

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ КОНТЕЙНЕРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК.

Введение.

Часто для защиты груза от различного вида внешних воздействий используют специальные контейнеры. Используют их, в том числе и для тепловой защиты, например от воздействия пожара.

Задача оценки защитных свойств контейнера при воздействии тепловых нагрузок представляет собой задачу сопряженного теплообмена, в которой необходимо рассматривать теплопроводность в твердом теле, теплопроводность и конвективный теплообмен в газе и теплообмен излучением.

Существуют различные методы решения данной задачи. Теоретические методы можно разделить на две группы – использующие среднemasсовую модель и использующие распределенную модель.

В первом случае контейнер условно разделяют на n тел и для каждого из них записывают уравнение вида

$$C_i M_i \frac{dT_i}{dt} = Q_i, \quad i=1..n \quad (1)$$

где C_i, M_i, T_i, Q_i – теплоемкость, масса, температура и суммарный тепловой поток i -ого тела.

В результате решения этой системы уравнений определяют зависимость температуры каждого из n тел от времени.

Во втором случае процесс теплообмена моделируется системой дифференциальных уравнений в частных производных, включающей уравнение неразрывности, уравнения движения и уравнение энергии, а также термическим уравнением состояния. Задача решается численными методами в расчетной области, включающей области, занятые твердым телом и газом.

Второй подход, хоть и связан с проведением большого объема вычислений, является предпочтительным. Численная модель на основе решения системой дифференциальных уравнений дает более точные результаты расчетов, по сравнению со среднemasсовой моделью за счет возможности определения конвективных течений, а также детального учета внутренней структуры контейнера и ее влияния на различные виды теплообмена.

В данной работе представлена методика численного моделирования динамики нагрева объектов, имеющих сложную внутреннюю структуру.

Математическая модель.

Основные уравнения сохранения для конвективного теплообмена в приближении Буссинеска можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \nabla \mathbf{V} &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) &= \frac{1}{\rho} \nabla(\mu \nabla \mathbf{V}) - \frac{\nabla P}{\rho} + \mathbf{B} \end{aligned} \quad (2)$$

уравнение энергии

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}h) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\frac{\lambda}{C_p} \nabla h \right) + S \quad (3)$$

где, \mathbf{V} – вектор скорости;

h – энтальпия;

ρ – плотность;

P – давление;

\mathbf{B} – силы тяжести;

S – источники тепловыделений;

μ – динамическая вязкость;

C_p – удельная теплоемкость;

λ – коэффициент теплопроводности.

Термическое уравнение состояния:

$$\rho = \frac{P_0}{RT} \quad (4)$$

где P_0 – статическое давление, характерное для данной задачи.

Для определения интенсивности лучистого теплообмена была принята следующая модель излучения. Внутреннее и внешние поверхности прибора являются излучающими поверхностями. Их температура предпологается постоянной на текущий момент времени, равной осредненной температуре. Поглощение излучения в окружающих поверхности средах не происходит.

Для системы, состоящей из n серых, непрозрачных поверхностей являющихся диффузионными отражателями и имеющие угловое распределение собственного излучения, подчиняющееся закону Ламберта, плотность потока результирующего излучения определяется зависимостью

$$q_{rezi} = \sum_{k=1}^n (E_{effi} - E_{effk}) \cdot \varphi_{ik} \quad (5)$$

где φ_{ik} – угловой коэффициент излучения i -ой поверхности на k -ую.

Плотность потока эффективного излучения складывается из собственного излучения поверхности и отраженного излучения других поверхностей

$$E_{effi} = E_i + (1 - \varepsilon_i) \sum_{k=1}^n E_{effk} \varphi_{ik} \quad (6)$$

где $E_i = 5,67 \cdot \varepsilon_i \left(\frac{T_i}{100} \right)^4$ – собственное излучение i -ой поверхности;

ε_i – степень черноты i -ой поверхности.

Записав уравнение (6) для всех поверхностей получим систему из n алгебраических уравнений для определения n эффективных потоков излучения. По

их значениям по уравнению (5) находят плотность потока результирующего излучения для всех поверхностей.

