

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого  
Высшая школа теоретической механики и математической физики,  
Физико-механический институт

Отчет по лабораторной работе №3  
тема «Свободноконвективный пограничный слой»  
**дисциплина «Гидродинамика»**  
**Вариант 0.**

Выполнил студент гр. 5030103/00301

Качевская О.А.

Преподаватель:

Левченя А.М.

## Содержание

1. Постановка задачи.....	3
2. Ход работы.....	14
3. Результаты.....	14
4. Заключение .....	14

## 1. Постановка задачи.

Выполнить расчет стационарного ламинарного течения несжимаемой жидкости в начальном участке плоского канала для разных значений числа Рейнольдса; сопоставить расчетные длину начального участка и коэффициент сопротивления развитого течения с результатами аналитического решения.

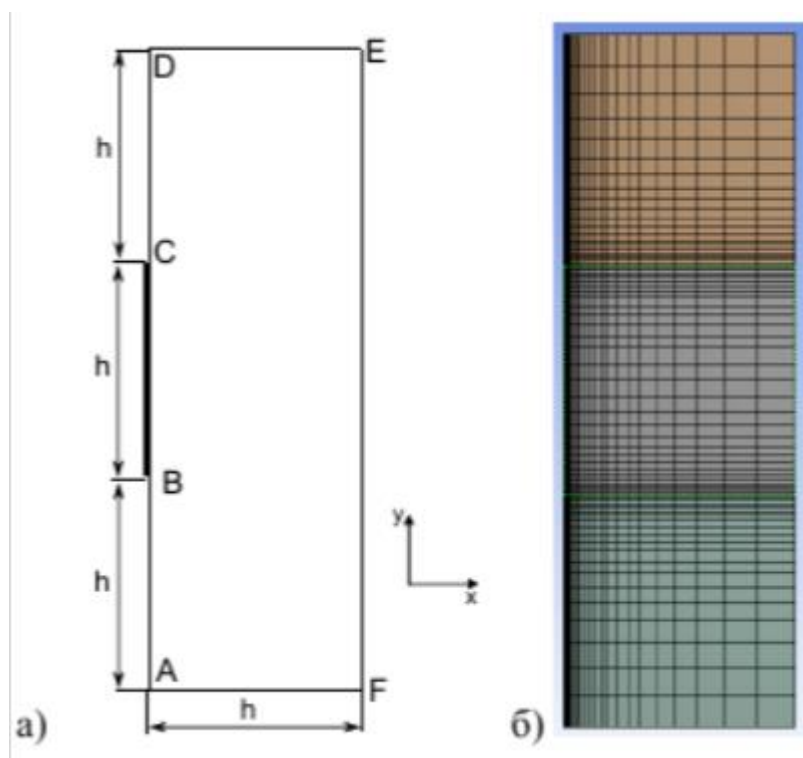


Рис. 1. Расчетная область для исследования(а) и сетка для исследования свободноконвективного пограничного слоя(б).

На рисунке представлена расчетная область ADEF, построенная для расчета течения вертикальной пластины BC, длиной  $h = 0.1$  м. Горизонтальные границы расчетной области AF и DE отнесены на расстояние  $h$  от нижней и верхней кромок пластины соответственно. Также на расстоянии  $h$  вправо от пластины стоит граница EF.

Температура внешней среды  $T_a = 20$  °C, температура пластины  $T_w = 60$  °C, ускорение свободного падения рассматриваем на Земле  $g = -9.81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ .

Рассматриваемый флюид – воздух – имеет следующие параметры:

$$\rho = 1.250 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\beta = \frac{1}{T_a} \frac{1}{^\circ\text{C}}$$

$$\Delta T = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\mu = 1.8 * 10^{-5} \text{ кг/м * с}$$

$$C_p = 1006 \text{ Дж/кг * К}$$

$$\lambda = 0.0259 \text{ Вт/м * К}$$

$$\nu = 1.5 * 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$$

## 2. Ход работы.

Для начала выполним построение расчетной области. В режиме Sketching рисуется область в соответствии с рис.0. Сконструировать расчетную область из трех квадратов  $0.1 \times 0.1$  м. Для удобства последующей обработки результатов рекомендуется обеспечить начало физических координат в точке В.

В режиме Modeling область преобразовывается в поверхность (Concept / Create Surfaces from Sketches в режиме Frozen). Сгенерированные тела в дереве объектов объединить в общую деталь с помощью контекстного меню, выделив их, с помощью команды Form New Part.

Далее построим сетку. В модуле Mesh строится одноблочную расчетную сетку, примерный вид которой показан на рисунке 0б. Расчетная сетка должна обеспечивать сгущение к поверхности пластины, а также к ее нижней и верхней кромкам.:

- Для расстановки узлов в ANSYS Meshing на границе используется опция Sizing/Definition/Type/Number of Divisions.
- Сгущение к стенкам задается настройкой Sizing/Advanced/Bias Option: Smooth Transition, в режиме Sizing/Advanced/Behavior/Hard.
- Коэффициент сгущения выставляется с помощью Sizing/Advanced/Bias Growth Rate.
- а. Задать на линии ВС и напротив сгущение к кромкам пластины (30 ячеек  $\times 1.15$ ).
- б. Задать на линиях АВ, CD и напротив сгущение к кромкам пластины (20 ячеек,  $\times 1.15$ ).
- с. Задать на линиях AF, DE и между ними сгущение к пластине (30 ячеек,  $\times 1.2$ ).
- Тип сеточных элементов задаётся методом генерации сетки Automatic Method/Method/Quadrilateral Dominant

- С помощью настройки Face Meshing/Method/Quadrilaterals обеспечивается структура hexa-сетки.
- Сетка сгущается у стенок канала и в окрестности входа. Количество узлов на сегментах (каждое ребро состоит из одного сегмента) и коэффициенты сгущения для базовой сетки задаются в соответствии со значениями, приведенными в табл.1.
- Определяется именованный регион (Model/Named Selections/Create) для линий, обозначенных на рис.0а для возможности постановки граничного условия далее.

