

3. Райншке К. Модели надежности и чувствительности систем. Пер. с нем. Под ред. А.Б. Козлова. М.: Мир, 1979.
4. Райншке К., Ушаков И.А. Оценка надежности систем с использованием графов. М.: Радио и связь, 1988.
5. Перегуда А.И. Вычисление показателей надежности системы объект защиты—система безопасности. — Электронное моделирование, 1992, № 4, с. 66—70.
6. Перегуда А.И. Аналитические методы управления надежностью автоматизированного технологического комплекса «Объект защиты—система безопасности». Дис. на соискание уч. степени д.т.н. Санкт-Петербург, 1993.

Поступила в Редакцию 8.12.94

УДК 536.24:621.039.534

ТЕПЛОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПОДКУПОЛЬНОЙ ЧАСТИ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ АЭС

Ефанов А.Д., Канухина С.В., Шаньгин Н.Н., Юрьев Ю.С. (ГНЦ РФ — ФЭИ)

Предпосылки. Для двумерной нестационарной модели предполагается: подкупольная часть объема, имитирующего защитную оболочку, представляет собой полую оболочку с отверстием в нижнем основании, через которое входит струя пара и водорода;

несущей средой является смесь газов плотностью $\rho = \sum \rho_i$;

концентрация компонентов определена через их плотность $C_i = \rho_i / \rho$;

справедливо уравнение состояния идеального газа $P = \sum \rho_i R_i T$;

постулируется постоянство массы азота, являющегося составной частью воздуха, находящегося в объеме.

Математическая модель процесса. Математическая модель тепломассопереноса под герметичной оболочкой состоит из системы нестационарных уравнений в частных производных.

1. Уравнение переноса i -компонента газа, записанное в концентрации

$$\frac{\partial \rho C_i}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho \vec{U} C_i - D_i \operatorname{grad} C_i) = I_v, \quad (1)$$

где ρ — плотность несущей среды; C_i — концентрация i -компонента; $\vec{U}$ — вектор скорости несущей среды; D_i — коэффициент диффузии i -го компонента; I_v — возможные источники и стоки при химических реакциях водорода и кислорода, конденсации и испарении пара на каплях в процессе образования тумана.

2. Уравнения движения в естественных переменных

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho \vec{U} U_i - \mu \operatorname{grad} U_i) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i, \quad (2)$$

где μ — вязкость; g — ускорение свободного падения.

При этом член $(-1/3)\mu \operatorname{div} \vec{U}$ внесен под градиент давления. Это можно сделать, полагая, что коэффициент вязкости слабо меняется по пространству.

3. Уравнение неразрывности для газа

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho \vec{U}) = 0. \quad (3)$$

Предполагается, что в объеме нет источника (стока) массы.

4. Уравнение энергии, записанное для температуры:

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho C_p \vec{U} T - \lambda \operatorname{grad} T) = q_v, \quad (4)$$

где T — температура; C_p — теплоемкость; λ — теплопроводность среды.

Для стенки объема решается двумерное уравнение теплопроводности.

Реализация математической модели. Алгоритм решения. Используется алгоритм, подобный SIMPLE и основанный на идее расщепления уравнений UVP по физическим параметрам на дискретном уровне [1]. Предполагается, что на первом шаге расщепления перенос количества движения (импульса единицы массы) осуществляется только за счет конвекции и диффузии. Решаются уравнения движения по явной схеме — в результате получаются так называемые псевдоскорости:

$$\frac{\partial \rho \hat{U}_i}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho \vec{U} \hat{U} - \mu \operatorname{grad} \hat{U}_i) = \rho g_i \quad (5)$$

Применяется следующая схема расщепления. Вычитанием из уравнения (2) уравнения для псевдоскоростей (5) получается выражение для определения градиента давления

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \vec{U} - \rho \hat{U}) = -\operatorname{grad} P. \quad (6)$$

Уравнение для давления получается в результате применения оператора div к обеим частям равенства (6) и использования уравнения неразрывности (3):

$$-\frac{\partial \rho}{\partial \tau} - \operatorname{div}(\rho \hat{U}) = -\operatorname{div} \left[\left(\frac{\Delta t \rho}{\rho^0} \right) \operatorname{grad} P \right], \quad (7)$$

где ρ^0 — плотность на предыдущем временном шаге.

Сомножитель ρ/ρ^0 появляется из-за того, что при решении уравнения переноса для скоростей из него на дискретном уровне вычитается уравнение неразрывности, умноженное на функцию в центральной точке.

Для построения алгоритма используется полунеская схема, состоящая из явной (для псевдоскоростей) и неявной (для всех остальных уравнений).