Метод решения.

Задача решается численными методами в расчетной области, включающей области, занятые твердым телом и жидкостью (рис.1).

Расчетная область разбивается на контрольные объемы. Для каждого из которых записываются дискретные аналоги исходных дифференциальных уравнений (2,3).

Во всей расчетной области задача решается как задача конвективного теплообмена. Однако вследствие равенства нулю скоростей в области, занятой твердым телом здесь будет решаться чистая задача теплопроводности. В результате решения такой задачи получим распределение скорости в жидкости и распределения температуры в твердом теле и жидкости, которые автоматически будут согласованы на границе раздела твердого тела с жидкостью.

Вычисление нестационарного процесса реализуется следующим образом: на начальный момент времени задаются значения величин всех определяемых параметров – составляющих скорости и температуры. Составляющие скорости принимаются равными нулю, а температура для всех узловых точек равной начальной температуре. Тепловое воздействие пожара учитывается как тепловой поток на внешней границе контейнера. Далее для каждого шага по времени первоначально решается гидродинамическая задача. Полученные значения скоростей используются для решения уравнений сохранения энергии и нахождения значений температуры.

На каждом шаге по времени пересчитываются значения термодинамических параметров – давления или плотности по осредненной температуре газа. Если контейнер содержит предохранительный клапан и в нем поддерживается постоянное давление, тогда определяется изменение плотности. Если контейнер герметичен, то определяется изменение давления. Теплофизические свойства материалов, значения которых зависят от температуры могут уточняться на каждом шаге по времени в соответствии с изменением температуры для всех контрольных объемов.

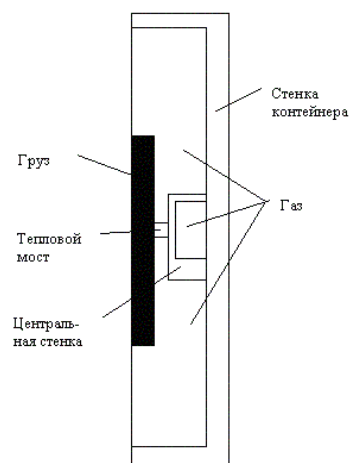


Рис. 1. Расчетная схема.

Для определения интенсивности лучистого теплообмена была принята следующая модель излучения. Внутреннее пространство контейнера разделено на четыре зоны (рис.2). Лучистый теплообмен в каждой зоне происходит независимо от других. Каждая зона разделяется на несколько излучающих поверхностей, температура которых предполагается постоянной на текущий момент времени, равной осредненной температуре составляющих поверхность контрольных объемов. Количество поверхностей может быть произвольным, в реализованном примере первая зона имеет пять таких поверхностей, вторая – две, третья – четыре и четвертая – пять (рис.2). На каждом шаге по времени для каждой зоны излучения решается система уравнений (7) и определяются значения результирующих тепловых потоков по (6) для каждой поверхности. Угловые коэффициенты излучения для всех поверхностей во всех зонах излучения задаются в исходных данных.

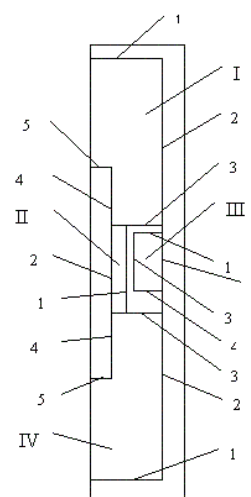


Рис. 2. Схема зон и поверхностей лучистого теплообмена.

Счет идет до тех пор, пока температура груза на глубине 30 мм от наружной поверхности не достигнет критической температуры 150°C или пока не истечет время теплового воздействия (1 час).

Тестовые задачи.

Для проверки правильности результатов вычислений были смоделированы некоторые задачи, имеющие известное точное решение.

Одна из таких задач это течение вязкой жидкости в квадратной полости с подвижной верхней стенкой. точное максимальное значение функции тока составляет 0,1179. Задача смоделирована на сетке 51×51. Получены следующие результаты. Для Re=1000 максимальное значение функции тока составляет 0,1072. Картина линий тока соответствует картине точного течения (рис. 3).