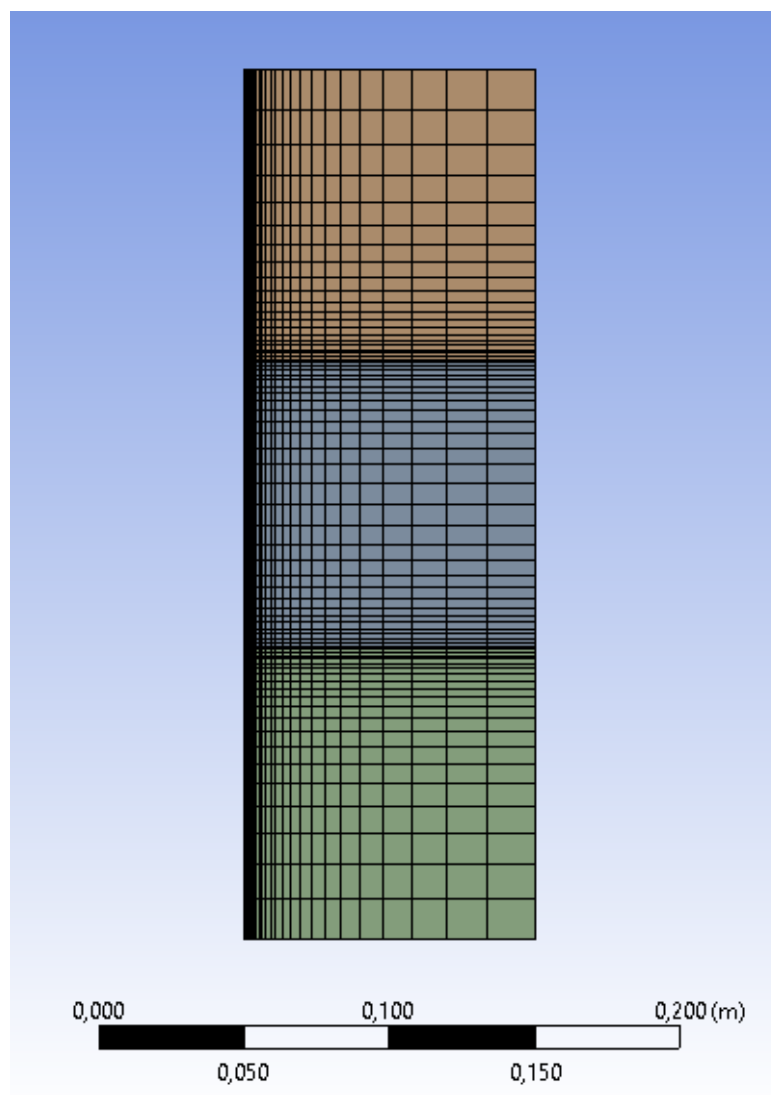


Рис. 2. Сетка для расчетной области.

Далее выполним постановку параметров расчетного модуля.

- Моделируется ламинарное течение с помощью Models / Viscous(Laminar).
- Задать единицей измерения температуры градусы Цельсия (Define / Units... Temperature – c).
- Параметры свойства другой среды (ртути) с помощью Setup / Materials / Fluid: Ввести учет эффектов плавучести (Density – boussinesq, величину плотности следует указывать после выбора приближения Буссинеска в качестве закона ее изменения).
- Задать граничные условия (рис.0а):
  - i. Линия BC – пластина (Wall: No-Slip, Thermal / Temperature  $T_w=25.5\text{ C}$ ,  $22.5\text{ C}$ ,  $20.5\text{ C}$ ).
  - ii. Линии AB, CD – симметрия (Symmetry).
  - iii. Линия AF – стенка с проскальзыванием (Wall: Specified Shear = 0 Па).
  - iv. Линия EF – эжекция (вход), реализуется через условие выхода (Pressure Outlet: Gauge Pressure = 0 Па) со свободным направлением обратного течения (Backflow Direction Specification Method: From Neighboring Cell) и заданием температуры внешней среды (Thermal / Total Backflow Temperature  $T_a = 20\text{C}$ ).
  - v. Линия DE – выход, реализуется как EF, но с направлением течения по умолчанию, по нормали к границе.
- Установить основные характеристики течения (Boundary Conditions / Operating Conditions):
  - i. Учесть силу тяжести (Gravity,  $Y = -9.81\text{ м/с}^2$ ).
  - ii. Задать характерную температуру среды для корректного вычисления силы плавучести (Operating Temperature =  $T_a$ ).

### 3. Результаты.

В первую очередь необходимо проанализировать влияние на расчеты изменение числа Грасгофа ( $Gr$ ) при заданном числе Прандтля, при этом число Грасгофа должно попадать в диапазон  $10^4 - 10^8$ .

Вариант	Среда	$Pr_1$	$Gr_1$	Варьировать	Советы
0	Воздух	0.7	$5.9 \cdot 10^6$	Gr за счет $\Delta T$	Учитывать, что свойства среды правильно определять при т.н. температуре пленки $T_f = (T_a + T_w)/2$
1	Вода	7	$1.7 \cdot 10^7$		
2	Ртуть	0.025	$1.4 \cdot 10^8$		

По тогу получаем следующую таблицу:

	1	2	3
$T_w$	25.5	22.5	20.5
$T_f$	22.75	21.75	20.25
$\Delta T$	5.5	2.5	0.5
$Gr$	1.2E+07	5.9E+06	1.09E+06

Далее определим распределения температур и вертикальных компонент вертикальных компонент векторов скорости.



