

3. ПНАЭГ 7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.
4. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. С изменениями и дополнениями. – Киев, 1998.
5. Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды. С изменениями и дополнениями. – Киев, 2007.

Надійшла до редакції 19.07.2013 р.

УДК 532.292.004.415.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕТОКА ЖИДКОСТИ МЕЖДУ ЕМКОСТЯМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОМЕРНЫХ КОДОВ

А.А. Чуклин, Д.В. Шевелев, к.т.н.

*Севастопольская служба научно-технической поддержки,
ОП НТЦ НАЭК «Энергоатом»*

Показана возможность физически корректного моделирования процессов тепломассопереноса в однофазных средах с помощью одномерных компьютерных кодов, широко используемых для моделирования процессов, протекающих на АЭС. Определен диапазон наиболее предпочтительных параметров для задания коэффициента сопротивления при моделировании перетока жидкости между емкостями.

Введение

Для моделирования процессов, протекающих на АЭС, широко используются одномерные компьютерные коды RELAP, MELCOR и другие, которым наряду с их достоинствами присущи некоторые недостатки. Существенной проблемой, возникающей при моделировании нестационарных процессов тепломассообмена и гидродинамики, является учет рециркуляции, влияющей на их динамику. Для создания квазитрехмерных моделей приходится прибегать к более детальной нодализации моделируемых элементов. Одной из задач, стоящих перед разработчиком компьютерной модели энергоустановки, является как выбор «правильного» количества элементов нодализационной схемы, так и задание «корректных» параметров, вводимых в модель элементов.

Данная тематика является весьма актуальной, так как программа по моделированию энергоустановок с помощью кода Melcor была принята к использованию для АЭС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 в рамках региональных проектов МАГАТЭ RER/9/004 и RER/9/020. В Украине решение о начале работ по тяжелым авариям, для анализа которых используются компьютерные коды, было принято в конце декабря 2008 г.

Анализ литературы показал, что, несмотря на широкое применение компьютерных кодов для анализа тяжелых аварий АЭС [1, 2], не уделяется достаточного внимания научному обоснованию оптимальности разбивки нодализационных схем энергоустановок и задания их исходных данных.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данного исследования является разработка методики по определению диапазона наиболее предпочтительных параметров для задания коэффициента сопротивления при моделировании объемов, в которых присутствует рециркуляция.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать экспериментальный стенд и проанализировать полученные с его помощью результаты.

2. Создать математическую модель рассматриваемого стенда с использованием системы дифференциальных уравнений. Проанализировать результаты, полученные с использованием математической модели.

3. Создать компьютерную модель рассматриваемого стенда с использованием кода MELCOR. Проанализировать результаты, полученные с использованием компьютерной модели.

4. Произвести сравнительный анализ результатов стендового эксперимента с результатами расчетного эксперимента, выполненного с использованием системы дифференциальных уравнений, а также с результатами расчетного эксперимента, выполненного с использованием компьютерного кода MELCOR. Сделать соответствующие выводы относительно коэффициента сопротивления, используемого в качестве исходных данных в коде MELCOR.

Анализ эксперимента, произведенного с использованием разработанного стенда

Рассматриваемый в данной работе компьютерный код Melcor является одномерным с «сосредоточенными» параметрами. Параметры по всему моделируемому контрольному объему эквивалентны друг другу. Этот факт значительно усложняет моделирование трехмерных систем. Существенной проблемой, возникающей при моделировании неодномерных процессов теплообмена и гидродинамики, является учет рециркуляции, влияющей на их динамику. Рециркуляция в объемах происходит в связи с возникновением конвективного перемешивания. Конвекция – это явление переноса теплоты в жидкостях или газах, или сыпучих средах потоками вещества за счет переноса массы. Естественная конвекция возникает в веществе самопроизвольно при его неравномерном по объему нагревании в поле тяготения.

Для создания квазитрехмерных моделей приходится прибегать к более детальной нодализации моделируемых элементов. Одной из задач, стоящих перед разработчиком компьютерной модели энергоустановки, является выбор «правильного» количества элементов нодализационной схемы и задание «корректных» параметров, вводимых в модель элементов.