Методика расчета должна правильно учитывать наличие внутри расчетной области твердых тел. Для моделирования подобной ситуации добавим в расчетную область предыдущей задачи твердую стенку, разделяющую ее пополам. Результаты счета свидетельствуют (рис. 4), что течение в обеих полостях развивается синхронно, что соответствует действительности.

Точность численного интегрирования уравнения энергии проверим на следующих примерах.

Рассмотрим ту же расчетную область, только с неподвижной верхней стенкой. Температуру правой стенки зададим равной 320°C, а левой 20°C. Считаем, что сила тяжести равна нулю поэтому конвекция в полости отсутствует. Теплофизические параметры газа примем равными параметрам воздуха. Несложно определить теоретическую плотность теплового потока между стенками в стационарном режиме. При длине стенки 1 метр он будет равен 9,39 Вт/м2 при коэффициенте теплопроводности 0,0313 Вт/(м К). Численное моделирование задачи дает такой же результат.

Усложним задачу – в центре расчетной области разместим твердую стенку толщиной 10 см, имеющую коэффициент теплопроводности 10 Вт/(м К).

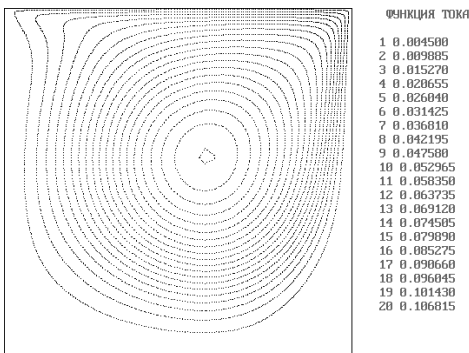


Рис.3. Квадратная полость с подвижной верхней крышкой.

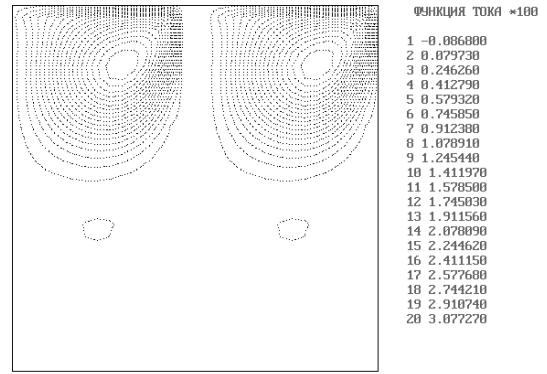


Рис.4. Разделенная квадратная полость с подвижной верхней крышкой.

Теоретическая плотность теплового потока между стенками в стационарном режиме в этом случае равна 10,43 Вт/м2. Численное моделирование задачи дает такой же результат.

Решим ту же задачу с учетом естественной конвекции (рис.5). В этом случае образуются вихревые течения, вначале в полости, расположенной у горячей стенки, затем и в другой полости. Расчетная плотность теплового потока между стенками в стационарном режиме увеличилась в несколько раз.

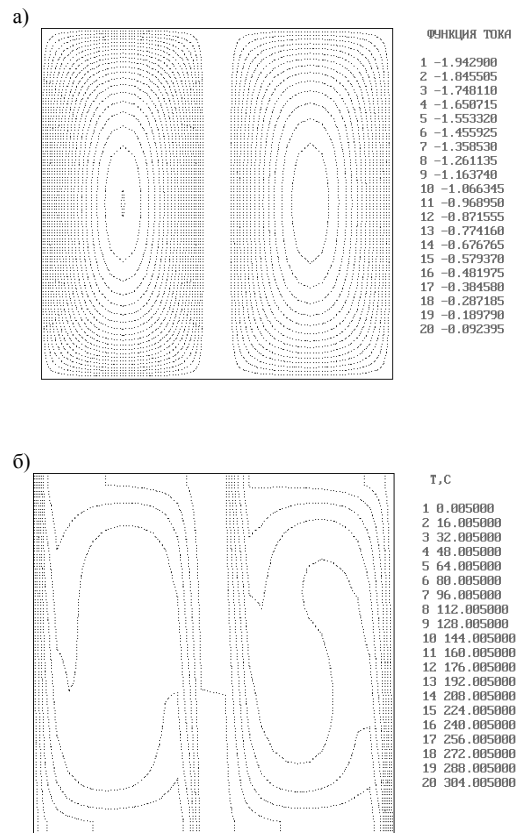


Рис.5. Разделенная квадратная полость с нагревом правой стенки а-функция тока, б-температура.