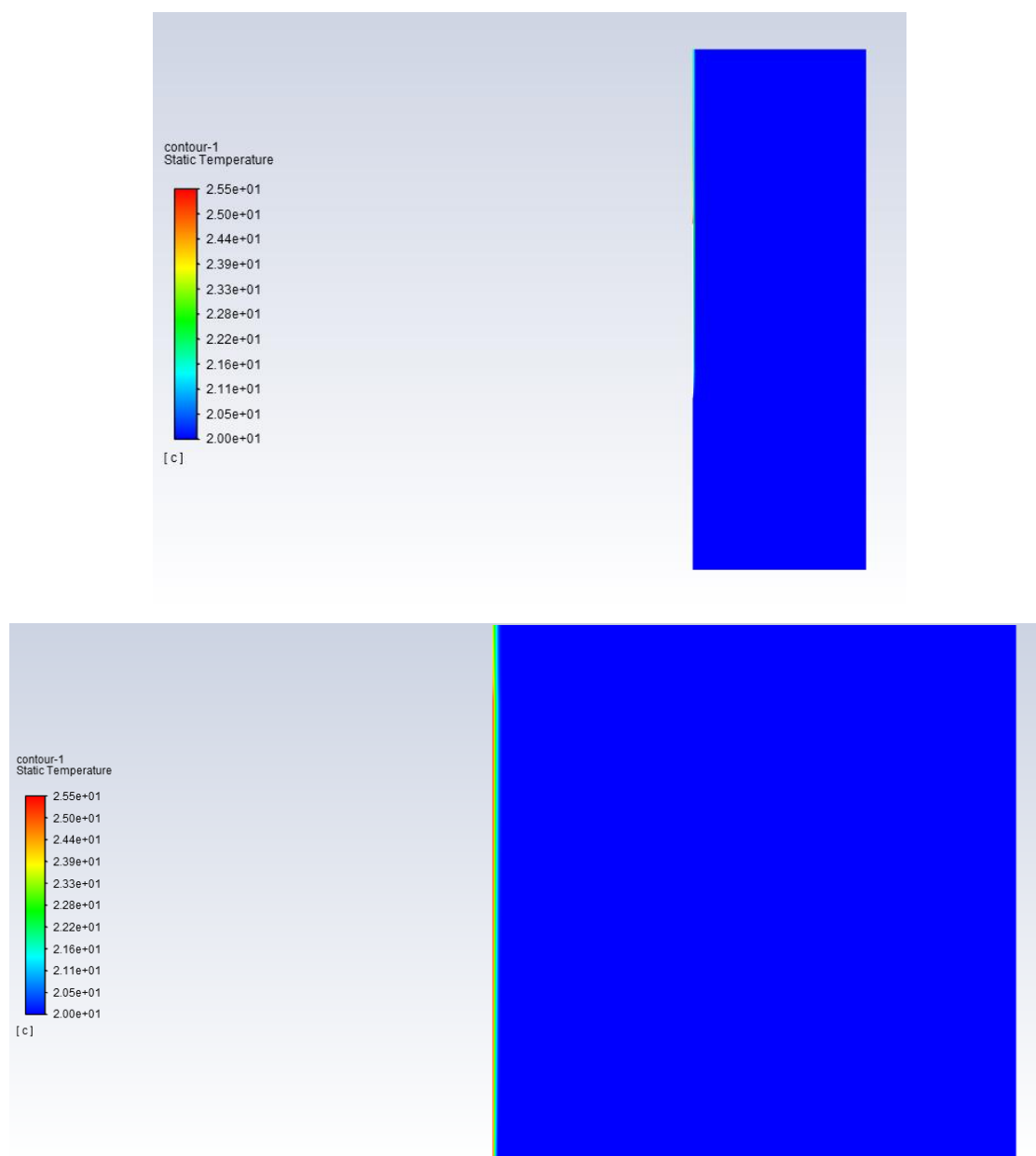


Рис. 3. Распределение температур для Gr1

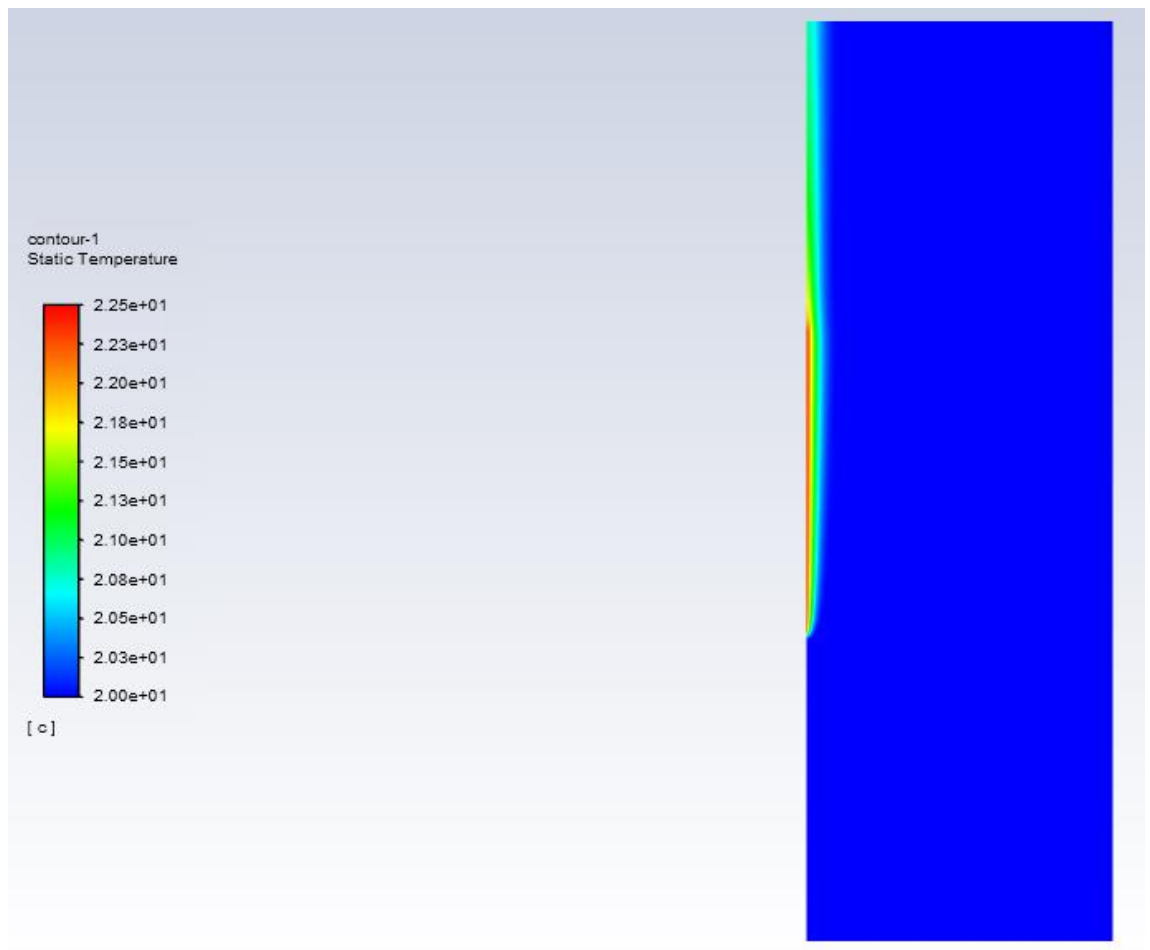


Рис. 4. Распределение температур для Gr2

