

УДК 532.517.3;532.5.013.4

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОБТЕКАНИИ КУБИЧЕСКОЙ КАВЕРНЫ

© 2011 г.

Б.И. Краснопольский

НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

krasnopolsky@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Приведены результаты численного моделирования теплообмена при обтекании кубических каверн. Исследовано влияние различных параметров ламинарного набегающего потока на устойчивость течения (частота возмущений, толщина пограничного слоя, скорость основного потока). Показано, что интегральные потоки тепла существенным образом зависят от частот возмущений в набегающем потоке, причем частоты, приводящие к интенсификации теплообмена, определяются устойчивостью сдвигового слоя между каверной и основным потоком. Рассмотрено влияние угла поворота каверны относительно направления набегающего потока на теплообмен на дне каверны.

Ключевые слова: уравнения Навье–Стокса, несжимаемая жидкость, ламинарное течение, трехмерная прямоугольная каверна, теплообмен.

Введение

Задача обтекания каверн представляет практический интерес для широкого круга приложений в науке и технике. Одним из актуальных направлений исследований является исследование интенсификации теплообмена с каверной. Это направление имеет обширный диапазон применений в областях строительной аэродинамики и технической физики.

Постановка задачи

Рассматривается течение вязкой теплопроводной жидкости при обтекании плоской пластины, в которой имеется трехмерная прямоугольная каверна (рис. 1). На дне каверны расположен источник тепла, который поддерживает постоянной его температуру поверхности.

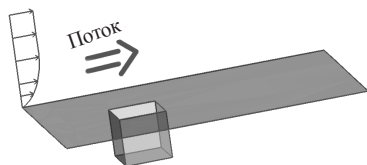


Рис. 1

В приближении Буссинеска рассматриваемое течение описывается системой уравнений Навье–Стокса, неразрывности и энергии:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_j} = \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{\text{Ra}}{\text{Re}^2 \text{Pr}} \theta (e_g, e_i),$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial u_j \theta}{\partial x_j} = \frac{1}{\text{Re Pr}} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_j^2},$$

где в качестве масштаба длины и скорости использованы соответственно глубина каверны D и скорость набегающего потока U . На твердых стенках каверны и на пластине ставятся условия прилипания, а на входе в расчетную область для продольной компоненты скорости задается профиль скорости Блазиуса. На входе температура потока считается постоянной, $\theta = 0$; на дне каверны задается постоянная температура $\theta = 1$. Остальные стенки считаются теплоизолированными $\partial \theta / \partial n = 0$.

Для решения задачи разработан вычислительный алгоритм, основанный на сеточных методах, методе контрольного объема, схеме SMART аппроксимации конвективных членов и полунявной схеме третьего порядка [2] интегрирования по времени.

Нижеприведенные результаты получены для параметров задачи: $\text{Re} = 5000$, $\text{Ra} = 0$, $\text{Pr} = 0.7$ и толщины пограничного слоя $\delta = 0.05 - 0.25$.

Результаты

Изучено влияние толщины пограничного слоя набегающего потока на течение в каверне. Проведены расчеты обтекания каверны невозмущенным потоком при толщине пограничного слоя $\delta = 0.05 - 0.25$. Показано, что толщина пограничного слоя δ существенным образом влияет на течение. Так, для $\delta = 0.1 - 0.25$ во всей

области реализуется стационарное течение, тогда как при более тонком пограничном слое $\delta = 0.05$ возникает периодический режим. Для этого режима исследована взаимосвязь колебаний в потоке с развитием неустойчивости в слое смешения, возникающем между каверной и основным потоком. Определены частота ω и длина волны λ возникающих колебаний: $\omega = 6.17$ и $\lambda = 0.62$. Показано, что нарастание колебаний в слое смешения происходит экспоненциально, определен соответствующий коэффициент нарастания колебаний по пространству $\kappa_x \approx 5$.

