

АННОТАЦИЯ ПРОГРАММЫ PPRKRS

М.В. Кащеев

ГНЦ РФ- Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Приводится краткая информация о программе расчета взаимодействия кориума с внутрикорпусными устройствами (ВКУ) и корпусом реактора ВВЭР при тяжелой аварии. Программа дает возможность прогнозировать разрушение корпуса реактора с учетом стратификации компонент кориума.

НАЗВАНИЕ ПРОГРАММЫ

PPRKRS

ЭВМ

PC/AT-486, PENTIUM

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Код PPRKRS (программа прогнозирования разрушения корпуса реактора с учетом стратификации компонент кориума) является развитием кода ВРКР [1,2]. Он разработан на базе кода ВРКР и основан на гетерогенной математической модели взаимодействия кориума с корпусом реактора [3]. Код PPRKRS может быть легко модифицирован применительно к решению конкретной практической задачи и использован для анализа взаимодействия кориума с ВКУ и корпусом реактора ВВЭР с учетом его особенностей, расчетного исследования возможности удержания кориума в корпусе реактора ВВЭР и ловушки, анализа прочностного состояния корпуса, расчета ловушек. Кроме того, при незначительных изменениях код применим для анализа тяжелых аварий на АС с корпусными водо-водяными реакторами и РБН.

С помощью кода PPRKRS могут быть получены следующие результаты: поля скорости, температуры, давления и концентраций, зависимость толщины проплавления корпуса от интенсивности охлаждения наружной поверхности, временное поведение толщины проплавления корпуса и форма каверны, распределение теплового потока на зеркала расплава и на днище корпуса.

Код PPRKRS учитывает особенности реакторов ВВЭР. Он моделирует взаимодействие кориума с нижней опорной плитой активной зоны, перфорированными трубами, находящимися в нижней камере смешения; взаимодействие смеси "debris" и жидкой стали с эллиптическим днищем шахты и корпусом реактора; разрушение корпуса.

Как известно, в гетерогенных средах относительное движение фаз определяется не только процессами диффузионного характера, связанного со столкновением и хаотическим движением частиц включений, но и процессами взаимодействия фаз как макроскопических систем, причем они описываются с помощью сил межфазного взаимодействия. Соответственно в работе [3] рассмотрено движение смеси, которое описывается системой уравнений [1,4], и относительное движение более легких компонент (напри-

мер, жидкой стали, которая является основной более легкой компонентой). В результате рассмотрения всех сил, действующих на каплю стали, получен вывод соотношений для определения скоростей рассматриваемой компоненты. Таким образом, создана гетерогенная математическая модель взаимодействия кориума с корпусом реактора, реализованная в виде расчетного кода PPRKRS.

В [4] исходная система уравнений сохранения массы, импульса и энергии, записанная для смеси кориума и жидкой стали в двумерной цилиндрической системе координат, содержит уравнение неразрывности для смеси, уравнения движения для смеси, уравнение конвективной диффузии, которое описывает распределение концентрации жидкой стали в кориуме, с источниками концентрации стали, обусловленными плавлением стенки корпуса и твердых включений стали, а также уравнение энергии для смеси. Для стенки корпуса записывается уравнение нестационарной теплопроводности. Краевые условия ставятся так же, как в гомогенной модели [2], но дополнительно рассматриваются и формулируются условия для относительной концентрации стали.

Граничные условия таковы: нормальная компонента скорости на верхней поверхности смеси равна нулю; для касательной компоненты скорости на верхней поверхности смеси ставится условие Марангони; на оси симметрии для нормальной компоненты скорости выполняется условие симметрии, а касательная компонента скорости равна нулю; на твердых стенках, а также на поверхности фронта плавления накладывается условие прилипания; на зеркале смеси задается нулевой массовый поток; на твердых стенках и на поверхности фронта плавления относительная концентрация стали равна нулю; на оси симметрии выполняется условие симметрии для относительной концентрации стали; теплоотдача с зеркала смеси осуществляется излучением и естественной конвекцией пара; на наружной поверхности стенки корпуса также ставится граничное условие 3-го рода с учетом излучения; на фронте плавления задается температура плавления стали корпуса и записывается условие для определения положения фронта плавления в любой момент времени (условия Стефана); на оси симметрии выполняется условие симметрии для температуры.

