

Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет  
Кафедра гидроаэродинамики

## Отчёт по вычислительной лабораторной работе № 6

Дисциплина: Численные методы гидродинамики

Тема: Моделирование свободной конвекции  
в полости с разогретыми вертикальными стенками  
с учётом эффектов сопряжённого теплообмена

Выполнил студент гр. 5037/1 ..... А. В. Игнатьев

Принял преподаватель, асс. .... Н. Г. Иванов

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2010 г.

### Задание

Выполнить расчёт сопряжённого теплообмена в области, включающей заполненную жидкостью квадратную полость и разогретые массивные боковые стенки.

### Постановка вычислительной задачи

Расчётная область представляет собой три стоящих в ряд прямоугольных блока единичной высоты с независимо стыкующимися сетками: боковых твердотельных шириной 0,4 и среднего квадратного с жидкостью. Левая стенка нагрета, правая охлаждается (заданы удельные тепловые потоки  $Q = \pm 0,1$ ), прочие внешние границы адиабатны.

Течение определяется двумя безразмерными параметрами – числами Грасгофа  $Gr = g\beta\Delta T h^3/\nu^2$  и Прандтля  $Pr = \nu/a$ . Если принять масштаб скорости  $V_s = \sqrt{g\beta\Delta T h}$ , то число Рейнольдса будет выражено как  $\sqrt{Gr}$ . При постановке задачи задавались тремя вариантами  $Re=50, 100$  и  $200$ ,  $Pr=0,7$ . При этом до расчёта нельзя определить  $Gr$ , поскольку перепад температур  $\Delta T$  на жидкой области (например, выражаемый как разность средних температур стенок) не известен (в выражение для скорости программа подставляет  $\Delta T_s = 1$ ).

Расчёт производим в приближении Буссинеска: массовая сила (направленная против оси  $y$ ) пропорциональна локальному перепаду температуры, нормированный коэффициент теплового расширения единичный. Нормированные свойства твёрдого тела: плотность и теплоёмкость единичные, теплопроводность 0,1.

## Анализ результатов

Поля температур и скоростей изображены на рис. 1. Очевидно, чем больше число Рейнольдса (т. е. чем больше силы плавучести по сравнению с силами вязкого трения), тем больше движение жидкости (за счёт подъёмных сил у нагреваемой стенки и опускных у охлаждаемой циркулирующей вокруг центра полости) концентрируется к границам.