Полученные значения частоты и коэффициента нарастания амплитуды колебаний сопоставлены с соответствующими параметрами развития неустойчивости в сдвиговом слое. В рамках линейной теории рассмотрена устойчивость сдвигового слоя, образующегося при обтекании каверны невозмущенным потоком. Для этого решена задача на собственные значения для уравнения Орра–Зоммерфельда, где в качестве профиля скорости плоскопараллельного течения использовано распределение x -компоненты скорости в плоскости симметрии каверны. Получены коэффициент нарастания и частота возмущений: $\kappa_x \approx 4.7$ – 4.8 , $\omega = 6$ – 8 . Наблюдаемое хорошее согласование параметров течения позволяет полагать, что возникновение колебаний для тонкого профиля скорости на входе вызвано развитием неустойчивости в сдвиговом слое между каверной и основным потоком. Стационарность течения для более толстых профилей скорости, по-видимому, обусловлена стабилизирующим воздействием на слой смешения стенок каверны.

Уменьшение толщины пограничного слоя набегающего потока способствует росту потока тепла на дне каверны. Двукратное уменьшение толщины пограничного слоя сопровождается 30-40%-ным ростом интегрального потока тепла; наблюдаемый рост теплообмена на дне каверны обусловлен ростом массообмена между каверной и набегающим потоком и увеличением скорости вращения основного вихря в каверне. Роль пульсаций в набегающем потоке на теплообмен на дне каверны рассмотрена в [3].

Установлено, что при невозмущенном обтекании каверны увеличение угла поворота каверны приводит к монотонному росту потока тепла (рис. 2). Максимальные значения достигаются при угле поворота $\varphi = 45^\circ$ и превышают значения потока тепла для обтекания под нулевым углом на 20%.

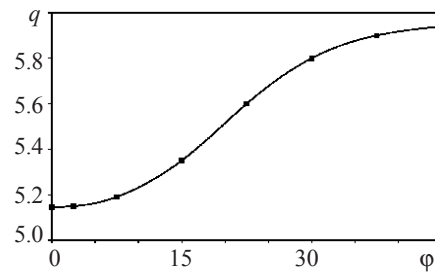


Рис. 2

Рассмотрено влияние частот возмущений в потоке на теплообмен на дне каверны. Графики зависимости потока тепла от частоты пульсаций в набегающем потоке для различных углов поворота каверны представлены на рис. 3.

Как и в случае обтекания каверны под нулевым углом [3], наблюдается эффект значительного роста теплообмена. Однако в этом случае как максимальные значения потоков тепла, так и частоты возмущений, при которых наблюдается это увеличение потока, оказываются близкими для всех углов поворота каверны.

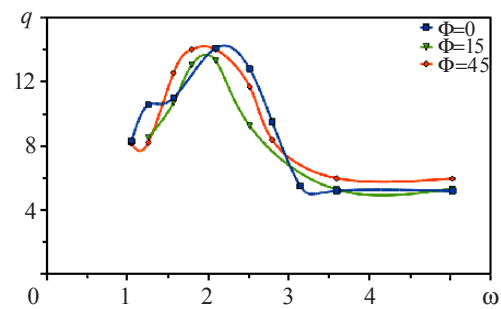


Рис. 3

Автор благодарит Н.В. Никитина за ценные замечания и рекомендации в ходе выполнения работы и обсуждения результатов. Представленные результаты получены на вычислительной системе СКИФ МГУ «Чебышев».

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №09-08-00390-а).

Список литературы

1. Nikitin N.V. Finite-difference method for incompressible Navier-Stokes equations in arbitrary orthogonal curvilinear coordinates // J. Comput. Phys. 2006. V. 217, No 2. P. 759–781.
2. Герценштейн С.Я., Краснопольский Б.И. О влиянии частоты возмущений и толщины пограничного слоя на теплообмен при обтекании кубической каверны // Изв. РАН. МЖГ. 2010. №1. С. 32–39.

NUMERICAL INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER FROM THE STREAMLINED CUBIC CAVITY*B.I. Krasnopolsky*

The results of numerical simulation of the heat transfer in the streamlined cubic cavity are presented. The influence of various laminar incoming flow parameters on the flow stability is investigated. It is shown, that the integral heat flux strongly depends on the perturbation frequency in the incoming flow. The frequency range, leading to the heat transfer intensification, is determined by the stability of the shear layer between the cavity and the main flow. The role of the rotation angle of the cavity relative to the direction of the incoming flow on the heat transfer is investigated.

Keywords: Navier–Stokes equations, incompressible fluid, laminar flow, three-dimensional rectangular cavity, heat transfer.