В начальный момент времени задаются значения компонент скорости, давления и температуры смеси, относительной концентрации стали в смеси и температуры стенки корпуса.

Для определения стоков тепла при плавлении твердой фазы кориума разработана специальная методика, основанная на решении задачи Стефана с двумя движущимися границами раздела фаз. Предложена формула для расчета среднего объемного стока тепла. Определение коэффициентов турбулентного переноса осуществлялось с использованием модифицированной (К- ϵ)-модели турбулентности Chien.

В [4] получены формулы, выражающие источники концентрации жидкой стали при плавлении стенки корпуса и твердых включений стали в смеси. Рассмотрен вопрос о коэффициенте диффузии жидкой стали в смеси в задаче о стратификации жидкой стали в кориуме. Получены формулы, учитывающие зависимость остаточного энерговыделения и теплофизических свойств смеси от концентрации жидкой стали.

Верификация блока расчета турбулентной естественной конвекции кода PPRKRS выполнена на основе экспериментов СОРО, АСОРО [2,5]. Получено удовлетворительное совпадение результатов расчета с экспериментальными данными СОРО, АСОРО.

Верификация теплообменного блока кода PPRKRS проводилась с использованием экспериментальных данных ГНЦ РФ - ФЭИ по температуре на внутренней и наружной поверхностях стальной стенки [1,2,5]. Рассматривался процесс нестационарного теплообмена при охлаждении днища модели корпуса реактора недогретой водой.

Осуществлена проверка работоспособности блока расчета проплавления корпуса реактора [2]. В качестве тестовой задачи рассматривалась задача промерзания влаж-

ного грунта. Наблюдается хорошее совпадение результатов расчета глубины промерзания грунта с теоретическим решением Стефана.

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для решения задачи используется неявный метод решения уравнений Навье-Стокса в естественных переменных (метод В.К. Артемьева- Н.И. Булеева), разработанный в ГНЦ РФ - ФЭИ [6]. В его основу положены разнесенная сетка, монотонная балансная нейтральная разностная схема, явный метод неполной факторизации [7], неявная вычислительная процедура метода установления.

На каждом шаге по времени реализуется следующая вычислительная процедура. Сначала решается система уравнений для скоростей и давления неявным методом установления [6]. Затем с найденными значениями скоростей выполняется решение уравнений для \bar{K} и $\bar{\varepsilon}$. После выполнения итераций $(V_z, V_r, P, \bar{K}, \bar{\varepsilon})$ решаются уравнения для концентрации и температуры.

Критериями, характеризующими сходимость и эффективность метода, являются точность выполнения разностного уравнения неразрывности и точность выполнения балансов по теплу и концентрации.

Выход из внешних итераций осуществляется при достижении заданной точности по трем критериям.

Остановимся на особенностях и достоинствах метода решения.

Отметим, что принятое разнесение координат сеточных функций позволяет получать физические поля скоростей и давления и, кроме того, удобно с алгоритмической точки зрения, т.к. разность давлений между соседними точками определяет составляющую скорости, которая расположена между ними.

Важной особенностью монотонной балансной нейтральной разностной схемы является одновременное выполнение в разностном виде теоремы Остроградского-Гаусса для уравнений переноса (балансность) и другого важного свойства - свойства транспортности. Нарушение свойства балансности приводит к появлению за счет разностной схемы дополнительных источников и стоков, что может весьма серьезно исказить результаты.

