution phenomena in a model containment and to validate analysis codes.

By results of testing and verification it is possible to draw a conclusion that in general physical and mathematical models of a code rather adequately describe processes of a heat-mass transfer in protective shells. In this regard this version of the SIMCO code can be used for the analysis of set of thermo-physical and chemical processes in the containments and protective shells of nuclear power facilities, including steam-air-hydrogen mixtures distribution.

Key words: SIMCO code, lumped parameter model, analytical test, verification, hydrogen distribution.

REFERENCES

1. International Atomic Energy Agency (IAEA), Mitigation of hydrogen hazards in water cooled power reactors, IAEA-TECDOC-1196. Vienna, 2001, 42 p.
2. Kirillov I.A., Kharitonova N.L., Sharafutdinov R.B., Khrennikov N.N. Hydrogen safety for nuclear power plants with light water reactor units. Current state of the problem. *Yadernaja i radiatsionnaja bezopasnost'*. 2017, no. 2(84), pp. 26-37 (in Russian).
3. Shapiro Z.M., Moffette T.R. Hydrogen Flammability Data and Application to PWR LOCA, WAPD-SC-545, Westinghouse Electric Corp. – Bettis Plant, Pittsburgh, 1957. 23 p.
4. Soldatov G.E., Golodnova O.S. On ways to reduce the risk of fires in turbine halls of nuclear power plants. *Atomcon*. 2009, no. (3), pp. 42-46 (in Russian).
5. Zaitsev A.A. *Thermohydraulic substantiation of NPP containments with VVER*. Autoref. Cand. tech. sci. diss. Obninsk, SSCRFIPPE, 2005, 10 p. (in Russian).
6. Levchenko V.A. *Real-time modeling of dynamic processes of NPP power units*. Autoref. Cand. tech. sci. diss. Obninsk, IATE, 2007, 21 p. (in Russian).
7. Gauntt R.O., Cole R.K., Erickson C.M. MELCOR Computer Code Manuals, NUREG/CR-6119, SAND2001-0929P. Sandia National Labs, Albuquerque, NM 87185-0739, 2001, 231 p.
8. Murata K.K. Code Manual for CONTAIN 2.0: A Computer Code for Nuclear Reactor Containment Analysis, Rep. NUREG/CR-6533, Rep. SAND97-1735, Sandia Natl Labs, NM, 1997, 388 p.
9. Povilaitis M., Kacegavicius T., and Urbonavicius E. Simulation of the ICE P1 test for a validation of COCOSYS and ASTEC codes. *Fusion Engineering and Design*, 2015, v. 94, no. 1, pp. 42-47.
10. Patankar S. *Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1984. – 152 p. (in Russian).
11. Launder R.E. *Heat and Mass Transport Turbulence. Topics in Applied Physics*. Berlin: Springer, 1976, 232p.
12. Samarskij A.A., Nikolaev E.S. *Methods for solving grid equations*. Moscow. Nauka Publ., 1978, 592 p. (in Russian).
13. Bubenchikov A.M., Kharlamov S.N. *Mathematical models of inhomogeneous anisotropic turbulence in internal flows*. Tomsk. TSU Publ., 2001, 448 p. (in Russian).
14. Landau L.D., Lifshits E.M. *Hydrodynamics*. Moscow. Nauka Publ., 1988, 736 p. (in Russian).
15. KUPOL-M code. Ver. 1.10. Program description. Report № 82022/4. Obninsk, FEI Publ., 2002. 42 p. (in Russian).

16. Gupta S., Schmidt E., von Laufenberg B., Freitag M., Poss G., Funke F., Weber G. THAI test facility for experimental research on hydrogen and fission product behavior in light water reactor containments. *Nuclear Engineering and Design*. 2015, v. 294, pp. 183-201.

17. NUPEC Hydrogen Mixing and Distribution Test (Test M-7-1), Final Comparison Report on ISP-35, NEA/CSNI/R(94)29, December 1994. 109 p.

18. Valencia L., Schrammel D., Cron T., Wolf L. Design Report, Hydrogen Distribution Experiments E11.1-E11.5, PHDR Working Report No. 10.004/89, August 1992, 95 p.

Authors

Dorovskikh Vyacheslav Ivanovich, Head of Department

E-mail: dorovskikh@ssl.obninsk.ru

Dorokhovich Sergey Leonidovich, Chief Engineer, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: SDorohovich@ssl.obninsk.ru

Zajtsev Aleksey Aleksandrovich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: AlexeyZaycev@ssl.obninsk.ru

Levchenko Valery Alekseevich, Director, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: lev@ssl.obninsk.ru

Leonov Igor' Nikolaevich, Head of Laboratory

E-mail: leonov@ssl.obninsk.ru