Проведенные сравнения позволяют утверждать, что разработанная методика численного моделирования позволяет получать результаты достаточной степени точности.

Результаты расчетов защитных свойств контейнера при воздействии тепловых нагрузок.

Расчеты проводились по схеме, представленной на (рис.1).

Тепловой мост моделирует теплообмен между центральной стенкой и грузом происходящий через 8 стальных ребер и 4 шпильки. Толщина теплового моста подбирается соответственно площади перечисленных элементов.

В качестве стенок контейнера была выбрана сталь. Считаем, что газ внутри контейнера – это воздух.

Рассматривается наиболее теплонагруженный режим, когда температура наружной поверхности контейнера принимается равной температуре пламени 1300 °С. Составляющие скорости на наружной поверхности контейнера, являющейся одновременно внешней границей расчетной области, принимаются равными нулю.

Процесс протекает следующим образом. Происходит нагрев стенок контейнера, от которых нагревается воздух, находящийся внутри, образуются вихри в верхней, нижней частях контейнера и между стенками в центральной части.

Теплообмен между внутренней поверхностью стенок контейнера и грузом происходит в основном благодаря конвекции и излучению. Через тепловой мост, который составляют центральные стенки проходит меньшее количество тепла. Об этом свидетельствует распределение температуры внутри груза (рис.6). Наибольшую температуру груз имеет в нижней и верхней части, в центральной части температура ниже. Опасной температуры на глубине 30мм от поверхности груз достигает через 416 секунд после начала нагрева в верхней угловой части.

Таким образом проведенные расчеты показывают перспективность предлагаемого подхода для моделирования динамики нагрева объектов, имеющих сложную внутреннюю структуру.

Развитие данного подхода предоставит возможность расширения расчетной области и включения в нее вместе с контейнером очага пожара, возможность учета нарушения целостности контейнера и фильтрация в него наружных газов, возможность моделирования горения внутри контейнера.

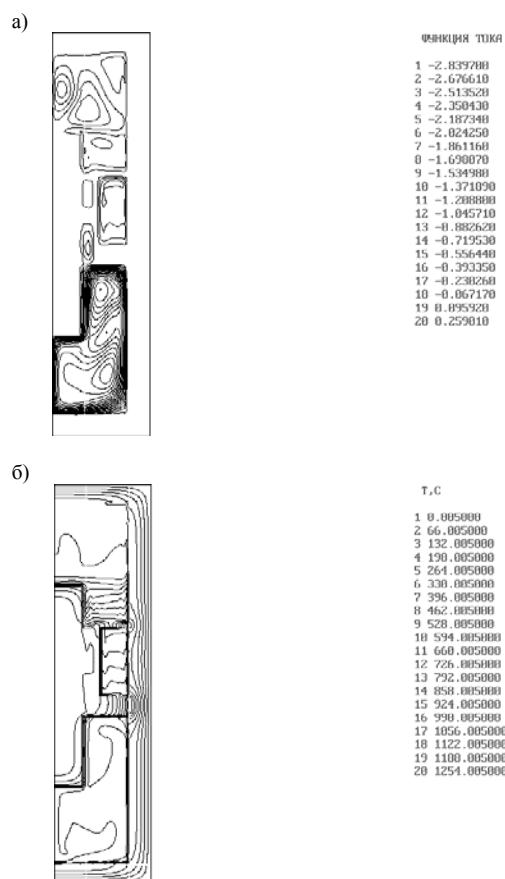


Рис.6. Нагрев контейнера (416 сек. после начала) а-функция тока, б-температура.