Использование явного метода неполной факторизации дает ряд преимуществ: метод экономичен по числу арифметических операций; наличие параметров позволяет регулировать скорость сходимости; метод обладает хорошей скоростью сходимости и при использовании чебышевского набора параметров превосходит многие известные методы [8].

Важно отметить, что метод В.К. Артемьева – Н.И. Булеева позволяет получать любую наперед заданную точность. В расчетах можно выбирать достаточно большой шаг по времени, увеличивать его по мере стабилизации течения. Отличительной особенностью применяемой численной методики является работоспособность и устойчивость при большом числе узлов и сильном сгущении сетки; сгущение сетки используется в местах больших градиентов скорости, давления, температуры и концентрации.

ОГРАНИЧЕНИЯ СЛОЖНОСТИ ЗАДАЧИ на область применимости программы вытекают из использованных методических допущений, а также из области параметров, характерных для тяжелых аварий на АЭС с ВВЭР.

ТИПИЧНОЕ ВРЕМЯ СЧЕТА определяется сценарием аварии, условиями охлаждения, мощностью ПЭВМ, дискретностью области решения и временным шагом интегрирования. При расчете аварии с течью теплоносителя из холодного трубопровода первого контура эквивалентным диаметром 850 мм с полным обесточиванием АЭС с реактором ВВЭР-1000 на сетке 60×60 узлов с шагом интегрирования по времени $\Delta t = 1$ с единица

времени физического процесса считается примерно за 15 единиц процессорного времени в ОС WINDOWS 98 на ПК серии Pentium-200. Указанный коэффициент замедления не является чрезмерным с учетом математической сложности и громоздкости задачи.

ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММЫ

Возможности программы и структура исходных данных позволяют как проводить расчеты реального объекта (реактор, устройство для удержания расплава), так и обсчитывать экспериментальные установки, используемые для обоснования удержания кориума в корпусе реактора или ловушки.

Программа содержит модуль, обрабатывающий результаты расчетов и формирующий выходные данные. Частота вывода информации в выходные файлы регулируется пользователем в файле исходных данных.

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ПРОГРАММЫ

Нет.

ССЫЛКИ

1. Долгов В.В., Кащеев М.В., Муранов Ю.В. Моделирование теплового разрушения корпуса реактора при тяжелой аварии на АЭС с реакторами типа ВВЭР // ТВТ. - 1996. - Т.34. - №5. - С.770-779.

2. Кащеев М.В. Математические модели взаимодействия кориума с корпусом реактора, расчетный анализ для реактора АБВ. Автореферат диссертации на соискание уч. степени канд. техн. наук. - Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ, 1997. - 27 с.

3. Кащеев М.В. Гетерогенная математическая модель для описания стратификации компонент кориума при его взаимодействии с корпусом реактора: Препринт ФЭИ-2851.- Обнинск, 2000.- 12 с.

4. Кащеев М.В. Гомогенно-диффузионная математическая модель взаимодействия кориума с корпусом реактора: Препринт ФЭИ-2779.- Обнинск, 1999. -18 с.

5. Кащеев М.В., Артемьев В.К., Долгов В.В. Верификация расчетного кода ВРКР: Отчет ГНЦ РФ-ФЭИ. Инв. № 9636. - Обнинск, 1997. - 31 с.

6. Артемьев В.К. Вариант неявного метода для решения системы уравнений Навье-Стокса в естественных переменных: Препринт ФЭИ – 1962.-Обнинск,1989.- 22 с.

7. Артемьев В.К. Явный метод неполной факторизации с чебышевским адаптируемым ускорением сходимости: Препринт ФЭИ- 2095. - Обнинск, 1990. - 18 с.

8. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений.- М.: Наука, 1978.

ТРЕБОВАНИЯ К ЭВМ

Программа ориентирована на работу в операционных системах, позволяющих строить задачи, требующие не менее 1 Мбайт оперативной памяти.

ЯЗЫКИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Фортран 77. Тексты обрабатываются компиляторами LAHEY COMPUTER SYSTEMS и DIGITAL VISUAL FORTRAN 6.0.