В качестве примера наличия перетока между участками объема приводится компенсатор давления (КД), в котором в силу конструктивных особенностей возникает естественная конвекция теплоносителя (включение-отключение трубчатых электронагревателей; включение-отключение «холодного» впрыска; движение теплоносителя в дыхательном трубопроводе и, как следствие, изменение параметров внутри КД).

Нодализационная схема компенсатора давления, способная учесть рециркуляцию, должна состоять как минимум из четырех контрольных объемов, один из которых моделирует верхнюю часть КД с парогазовой смесью (рис. 1).

Контрольный объем CV1 моделирует паровой объем компенсатора давления. Объем КД, заполненный водой, представлен тремя контрольными объемами CV2, CV3 и CV4. Данная разбивка применяется для учета рециркуляции, вызванной естественной конвекцией теплоносителя в полости компенсатора давления.

Для создания рассматриваемой компьютерной модели необходимо задать целый ряд различных параметров. Для каждого из контрольных объемов такими параметрами являются:

- нижняя и верхняя повысотная отметка;
- площадь проходного сечения;
- давление;
- температура;
- количество воды, находящееся в контрольном объеме;
- скорость движения газа;
- скорость движения жидкости и др.

Также необходимо задать ряд параметров для путей соединения:

- повысотная отметка начала пути течения;
- повысотная отметка конца соединения;
- коэффициент сопротивления;
- площадь проходного сечения;
- длина соединения;
- степень открытия соединения;
- скорость газа;
- скорость воды;
- гидравлический диаметр и т.д.

Большинство из представленных параметров можно однозначно определить, используя техническую документацию, описывающую конструкционные особенности моделируемого объекта [3, 4]. Также присутствуют параметры, которые необходимо высчитать, исходя из особенностей оборудования, режимов его использования и т.д.

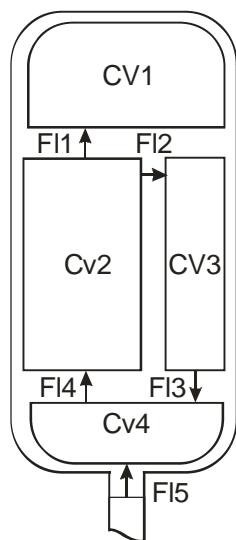


Рис. 1. Нодализация схема компенсатора давления

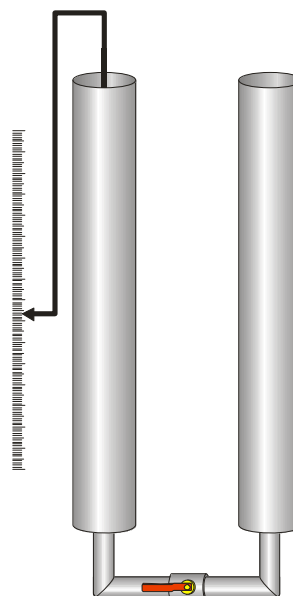


Рис. 2. Схема экспериментального стенда

Одним из таких параметров является коэффициент сопротивления. Данный параметр является весьма важным, так как он влияет как на устойчивость системы, так и на корректность учета рециркуляции.

Возможные негативные последствия, которые могут возникнуть при некорректном определении коэффициента сопротивления:

– при задании коэффициента сопротивления ниже оптимального диапазона возрастает вероятность возбуждения колебаний, которые могут привести к неустойчивости системы;

– при задании коэффициента сопротивления выше оптимального диапазона возникает вероятность замедления рециркуляции, что приведет к некорректности результатов, с точки зрения теплогидравлики.

При задании коэффициента сопротивления в пределах допустимого диапазона в рассматриваемом объеме будет присутствовать рециркуляция с параметрами, близкими к реальной установке. Также система будет устойчива, то есть после незначительных затухающих колебаний система придет к равновесному состоянию.

Для решения поставленной задачи создан стенд, который представляет собой сообщающиеся сосуды, подобно контрольным объемам CV2, CV3 (два вертикальных «сосуда») и CV4 (соединительная «труба»), представленным на рис. 1.

