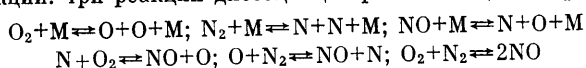


УДК 532.516:544.12

РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ПОТОКА РЕАГИРУЮЩЕГО ГАЗА ПРИ ОБТЕКАНИИ ПЛОСКОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ВЫЕМКИ

МАКАРОВ И. Г.

В настоящей работе рассматривается задача обтекания плоской прямоугольной выемки неравновесным потоком вязкого реагирующего газа, состоящего из пяти компонент: O_2 , O , N , NO , N_2 , внутренние степени свободы которых возбуждены равновесно с поступательными степенями свободы. В потоке газа учитывается шесть газофазных реакций: три реакции диссоциации-рекомбинации и три реакции обмена



где M — третья частица.

Характер течения газа предполагается ламинарным, поток на внешней границе обтекающей выемку пограничного слоя имеет сверхзвуковую скорость.

Область расчета, включающая в себя выемку и часть внешнего потока, и система координат представлены на фиг. 1. Полная система нестационарных уравнений Навье — Стокса реагирующего газа применяется для описания течения во всей области расчета. Физическая модель химически реагирующей смеси взята из работы [1]. При этом для вычисления коэффициентов вязкости и теплопроводности смеси газов используются приближенные формулы типа формул Уилке, диффузионные потоки определяются из соотношений Стефана — Максвелла [1].

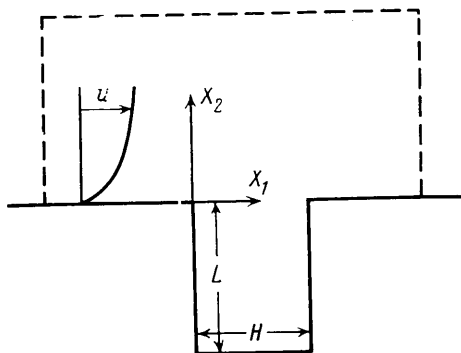
При решении поставленной задачи используются следующие граничные условия: на входе потока в расчетную область задаются исходные профили плотности, скорости, температуры и концентраций компонент смеси, которые берутся из решения задачи обтекания тела с предполагаемой выемкой как целого; на верхней границе расчетной области и на выходе потока (вниз по потоку) задаются мягкие граничные условия типа равенства нулю вторых производных всех искомых компонент по нормали к рассматриваемым границам; на поверхности тела используется условие прилипания и задается постоянная температура поверхности.

Граничные условия на концентрации компонент смеси на поверхности обтекаемой выемки полагаются следующими: либо диффузионные потоки всех компонент по нормали к поверхности равны нулю (каталитически нейтральная поверхность), либо концентрации атомарного кислорода и азота на поверхности равны нулю (полностью рекомбинируют), а по отношению к NO поверхность каталитически нейтральна (каталитически идеальная поверхность).

Нестационарное течение газа в выемке находится от следующих начальных условий задачи: над выемкой поток газа задан по профилю набегающего пограничного слоя, в выемке газ покоится, давление и температура газа равняются своим значениям на поверхности обтекаемого тела.

Для расчета течения используется конечно-разностный метод расщепления по физическим процессам и пространственным переменным [2]. Разностная схема первого порядка точности по координатам и времени обладает свойством консервативности при установлении. Задача решается в переменных: плотность, скорость, температура и концентрации компонент.

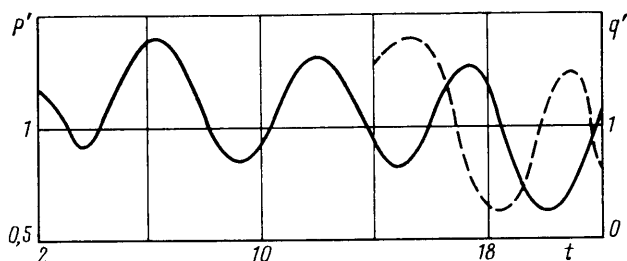
Обтекающий выемку пограничный слой имеет толщину $\sim 0,5$. Давление газа на внешней границе потока составляет 0,2 атм, температура газа примерно рав-



Фиг. 1

на 5000 К. Смесь состоит в основном из атомарного кислорода (20% от плотности смеси) и молекулярного азота (70%). Температура поверхности тела фиксирована и равна примерно 1000 К, вся поверхность тела до выемки задана каталитически нейтральной. Число Рейнольдса, рассчитанное по условиям в потоке на внешней границе пограничного слоя и длине выемки L , составляет $4,2 \cdot 10^3$, число Маха, вычисленное по замороженному составу смеси, на внешней границе обтекающего потока равно трем.