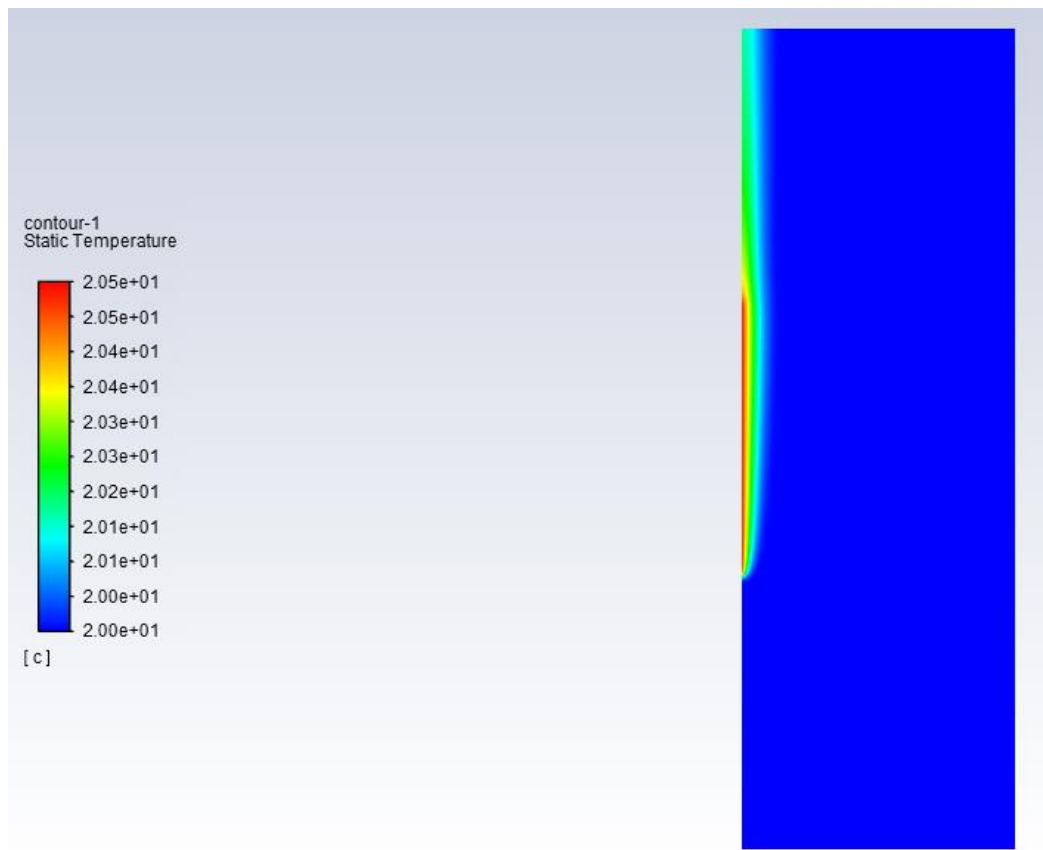


Рис. 5 Распределение температур для Gr3

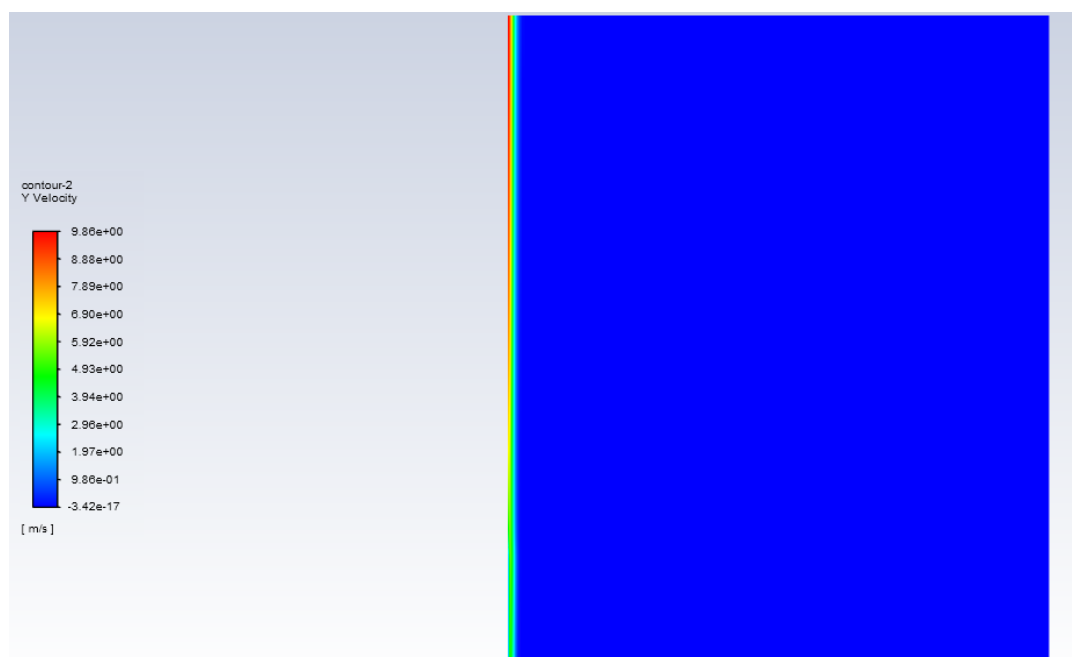
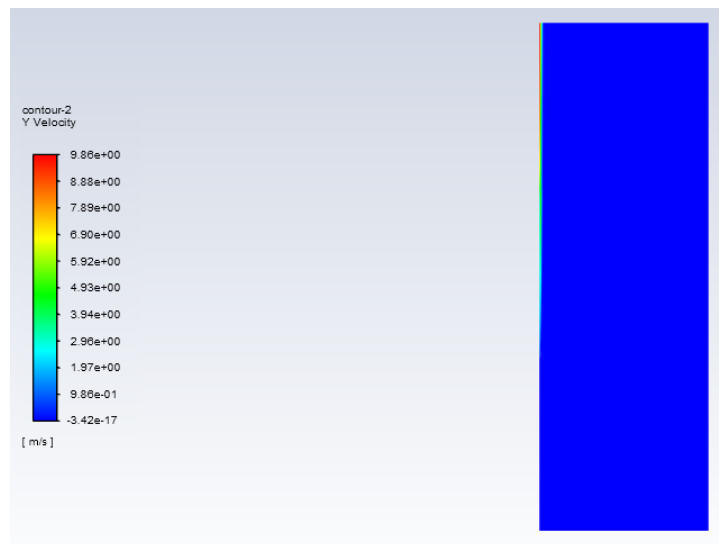