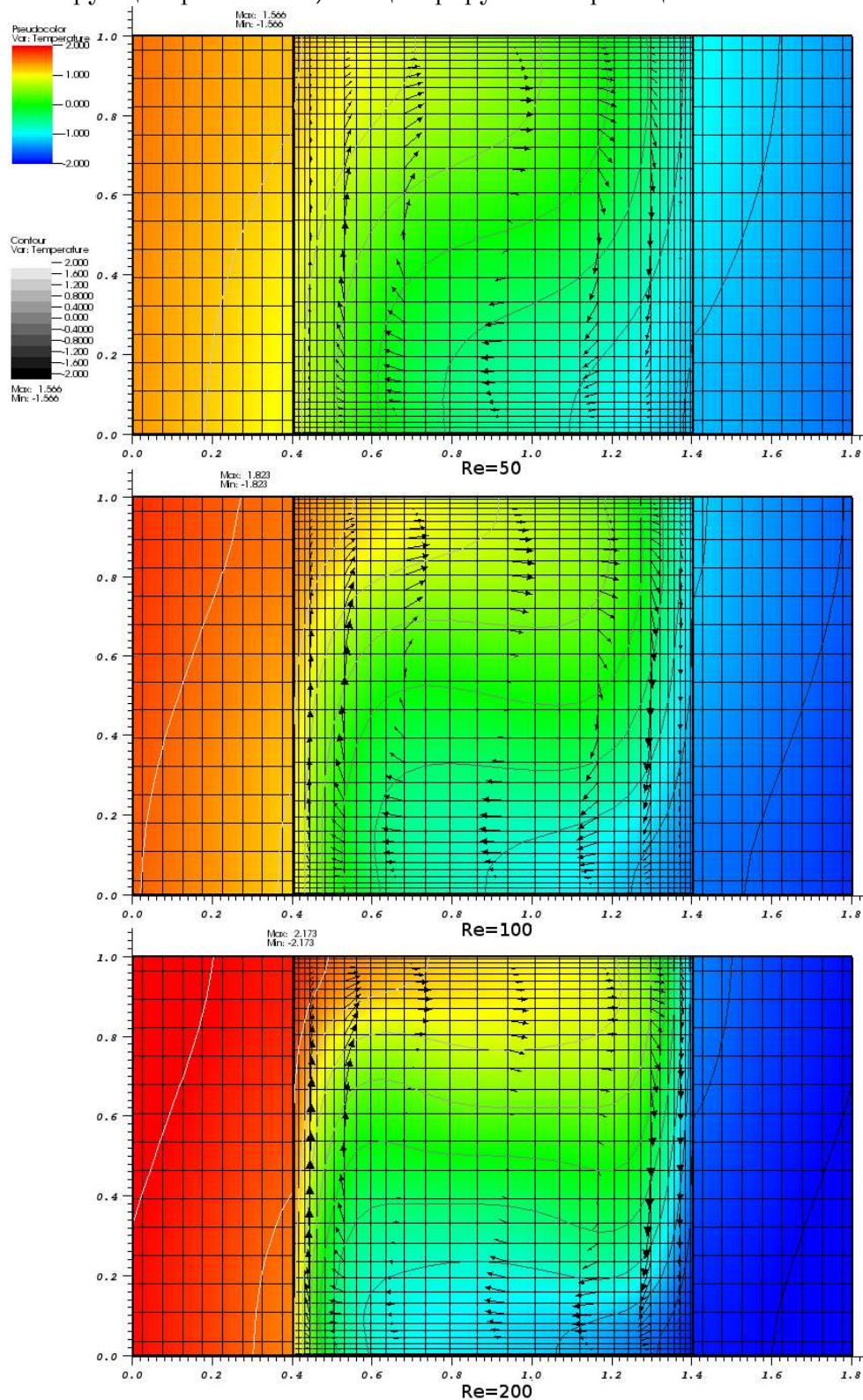


Рис. 1. Векторные поля скорости и изолинии температуры

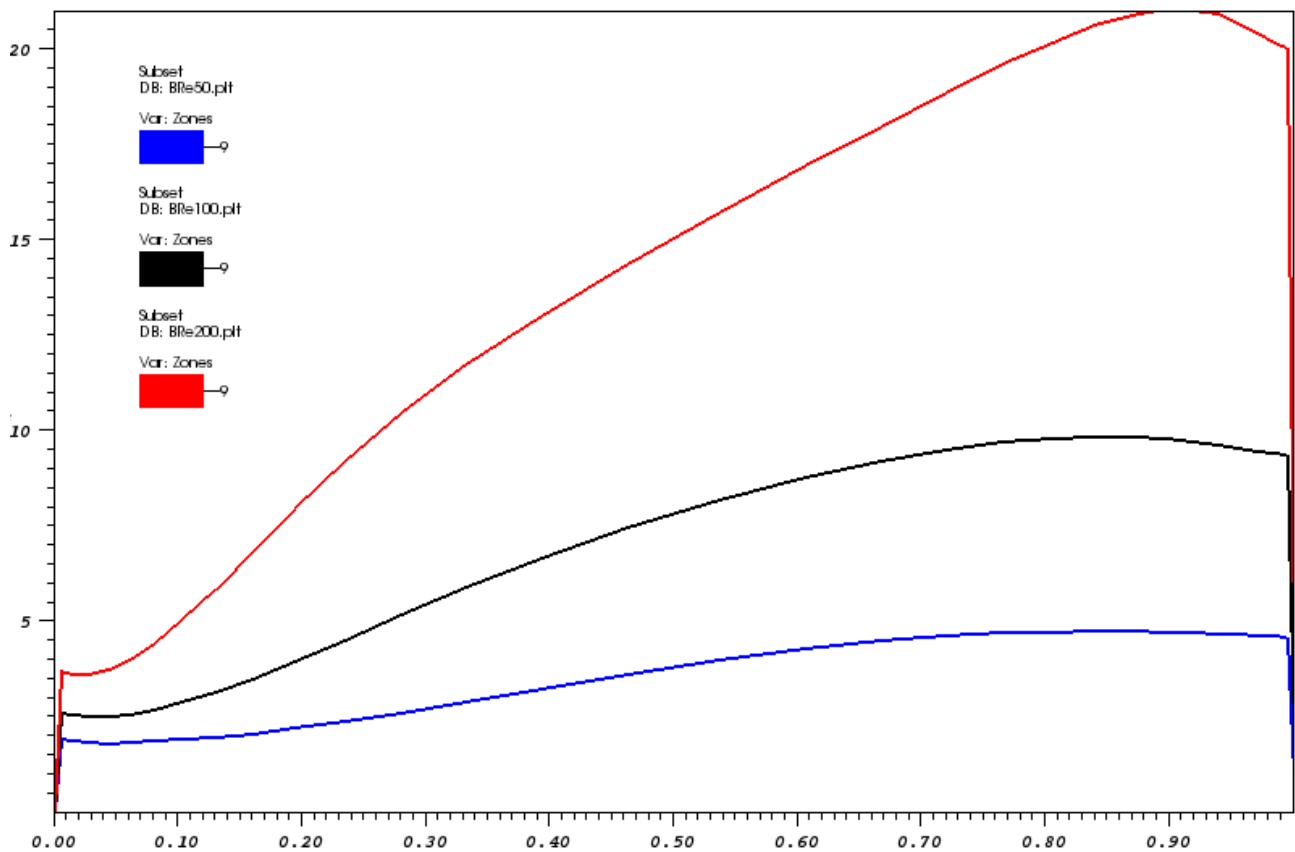


Рис. 2. Распределения коэффициента теплоотдачи (левая стенка сверху вниз)

Изолинии в стеновых блоках отклоняются от вертикали за счёт температурной стратификации жидкости (у основания как одного, так и другого она холоднее, чем у верхней части). На середине жидкого блока, где потоки охлаждённой и нагретой среды движутся по горизонтали, изолинии температуры также близки к горизонтальным. Видно, что во всех случаях перепад температур (т. е. тепловое сопротивление) в основном приходится на жидкость.

По результатам расчёта можем определить числа Грасгофа как  $Gr = Re^2 \Delta T / \Delta T_s$  (см. табл.), где  $\Delta T$  – разность средних температур поверхностей теплообмена твёрдых блоков с жидким.

Вдоль пластин местное число Нуссельта  $Nu = q_w H / \Delta T$  принимает различные значения (рис. 2): имеет большее значение в месте удара горизонтального потока (снизу на горячей стороне, сверху на холодной) и меньшее в месте поворота вертикального. Это обусловлено в основном сближением температуры пристенных слоёв с температурой стенки к концу пути вдоль неё; если бы стенка была тоньше, неравномерность  $q_w$  была бы меньше, однако увеличилась бы неравномерность температуры стенки по высоте (следствие из граничного условия  $q = \text{const}$ ).

Представляют интерес средние значения этих параметров

$$\langle Nu \rangle = \langle q_w \rangle H / \Delta T = \frac{1}{\Delta T} \int_0^H q_w(y, x=0.4) dy = \left[ \int q_x dy \right]_{x=\text{const}} = \frac{qH}{\Delta T}.$$