Исследуются затухающие колебания рассматриваемой системы при введении в нее неравновесия (задание разного уровня в емкостях).

Характеристики созданного стенда (рис. 2):

- внутренний диаметр емкостей – 0,1 м;
- высота емкостей – 1,1 м;
- диаметр соединительного трубопровода – 0,021 м;
- длина соединительного трубопровода – 0,56 м;
- диаметр проходного сечения клапана – 0,025 м.

Измерительными средствами на используемом стенде являются поплавковый измеритель уровня жидкости, соединенный с измерительной шкалой; секундомер, используемый для отслеживания хронологии протекания эксперимента.

В качестве начального состояния устанавливаются уровни в емкостях 0,1 м и 0,9 м, соответственно.

Далее происходит открытие соединительного клапана. Усредненные данные произведенных экспериментов изображены в графической форме на рис. 3.

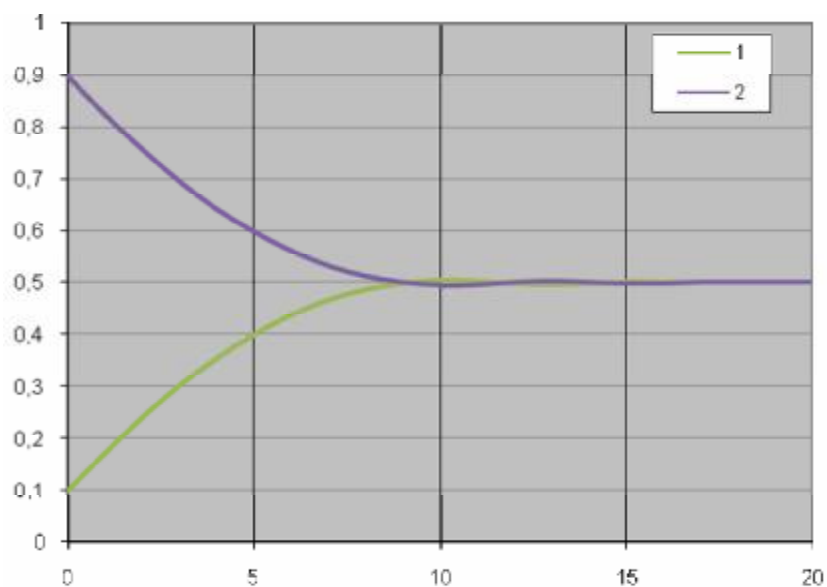


Рис. 3. Изменение уровня жидкости в емкостях экспериментального стенда: 1 – уровень в емкости 1; 2 – уровень в емкости 2

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что при начальных уровнях в емкостях 0,1 и 0,9 м, соответственно, максимальная амплитуда колебания уровня жидкости составляет 5 мм (относительно отметки 0,5 м); установление уровня происходит за время, равное 17 с.

Анализ эксперимента, произведенного с использованием системы дифференциальных уравнений

Для проведения расчетного эксперимента создается математическая модель установки, схема которой представлена на рис. 4. Математическая модель составляется на основе дифференциальных уравнений и будет решена методом Рунге-Куты-Фельберга с использованием программы, созданной на языке программирования Delphi.

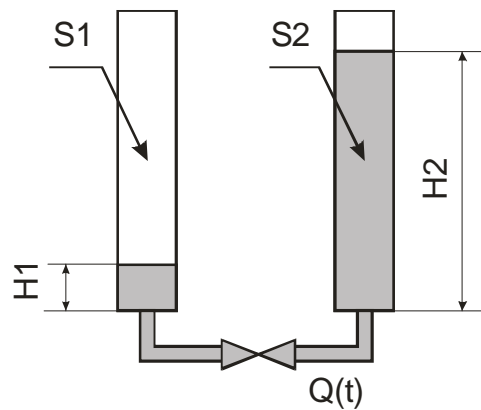


Рис. 4. Схема экспериментальной установки, заполненной водой: S_1, S_2 – площадь емкости 1 и 2, соответственно; $Q(t)$ – объемный расход воды, перемещающийся между емкостями; H_1, H_2 – отметка уровня воды в емкости 1 и 2 в начальный момент времени