После нескольких временных шагов в целях повышения эффективности счета использовалась модификация схемы [2], в которой вместо давления отыскивается приращение давления по времени. Обеспечить устойчивость позволяет гибридная схема аппроксимации, сочетающая центральные разности с односторонними разностями против потока [1].

Обеспечить консервативные свойства схемы позволяет формулировка дискретных аналогов в конечных объемах.

Относительная простота алгоритма достигается путем использования сеточного шаблона типа крест для расчета давления и скалярных переменных и шахматной сетки для расчета составляющих скорости. Система алгебраических уравнений решается методом продольно-поперечной прогонки.

Идеализированная защитная оболочка представляет собой полый цилиндр со сферической крышкой, поэтому расчетная область разбита на две части — цилиндрическую и сферическую, в соответствии с которыми система уравнений, представленная в векторном виде (1)–(7), записывается в цилиндрической и сферической системах координат.

На линии сопряжения двух частей расчетной области проводится сшивка всех уравнений на конечно-разностном уровне таким образом (по трем точкам), чтобы получить на стыке сшиваемых областей аппроксимацию уравнений со вторым порядком точности.

Выбор параметров дискретизации. В процессе реализации математической модели тестировалось каждое из уравнений, входящих в систему, независимо от других. Путем выбора соответствующих значений параметров, входящих в уравнение, необходимо свести решение данного уравнения по возможности к наиболее простой форме. Уравнение переноса тестировалось таким образом:

сводились интегральные балансы по массе пара, кислорода, водорода и энтальпии;

перенос пассивной примеси осуществлялся только диффузией (составляющие скорости равны нулю), контроль — по изолиниям плотности переносимой субстанции;

перенос пассивной примеси осуществлялся преимущественно конвекцией ($D_i \rightarrow 0$). Скорости были заданы так, чтобы удовлетворялось уравнение неразрывности.

В цилиндрической геометрии продольная составляющая скорости $V_z = \text{const}$, радиальная $U_r = 0$, в сферической геометрии $V_z = \text{const} \cos \varphi$; $U_r = \text{const} \sin \varphi$. Контроль также осуществлялся по изолиниям плотности.

В расчетах с использованием схемы с направленными разностями при больших сточных числах Пекле $Pe = \rho U \Delta Z / D$ (отношение интенсивностей конвекции и диффузии) возникает большая схемная вязкость, в результате которой изолинии плотности в сферической части расчетной области заметно отличаются от прямых. Это связано с тем, что именно в сферической части в рассматриваемом тестовом варианте поток направлен под углом к линиям координатной сетки. По этому тестовому варианту выбиралось сгущение разностной сетки так, чтобы изолинии плотности были как можно ближе к прямым при неизменном общем числе счетных узлов. Так как используется гибридная схема аппроксимации, то приходится налагать ограничение на отношение шага по времени к шагу сетки по пространству. Это ограничение соответствует известному критерию Куранта—Фридрихса—Леви и обеспечивает счетную устойчивость. Временной шаг выбирается минимальным при условии ограничения локального числа Куранта, равного 1.

Краевые условия. Начальными являются условия окружающей среды. Граничные условия формулируются на всех границах расчетной области. На границе могут быть заданы граничные условия 1, 2, 3 и 4-го рода.

Во входном отверстии объема задаются значимыми скорость (V_z -составляющая), плотность пара (вычисленная с учетом изменения давления в объеме), плотность водорода (если он присутствует), температура струи пара. Остальные значения плотности компонентов и U_r -составляющая скорости равны нулю.

На твердых стенках объема при расчете уравнений переноса необходимо задать следующие граничные условия. Для пара — его поток на поверхность объема (сток массы пара в пленку при конденсации). Модель конденсации пара на стенке выбрана на основе работы [3]. Поток пара $J = i m$, где m — масса молекулы; i — поток конденсирующихся молекул, т.е. количество молекул, конденсирующихся на единицу поверхности в единицу времени:

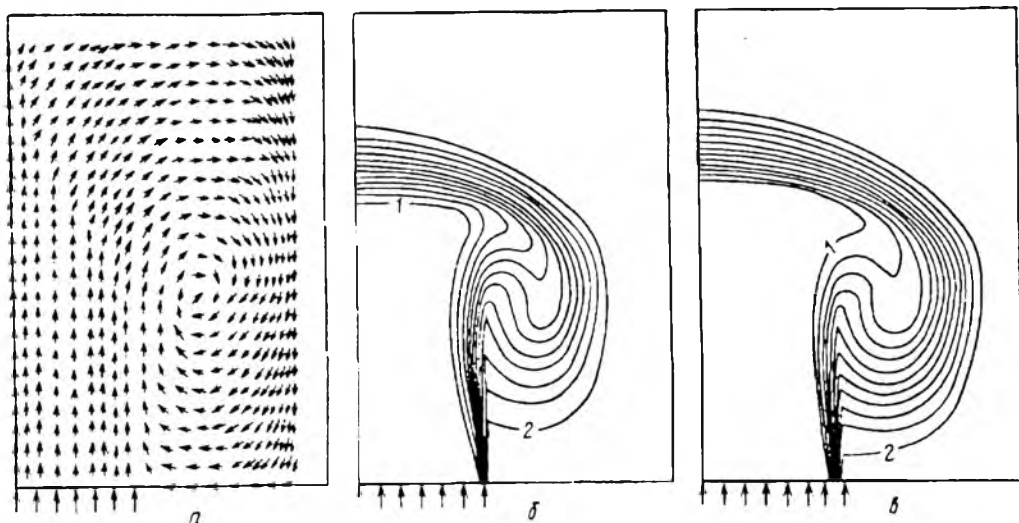
$$i = \frac{f}{(2\pi m k T)^{1/2}} |P_v - P_w|,$$

где P_v , P_w — давление насыщения, соответствующее температуре пара и стенки соответственно; $f = 0,04$ [3]. Для неконденсируемых газов задается производная плотности газа по нормали к стенке, равная нулю. Тангенциальная составляющая скорости равна нулю. Нормальная составляющая скорости равна нулю, если нет конденсации на стенке, и вычисляется из условия конденсации, если она есть: $\forall j > 0, \exists U_r = j/\rho_r$.

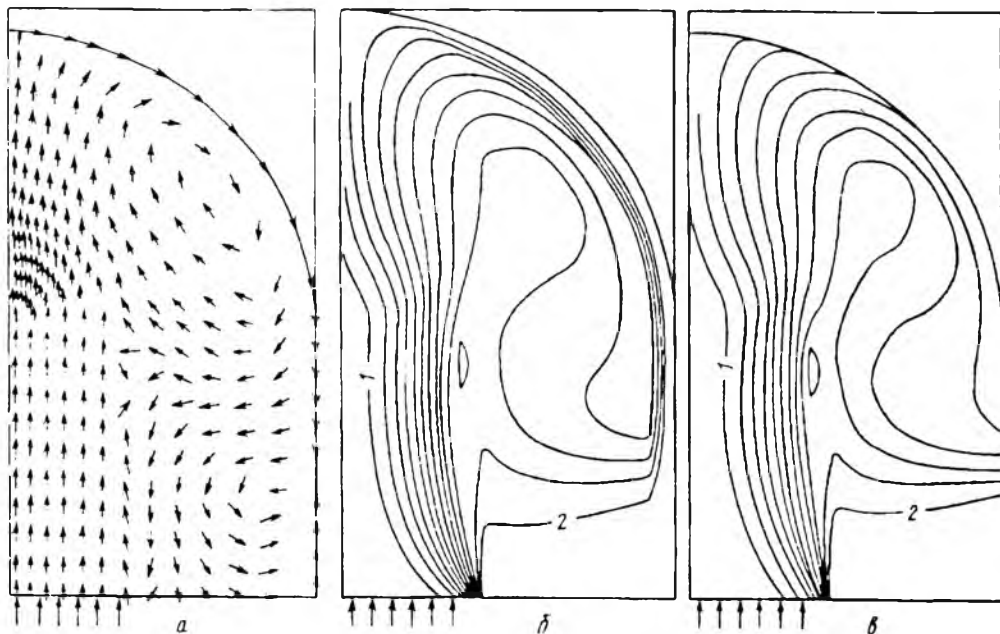
Для уравнения энергии решается сопряженная задача теплообмена. Конденсация пара на стенке учитывается заданием теплового потока j_{rH} . Для уравнения давления решается задач Неймана.

Результаты предварительных расчетов. Для режима заполнения герм стичной оболочки газом характерны стадии формирования струи в объеме оболочки, ее взаимодействия со стенками оболочки и наступления квазистационарного гидродинамического режима с вихревой областью на периферии струи (при сильном влиянии естественной конвекции в больших объемах возникает расслоение газовой среды с дополнительной вихревой областью в нижней части объема).