Геометрические размеры выемки выбраны следующими: длина $L=15$ см, глубина $H=6$ см. Область расчета включает в себя выемку и часть потока до выемки на расстояние $0,5 L$ и на такое же расстояние вниз по потоку. Расчетная сетка имеет 100×100 узлов внутри выемки и 200×25 узлов в области внешнего потока. По координате x_1 сетка полностью равномерная, по координате x_2 сетка существенно неравномерна в области внешнего потока. Шаг по времени разностной схемы, обезразмеренный по скорости потока на внешней границе расчетной области и шагу сетки $h=0,01 L$, равняется единице. Безразмерное время задачи есть отношение длины вы-



Фиг. 2

емки L к скорости потока на верхней границе рассматриваемой области. Число Рейнольдса, рассчитанное по местным условиям течения внутри выемки и шагу сетки h , не превышает 2. В первой части исследования, до момента времени 11, вся поверхность выемки задается каталитически нейтральной, затем на дне полости граничные условия изменяются и поверхность дна считается каталитически идеальной.

В результате расчета в выемке получена нестационарная картина течения, связанная с образованием вихря около передней стенки полости (стенки, лежащей вверх по потоку), его сносом в поток и разрушением. Следующий цикл пульсаций начинается с образования нового вихря около передней стенки выемки. В целом картина обтекания полости аналогична течению типа дорожки Кармана за кормой плохобтекаемого тела при умеренных числах Рейнольдса, с той лишь разницей, что разрушение вихря происходит в основном из-за взаимодействия с лежащим вниз по потоку углом полости. Вверх по потоку пульсации течения проникают примерно на $0,01$ от длины выемки L .

На фиг. 2 показана зависимость давления от времени в выделенной точке полости, лежащей на середине линии, соединяющей верхние углы каверны (сплошная линия). Давление обезразмерено по своему значению на внешней границе набегающего потока, по оси абсцисс отложено безразмерное время задачи. Минимумы давления в моменты времени 4, 9, 15 и 20,5 соответствуют прохождению оторвавшегося вихря вблизи данной точки. Пульсации давления в выемке выходят на почти установившийся цикл, период которого примерно равен пяти.

Движение газа в выемке до момента изменения граничных условий на каталитичность дна полости носит практически химически замороженный характер. Основные тепловые нагрузки сосредоточены в окрестностях верхних углов полости. На дне выемки максимум теплового потока не превышает $0,15$ от своего значения на поверхности тела во внешнем течении. После изменения граничных условий на каталитичность дна полости, тепловые потоки резко возрастают. На фиг. 2 показана зависимость от времени обезразмеренного по своему значению на поверхности тела теплового потока в точке дна полости, удаленной от передней стенки выемки на $0,75 L$ (пунктир). Зависимость приведена, начиная с момента времени 11,5, т. е. после изменения граничных условий на каталитичность дна полости. Видно, что после некоторого переходного процесса тепловой поток на дне полости начинает изменяться с частотой пульсаций основного течения. Область существенных изменений в концентрациях компонент смеси ограничена небольшой зоной вблизи дна полости, размеры этой зоны по вертикали не превышают $0,1 H$.

В целом внешний поток слабо проникает внутрь выемки. В расчете не наблюдается образования ударных волн внутри полости, максимумы давления имеют вид «размазанных» зон, что объясняется небольшой величиной рассмотренного в задаче числа Рейнольдса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афолина Н. Е., Власов А. Ю., Громов В. Г. Расчет вязкого обтекания треугольного крыла гиперзвуковым потоком воздуха // Аэродинамика входа тел в атмосферы планет. М.: Изд-во МГУ, 1983. С. 29–45.
2. Ковеня В. М., Яненко Н. Н. Метод расщепления в задачах газовой динамики. Новосибирск: Наука, 1981. 304 с.