Для емкости 1 изменение уровня воды H_1 описывается уравнением баланса

$$S_1 \cdot \frac{dH_1}{dt} = Q(t), \quad (1)$$

где H_1 – высота уровня воды в емкости 1, м вод. ст.;

S_1 – площадь зеркала воды в емкости 1, м^2 ;

Q_j – объемный расход воды, поступающий в емкость или уходящий из нее, $\text{м}^3/\text{с}$.

Для емкости 2 изменение уровня воды H_2 описывается уравнением баланса

$$S_2 \cdot \frac{dH_2}{dt} = -Q(t), \quad (2)$$

Для определения изменения $Q(t)$ запишем уравнение Бернулли для потока воды в виде [5, 6, 7]

$$H_2 - H_1 = z \frac{|w|w}{2g} + \frac{L}{g} \frac{dw}{dt}, \quad (3)$$

где w – скорость воды в соединительном трубопроводе;

L – длина соединительного трубопровода, м;

t – время, с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

ζ – коэффициент гидропотерь, определяющийся по формуле

$$z = \sum_j z_j + I \frac{L}{d}, \quad (4)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления трению, определяющийся с помощью числа Рейнольдса (Re).

Для труб круглого сечения $Re_{кр}$ примерно равно 2300. Таким образом, критерий подобия Рейнольдса позволяет судить о режиме течения жидкости в трубе. При $Re < Re_{кр}$ течение является ламинарным, а при $Re > Re_{кр}$ течение является турбулентным. Точнее говоря, вполне развитое турбулентное течение в трубах устанавливается лишь при Re примерно равном 4000, а при $Re = 2300 \dots 4000$ имеет место переходная, критическая область. В рассматриваемом соединительном трубопроводе совершается преимущественно турбулентное течение жидкости. В этом случае коэффициент гидравлического сопротивления трению определяется по формуле А.Д. Альтулы:

$$I = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}, \quad (5)$$

где Δ – абсолютная шероховатость;

d – внутренний диаметр трубы.

Выразим расход жидкости через соединительный трубопровод через скорость воды в соединительном трубопроводе:

$$Q = w \cdot S_{тр} \quad (6)$$

Тогда выражение (3) примет вид

$$H_2 - H_1 = z \frac{|Q|Q}{2gS_{тр}^2} + \frac{L}{gS_{тр}} \frac{dQ}{dt} \quad (7)$$

Из рассмотренного уравнения выразим расход:

$$\frac{dQ}{dt} = \left(H_1 - H_2 - z \frac{|Q|Q}{2gS_{тр}^2} \right) \frac{gS_{тр}}{L} \quad (8)$$

Полученные уравнения (1), (2) и (8) сгруппируем в систему уравнений, имеющую вид

$$\left. \begin{aligned} S_1 \cdot \frac{dH_1}{dt} &= Q(t) \\ S_2 \cdot \frac{dH_2}{dt} &= Q(t) \\ \frac{dQ}{dt} &= \left(H_1 - H_2 - z \frac{|Q|Q}{2gS_{тр}^2} \right) \frac{gS_{тр}}{L} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В созданную систему дифференциальных уравнений подставляются исходные данные, соответствующие реальным параметрам используемого стенда.

Для решения составленных дифференциальных уравнений использовался метод Рунге-Куты-Фельберга. Это позволило избежать осцилляций, так как в самом методе заложен автоматический выбор шага. В каждой точке аргумента (времени) делается двойной просчет значения функции, сначала с полным шагом, затем с половиной шага. Если полученные при этом значения функции различаются в пределах допустимой точности, то шаг для следующей точки удваиваем, иначе берем половинный шаг [8 – 10]. Для решения уравнений методом Рунге-Куты-Фельберга была создана программа с использованием языка программирования Delphi. Решение системы уравнений (9) изображено на рис. 5.