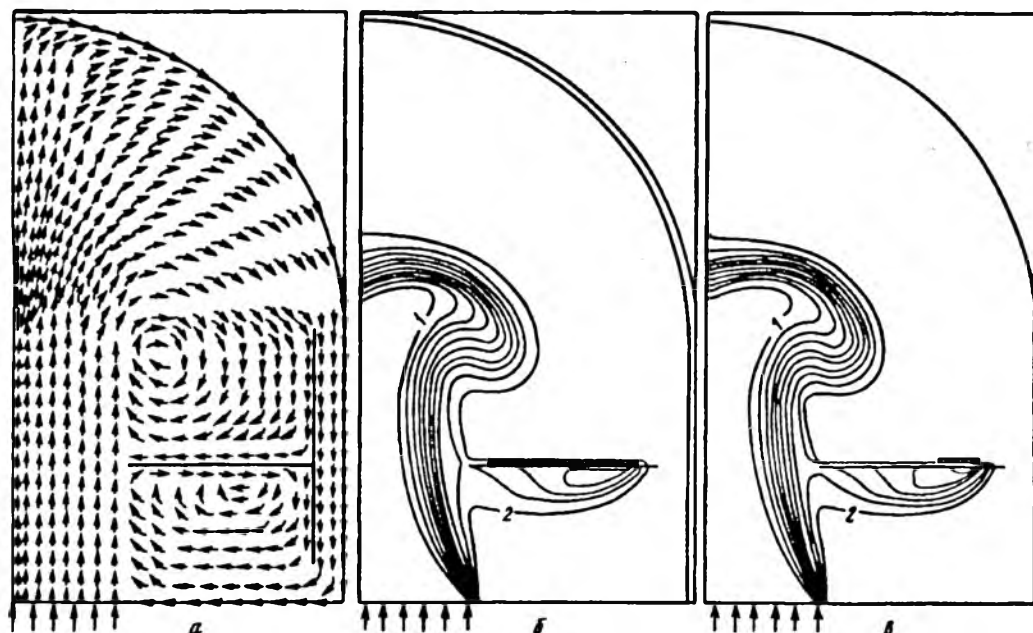
На рис. 1. показано формирование струи в начальный момент времени в цилиндрической оболочке. При этом струя имеет характерную грибообразную форму. Рис. 2 иллюстрирует квазистационарный режим течения в объеме, имитирующем подкупольное пространство проекта защитной оболочки АЭС с ВПБР-640. На рис. 3 показано развитие струи в защитной оболочке объемом 42000 м^3 . При этом затесненность помещения имитируется двумя «тонкими» непроницаемыми перегородками, что ус-



Р и с. 1. Начальный момент развития процесса для цилиндрической оболочки объемом 1 м^3 (время $0,12 \text{ с}$, скорость на входе 10 м/с): а — поле скоростей; б — изолинии 480 (1) и 315 К (2) дискретностью 15 К , температура на входе 500 К ; в — изолинии плотности пара $0,57$ (1) и $0,02 \text{ кг/м}^3$ (2), $\Delta\rho = 0,05 \text{ кг/м}^3$, плотность на входе в данный момент времени $0,614 \text{ кг/м}^3$



Р и с. 2. Квазистационарный режим течения в модели защитной оболочки объемом 42000 м^3 (время $15,8 \text{ с}$, скорость на входе 5 м/с): а — поле скоростей; б — изолинии 483 (1) и 330 К (2) дискретностью 17 К , температура на входе 500 К ; в — изолинии плотности пара $0,641$ (1) и $0,064 \text{ кг/м}^3$ (2), $\Delta\rho = 0,064$, плотность на входе в данный момент времени $0,65 \text{ кг/м}^3$



Р и с. 3. Развитие струи в объеме, затесненном стенками (время 5,7 с, скорость на входе 5 м/с): а — поле скоростей; б — изолинии 480 (1) и 315 К (2) дискретностью 15 К, температура на входе 500 К; в — изолинии плотности пара 0,9 (1) и 0,08 кг/м³ (2), $\Delta\rho = 0,075$, плотность на входе в данный момент времени 0,78 кг/м³

ложняет картину течения в нижней части расчетной области. На начальной стадии процесса переменное во времени направление потока в кольцевом зазоре влияет на формирование вихря под горизонтальной перегородкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 150 с.
2. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Наука, 1984. 520 с.
3. Кочурова Н.Н. Кинетика процессов испарения и конденсации жидкостей. — В кн.: Вопросы термодинамики гетерогенных систем и теории поверхностных явлений. ЛГУ, 1975, вып. 3.

Поступила в Редакцию 7.10.94

УДК 504.064.4+574:539.1.04+613.648

ОБОСНОВАНИЕ ДОПУСТИМОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ БЕТОНА ДЕМОНТИРУЕМЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

Енгватов И.А. (МГСУ), Машкович В.П., Морев М.Н. (МИФИ),
Цытин С.Г. (НТЦ ЯРБ ГАН РФ)

Время жизни ядерного реактора по техническим и экономическим причинам ограничено, и после использования ресурса он должен быть снят с эксплуатации. При демонтаже реакторной установки образуется большой объем радиоактивных отходов. Радиоактивность материалов демонтируемых ядерных установок определяется навес-