Для среднего коэффициента теплопередачи известен ряд эмпирических формул, например, таких, как следующие:

$$\langle Nu \rangle = 0,231 (GrPr)^{0,25}, \quad (1)$$

$$\langle Nu \rangle = 0,18 \left( \frac{GrPr^2}{0.2 + Pr} \right)^{0,28}. \quad (2)$$

Т а б л и ц а . Результаты расчётов

Число Рейнольдса	50	100	200
Средняя температура на границе жидкого блока ( $x = 0,4$ )*	1,085	1,326	1,6658
Средняя температура при $x = 0$	1,478	1,719	2,0586
Число Грасгофа Gr	5425	26520	133264
Среднее число Нуссельта по численному расчёту	1,61	2,64	4,2
$\langle Nu \rangle$ по (1)	1,81	2,7	4,04
$\langle Nu \rangle$ по (2)	1,69	2,63	4,13

## Выводы

В ходе работы были проанализированы эффекты свободной конвекции в ограниченном пространстве между нагреваемой и охлаждаемой пластинами конечной толщины. Для определения чисел Nu и Gr были подсчитаны средние температуры на стенках полости. Результаты расчёта теплообмена согласуются с корреляционными зависимостями (1, 2) до второго знака. В данной задаче рассматривается случай ламинарной циркуляции по одному контуру (без дробления на вихри из-за взаимодействия встречных потоков, что бывает при узких щелях), и он может быть приблизительно описан формулой для безграничных пластин [1].

## Литература

1. Б. Н. Юдаев. Теплопередача. – М., 1981.

---

\* Блок центрально-симметричен в (x,y,T)-координатах (положительной нормированной температуре слева вверху соответствует обратная ей отрицательная справа внизу); в работе приводятся положительные значения.