ОПЕРАЦИОННАЯ СИСТЕМА

MS DOS, WINDOWS 95, WINDOWS 98,WINDOWS 2000.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Программа содержит 5 подпрограмм. Текст программы занимает около 115 кб дискового пространства. Программа требует не менее 1 Мбайт оперативной памяти при

решении задачи, на жестком диске необходимо иметь свободную память не менее 12 Мб для программы и расчетных данных. Размер объема выполняемого exe-файла 152 кб.

АВТОР ПРОГРАММЫ

М.В. Кашеев. ГНЦ РФ-ФЭИ, 249033, г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко,1.

ИМЕЮЩИЕСЯ МАТЕРИАЛЫ

Дискета с текстом оттранслированной программы, описание программы, описание применения, методический отчет, верификационный отчет.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

АЭС с ВВЭР. Тяжелая авария. Математическая модель. Стратификация. Гетерогенная смесь. Компонента. Кориум. Корпус реактора. Программа PPRKRS. Ловушка.

Поступила в редакцию 3.05.2001

Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2001. - 8 pages. - References, 21 titles.

In the paper some new modifications of the conventional point kinetics equations are proposed. The equations are provided an arbitrary functional, shape functions and delayed neutron precursors decay constants definitions and are intended for the description of the neutron flux evolution in nuclear reactor with fuel as an arbitrary mixture of the fissile nuclides

УДК 621.039.51

Calculational Benchmark – Test Model of BR-10 Reactor\A.V. Lyapin, N.A. Prochorova, E.P. Popov, S.V. Zabrodskaia, A.G. Tzikunov; Editorial board of Journal “Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika” (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 8 pages, 1 illustration, 7 tables.- References, 2 titles.

This article contains the international of fast reactor BR-10 on radioactive characteristics of irradiated materials. The purpose of this benchmark is to increase the accuracy and reliability mentioned above characteristics by comparison of different constant sets and codes.

УДК 621.039.51

Calculational Benchmark on Activation of Constructional Materials of Research Reactor AM\ R.I. Mukhamadeev, A.P. Suvorov; Editorial board of Journal “Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika” (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 5 pages, 2 illustrations, 4 tables.- References, 4 titles.

Description of developed calculational benchmark for the First NPP decommission is given. Two base functionals are supposed to calculate in the benchmark: 1) absolute neutron flux density (as function of neutron energy and distance from the core); 2) specific induced activity (as function of distance from the core and time after reactor shut-down).

УДК 621.039.51

Calculations of Netronic Characteristics of EAP-80 Reactor\ P. Pereslavytsev, D. Sahrai; Editorial board of Journal “Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika” (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 11 pages, 17 illustrations, 11 tables.- References, 8 titles.

The subcritical reactor core with different type fuels loaded was investigated. Highly enriched fuel of the German SNR fast breeder reactor as well as the Superphenix fuel can be successfully installed in the active region of the subcritical reactor. The irregularities in the heat generation naturally occurring in the core in this case could be reduced by replacing the empty fuel boxes in the outer rounds of the core with lead-bismuth eutectic.

УДК 621.039.586

Code PPRKRS Abstract\M.V. Kachtcheev; Editorial board of Journal “Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika” (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 5 pages.

The brief information about the program of calculation of corium interaction with VVER reactor internals and vessel under severe accident is presented. The program enables to predict the reactor vessel failure with the account of stratification of corium components.

УДК 621.311.25:621.384.01(043)

Transient Model of Two-phase Flow Heat Exchanger for NPP Simulator\A.A. Kazantsev, V.A. Levchenko; Editorial board of Journal “Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika” (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 10 pages, 3 illustrations, 1 table.- References, 5 titles.

In the paper the description of a mathematical model of the two-phase flow transient heat exchanger, designed for NPP simulator is set up briefly. It was developed for real time calculations.