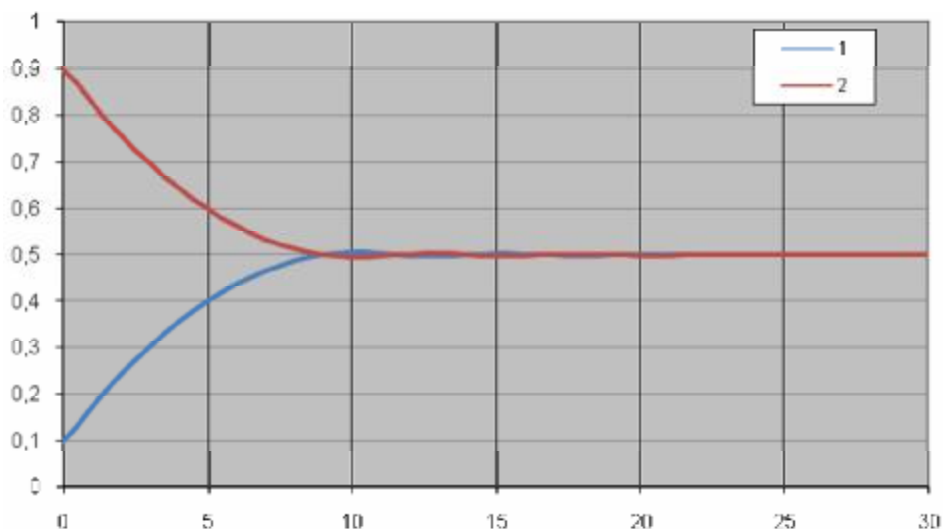


Рис. 5. Решение системы уравнений(9): 1 – уровень жидкости в емкости 1; 2 – уровень жидкости в емкости 2

Из решения системы уравнений следует, что переходный процесс получается колебательный, затухающий. Первый всплеск уровня является наибольшим и составляет 5,8 мм (момент времени – 9,8 с). Затухание колебаний происходит примерно на 18-й секунде.

Произведя сравнения результатов эксперимента на реальном стенде с результатами расчета математической модели, можно сделать вывод, что результаты достаточно хорошо сопоставимы. Рассогласование в значении максимальной амплитуды составляет 0,7 мм. Также рассогласование имеет место в моменте времени, в который происходит установление уровня в емкостях (реальный стенд – 17-я секунда, математическая модель – 18-я секунда). Эти рассогласования могут быть обусловлены как погрешностью измерительной шкалы реального стенда, так и использованием уровнемера поплавкового типа, который оказывал «тормозящее» воздействие на систему.

Анализ эксперимента, произведенного с использованием кода MELCOR

Модель экспериментального стенда, созданная с помощью кода MELCOR, состоит из семи контрольных объемов и семи путей соединения (рис. 6). В рассматриваемую модель подставляются исходные данные соответствующие реальным параметрам используемого стенда.

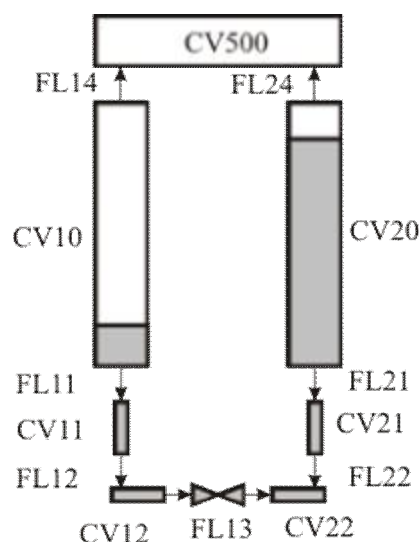


Рис. 6. Нодализация схема установки

Описание модели, созданной с использованием кода MELCOR.

Контрольные объемы CV10 и CV20 представляют собой вертикальные объемы, моделирующие первую и вторую емкости соответственно. Рассматриваемые контрольные объемы имеют следующие параметры:

- высота контрольного объема, м.....1,1;
- площадь сечения, м^20,00785;
- объем, м^30,0086;
- первоначальное заполнение CV10, м.....0,1;
- первоначальное заполнение CV20, м.....0,9.