Рис. 6. Распределение вертикальной компоненты скорости для Gr1

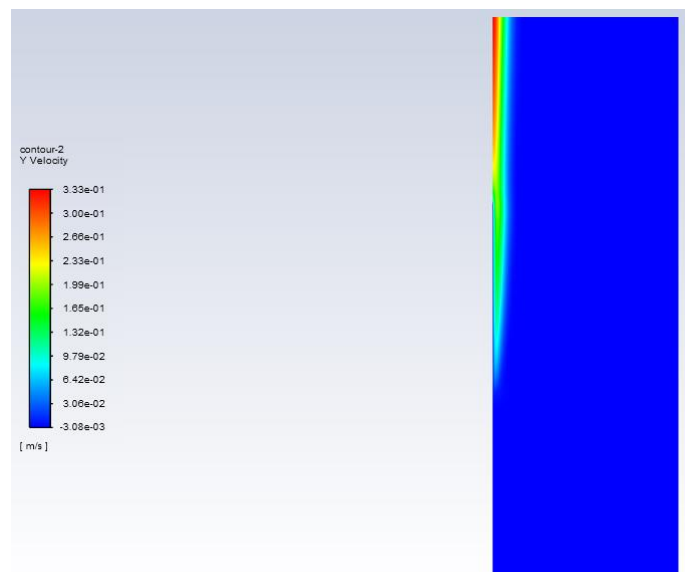


Рис. 7. Распределение вертикальной компоненты скорости для Gr2

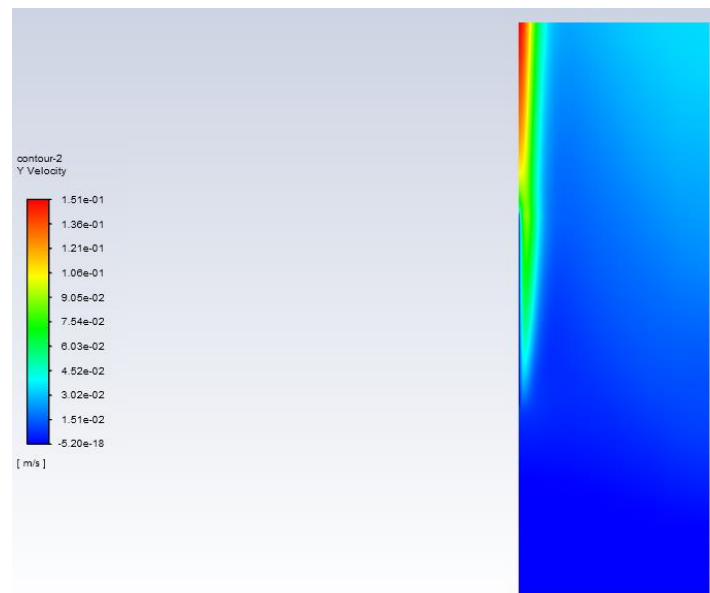


Рис. 8. Распределение вертикальной компоненты скорости для Gr3

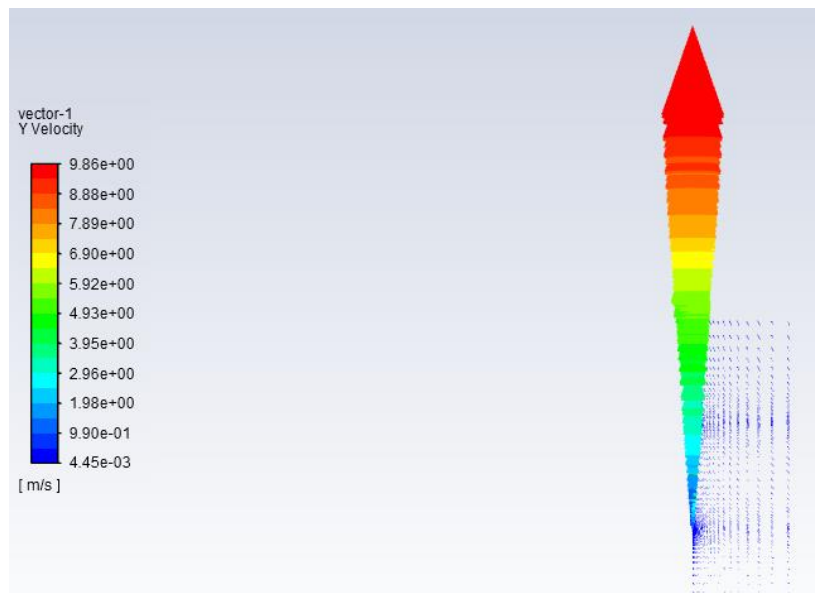


Рис. 9. Распределение векторов скорости для Gr1

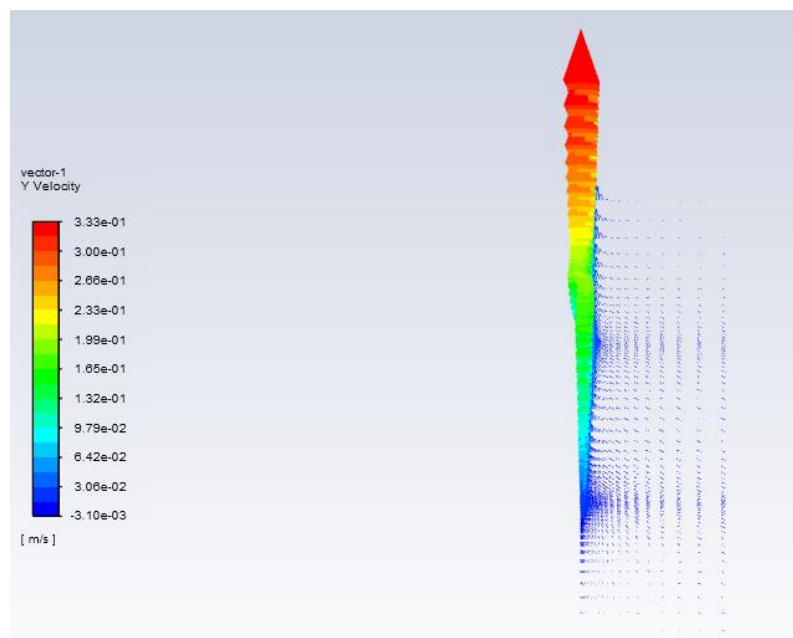


Рис. 10. Распределение векторов скорости для Gr2

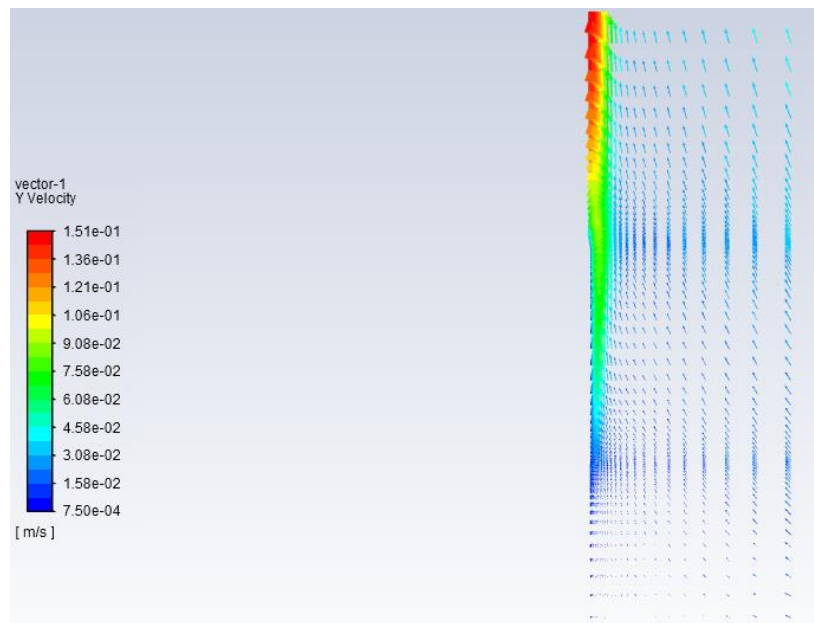


Рис. 11. Распределение векторов скорости для Gr3

Также для трех горизонтальных сечений  $y/h = 0.1, 0.5, 0.9$  построить профили температуры и вертикальной компоненты скорости в окрестности поверхности пластины.