Москва

Поступила в редакцию
29 IX.1987

УДК 532.522.2.034

РЕШЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ СТРУЙ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

АМРОМИН Э. Л., ЗИЛИСТ Л. П., ТИМОШИН Ю. С.

Предложен метод последовательных приближений для решения трехмерных нелинейных задач теории струй идеальной жидкости (см., например, [1–3]). Каждое приближение включает в себя расчет обтекания известной поверхности, т. е. решение внешней задачи Неймана для уравнения Лапласа относительно потенциала скорости, и корректировку части этой поверхности с целью уменьшить невязку в условии постоянства давления на поверхности струй. Корректировка производится малыми деформациями, отыскиваемыми из системы интегральных уравнений, при этом уточняется и форма каверны в плане. Представлены результаты расчетов обтекания трехосных эллипсоидов, полученные с использованием обобщенной схемы Жуковского – Рошко для замыкания струй.

При обтекании преграды установившимся безвихревым потоком идеальной несжимаемой жидкости во всей области течения может быть введен скалярный потенциал скорости Φ . На поверхности сходящихся с преграды струй должны выполняться условия непротекания и постоянства давления. Поэтому вне полубесконечной поверхности S для отыскания производных Φ может быть сформулирована задача

$$\Delta \Phi = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \Phi \rightarrow \{1, 0, 0\}, \quad x^2 + y^2 + z^2 \rightarrow \infty \quad (2)$$

$$N \nabla \Phi|_S = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \Phi \nabla \Phi|_S = 1 + \sigma \quad (4)$$

где N – внешняя нормаль к S , $\{x, y, z\}$ – декартовы координаты плоскости течения. Поверхность S состоит из трех частей: S_1 , S^* и S_2 . Здесь S_1 – заданная поверхность преграды; на полубесконечной фиктивной поверхности S_2 , на которую замыкается струя [1, 4–8], известна только компонента нормали N_x , а сама поверхность струй S^* расположена между S_1 и S_2 . Соотношения (3), (4) – условие непротекания и записанное с использованием интеграла Бернулли условие постоянства давления. Постоянная σ задается заранее, а форма и размеры S^* подлежат определению при решении задачи. Этим и обусловлена нелинейность задачи (1)–(4) для линеиного уравнения (1).

Классический подход к решению аналогичных плоских задач [1], не так давно обобщенный на осесимметричные [4], основан на обращении переменных. Выбирая в качестве независимых переменных, например, Φ и функцию тока, можно определить изображение S в плоскости этих переменных (хотя для сложных форм S_1 такой путь связан с преодолением существенных трудностей [5]). Подобное обращение в трехмерных задачах использовать не удавалось, а известные попытки [6] решения задачи (1)–(4) в переменных $\{x, y, z\}$ не привели к заметным успехам.

Описываемый ниже метод использует изложенные в [7] идеи решения плоских струйных задач и опыт [8] решения осесимметричных. Однако трехмерная задача обладает специфическими трудностями. На фиг. 1 изображены сечения поверхности S , соответствующей струйному обтеканию преграды. В правой половине фигуры приведены сечения S плоскостями $x = \text{const}$ (кривая 11 соответствует линии схода струй; 7–10 – $x=5; 3,32; 1,42; 0,54$), а в левой – плоскостями $\theta = \arctg(z/y) = \text{const}$ (кривые 1–4 соответствуют $\theta=0, 30, 60, 90^\circ$). Сечения S_1 и S_2 плоскостями $\theta = \text{const}$ нанесены штриховыми линиями. Здесь $r = (z^2 + y^2)^{0,5}$, а линии 5, 6 – проекции схода струй $x = x_1(\theta)$ и линий их замыкания $x = x_2(\theta)$ – нанесены штрихпунктиром. Видно, что на S^* разным сечениям $\theta = \text{const}$ соответствуют разные интервалы изменения x .