Контрольные объемы CV11 и CV21 представляют собой вертикальные объемы, моделирующие вертикальные участки соединительных трубопроводов первой и второй емкости, соответственно. Площадь проходного сечения моделируемого трубопровода составляет $0,000346 \text{ м}^2$.

Контрольные объемы CV12 и CV22 представляют собой горизонтальные объемы, моделирующие горизонтальные участки соединительных трубопроводов первой и второй емкости соответственно. Площадь проходного сечения моделируемого трубопровода составляет $0,000346 \text{ м}^2$.

Контрольный объем 500, моделирует окружающую среду.

Коэффициенты сопротивления участков установки рассчитываются в соответствии со справочником [11] и составляют:

- для поворотного участка – 0,237;
- для участка с резким увеличением диаметра трубопровода – 1,51;
- для участка с резким уменьшением диаметра трубопровода – 0,85.

Ряд расчетов показал, что использование в качестве исходных данных коэффициента сопротивления большего или меньшего значений приводит к отклонению результата от физически корректного (изменяются амплитуда и время затухания процесса).

Результаты расчетного эксперимента, произведенного с использованием компьютерного кода MELCOR, приведены на рис. 7.

Хронология изменения параметров установки, полученных экспериментальным путем, путем расчета системы дифференциальных уравнений, а также полученных при моделировании компьютерным кодом MELCOR, сведены в таблице.

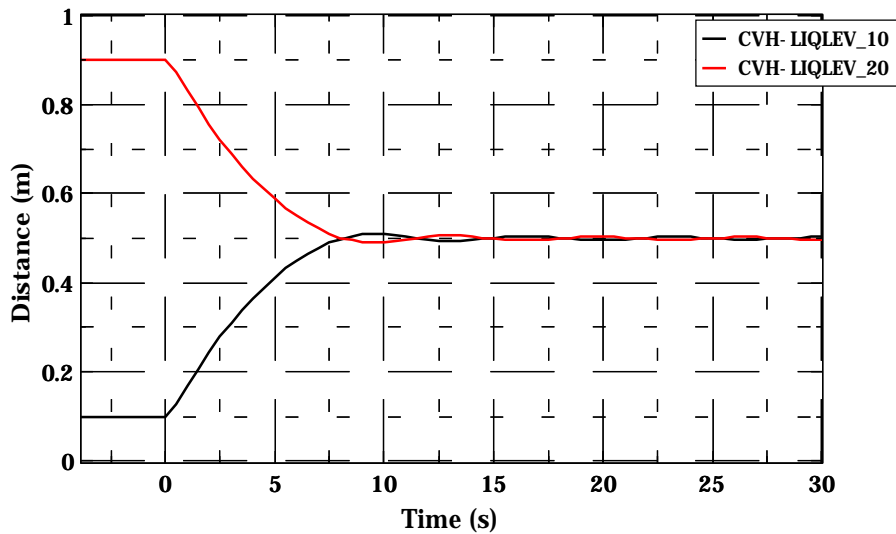


Рис. 7. Уровень жидкости в емкости: CVH-LIQLEV_10 – в контрольном объеме CV010; CVH-LIQLEV_20 – в контрольном объеме CV020

Т а б л и ц а

Результаты экспериментов и расчетов

Наименование параметра	Стендовый эксперимент	Математическая модель (программа FlexPde)	Компьютерная модель (код MELCOR)
Максимальная амплитуда, мм	5,1	5,8	5,9
Время достижения максимальной амплитуды, с	10,0	9,8	9,0
Время установления уровня, с	17	18	17

Проведя сравнение результатов, можно сделать вывод, что они достаточно хорошо сопоставимы. Некоторые рассогласования могут возникать в силу неточности заданных граничных условий расчетов, использования различных подходов для реализации расчета, а также в результате погрешности измерительных приборов стендовой установки.