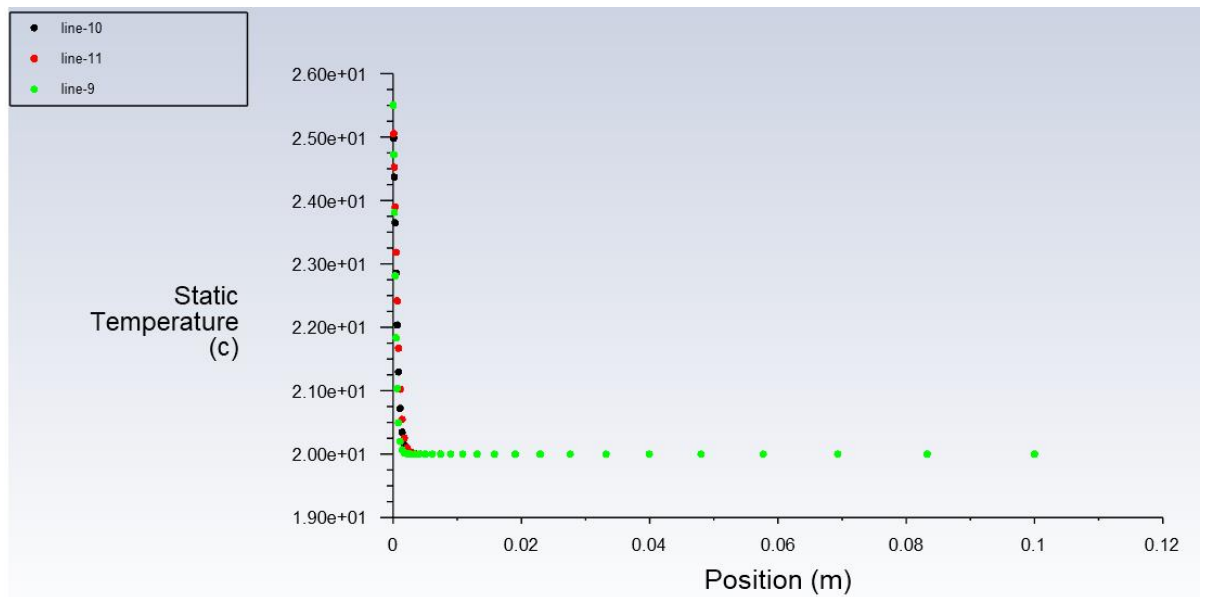


Рис. 12. Графики температур для Gr1 на срезах  $y/h = 0.1, 0.5, 0.9$

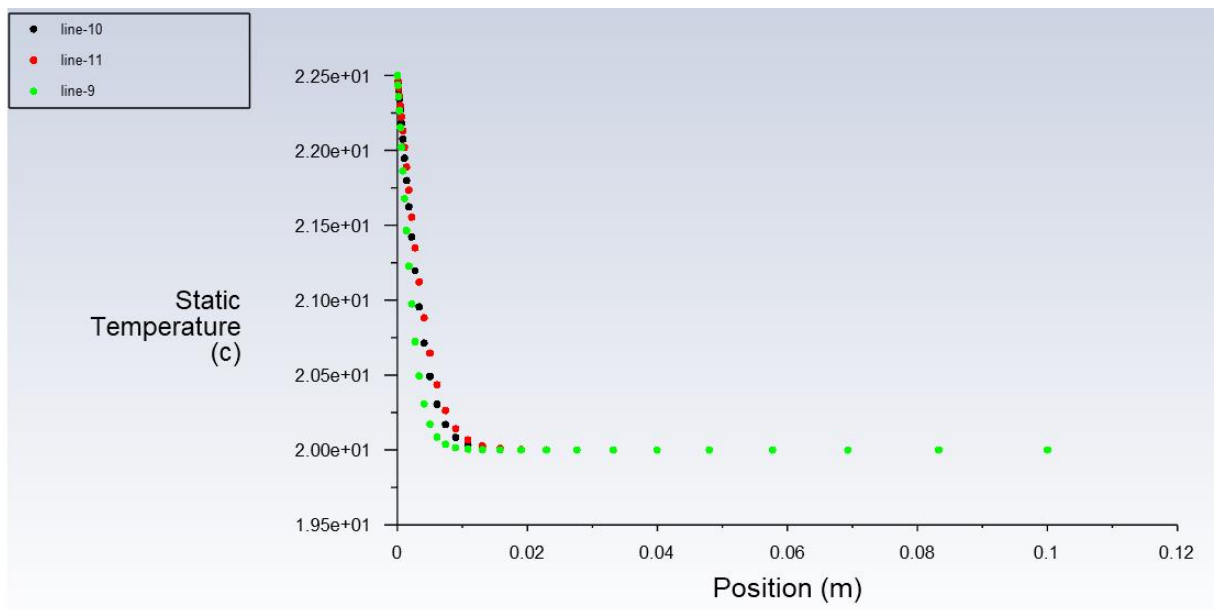


Рис. 13. Графики температур для Gr2 на срезах  $y/h = 0.1, 0.5, 0.9$

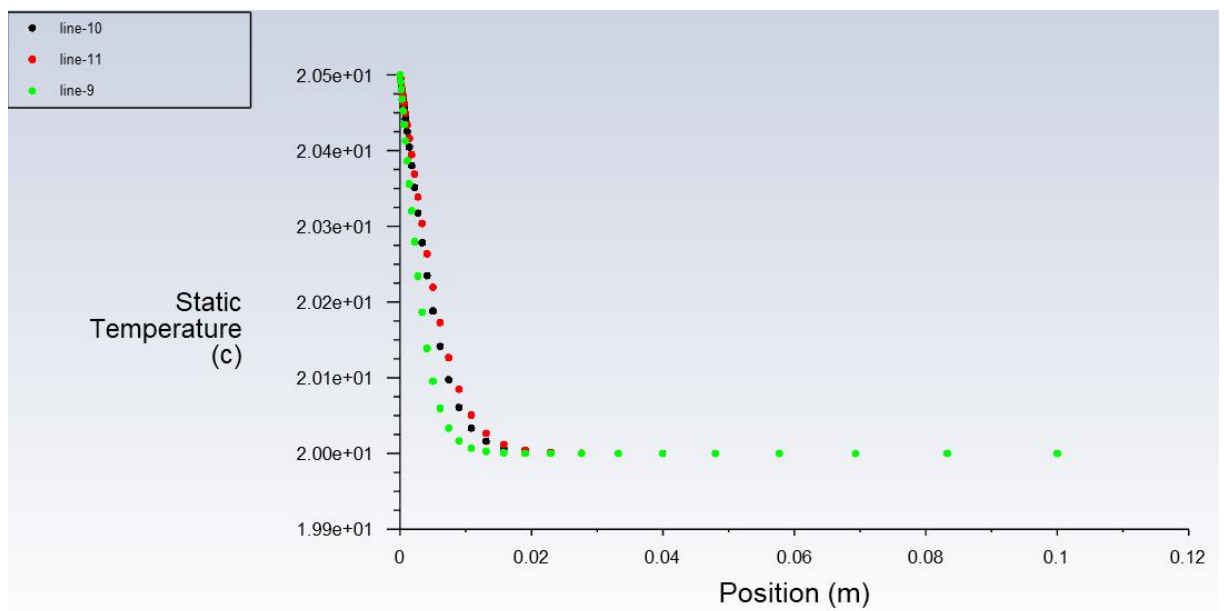


Рис. 14. Графики температур для Gr3 на срезах  $y/h = 0.1, 0.5, 0.9$



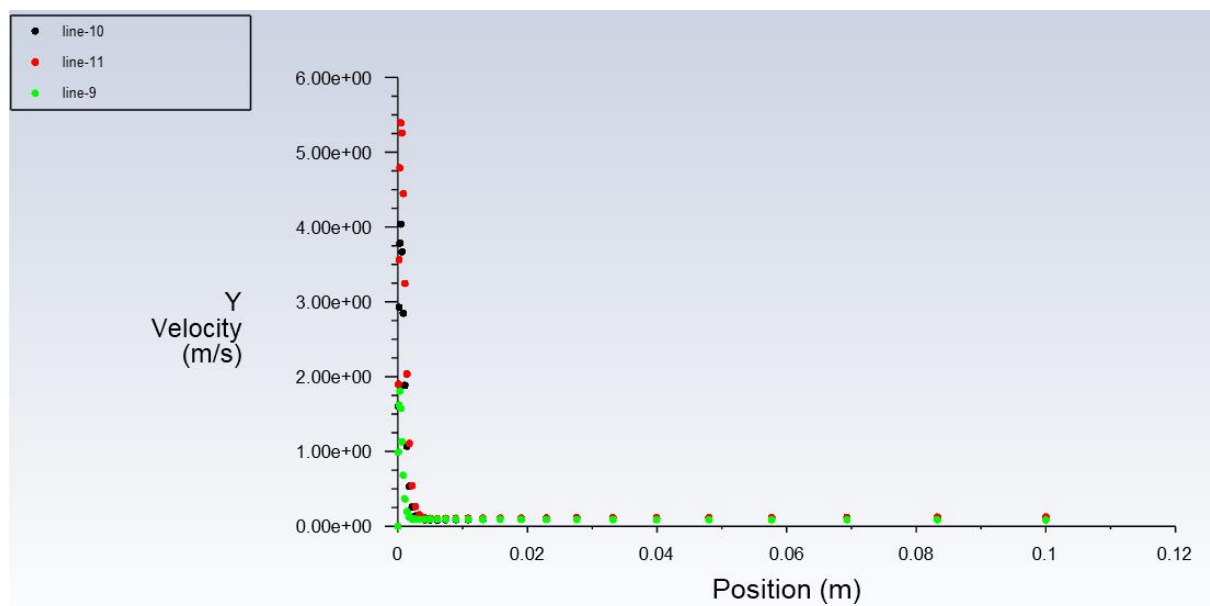


Рис. 15. Графики вертикальной компоненты для Gr1 на срезах  $y/h = 0.1, 0.5, 0.9$