Выводы

Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод, что моделирование пространственных систем с перетоками сред внутри объема (к примеру, конвективное перемешивание) с использованием одномерных кодов вполне допустимо и при правильной нодализации корректных входных данных дает физически корректные результаты. При моделировании рассматриваемого в данной статье процесса следует использовать коэффициенты сопротивления, соответствующие реальным значениям сопротивления. Эти значения могут быть рассчитаны, к примеру, с использованием справочника [11]. В случае моделирования конвекции, при задании коэффициентов сопротивления следует, несмотря на отсутствие «жестких» границ потоков, принимать коэффициенты сопротивления, находящиеся в пределах 0,6...0,1. Задание меньшего коэффициента не вносит значимых изменений в скорости потоков. Задание большего коэффициента сопротивления достаточно резко снижает скорость движения жидкости в объемах, что приводит к получению физически недостоверных результатов.

**МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕТІКАННЯ РІДИНИ МІЖ ВМІСТИЛИЩАМИ
З ВИКОРИСТАННЯМ ОДНОМІРНИХ КОДІВ****О.О. Чуклін, Д.В. Шевельов**

Показана можливість фізично коректного моделювання процесів тепломасопереносу в однофазних середовищах за допомогою одновимірних комп'ютерних кодів, які широко використовуються для моделювання перебігу процесів на АЕС. Визначено діапазон найкращих параметрів для задання коефіцієнта опору при моделюванні перетікання рідини між вмістилищами.

**MODELLING of FLUID FLOW between CONTAINERS USING
the ONE-DIMENSIONAL CODES****O. Chuklin, D. Shevielov**

It was demonstrated the possibility of physically correct modelling of heat-and-mass transfer in single-phase media by means of one-dimensional computer codes widely used for modelling of NPP' processes behaviour. The most applicable options range for the drag coefficient at the modelling of fluid flow between the containers was determined.

Список использованных источников

1. Анализ уязвимости энергоблока № 1 ЮУАЭС в условиях тяжелых аварий. Описание расчетной модели для кода MELCOR и результатов расчетов для отобранного перечня тяжелых аварий. Южно-Украинская АЭС. Энергоблок № 1 / ООО «ЭНЕРГОРИСК». - ЕР4-2010.200.ОД.1. - К., 2011. - 267 с.
2. Разработка и валидация модели RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 для анализа тяжелых аварий энергоблока № 1 ЮУАЭС. Приложение Б. Выполнение сравнительных расчетов RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4. / Национальная атомная энергогенерирующая компания "Энергоатом". - 2011. - 150 с.
3. MELCOR Computer Code Manuals. Reference Manuals. Version 1.8.5 October 2000. - NUREG/CR-6119. - Vol. 1. - Rev. 2 SAND2000-2417/1 / Sandia National Laboratories. - Albuquerque. - NM 87185-0739.
4. Nureg/Cr-6119, Sand2000-2417/1, Melcor Computer Code Manuals Version 1.8.5.
5. *Лятхер В.М.* Гидравлическое моделирование / В.М. Лятхер, А.М. Прудовский. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 392 с.
6. Справочник по гидравлике / В.А. Большаков, Ю.М. Константинов, В.Н. Попов, В.Ю. Даденков; под. общ. ред. В.А. Большакова. - К.: Вища школа, 1977. - 280 с.
7. *Бэтчелор Дж.* Введение в динамику жидкости / Дж. Бэтчелор.; пер. с англ. В.П. Вахомчика, А.С. Попова. - М.: Мир, 1973. - 758 с.
8. *Носач В.В.* Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров / В.В. Носач. - М.: МИКАП, 1994. - 382 с.
9. *Джеймсон Э.* Численные методы в динамике жидкостей / Э. Джеймсон, Т. Мюллер, У. Боллхауз; пер. с англ. под ред. О.М. Белоцерковского, В.П. Шидловского. - М.: Мир, 1981. - 407 с.
10. *Форсайт Малькольн.* Машинные методы математических вычислений / Малькольн Форсайт. - М.: Наука, 1976. - 312 с.
11. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик; под ред. М.О. Штейнберга. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1992. - 672 с.

Надійшла до редакції 04.09.2013 р.