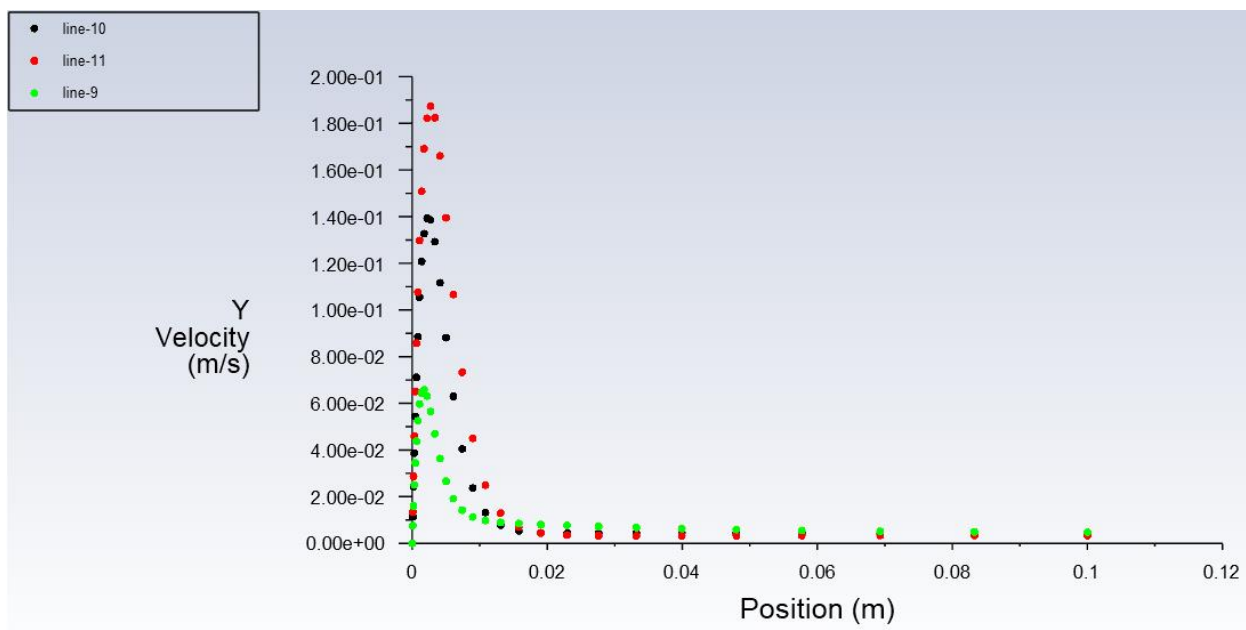


Рис. 16. Графики вертикальной компоненты для Gr2 на срезах  $y/h = 0.1, 0.5, 0.9$

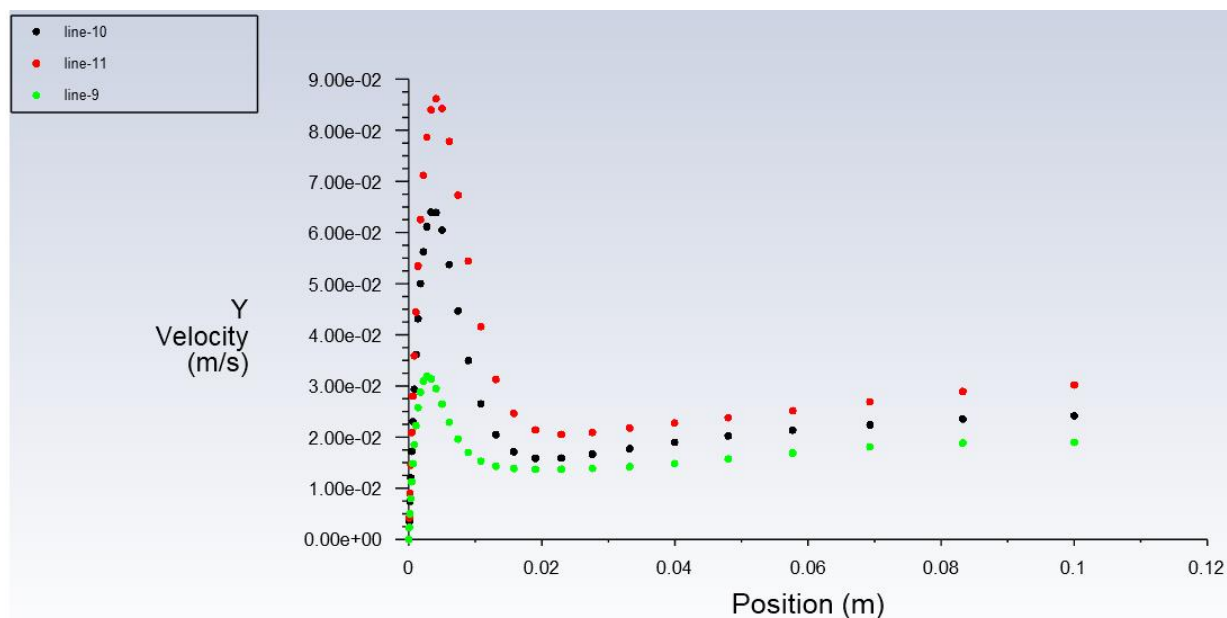


Рис. 17. Графики вертикальной компоненты для Gr3 на срезах  $y/h = 0.1, 0.5, 0.9$

Определим средние (Mass-weighted average) угол наклона (Velocity / Velocity Angle) и величину скорости на правой проницаемой границе, а также максимум скорости на верхней границе расчетной области. Сопоставить уровни скоростей со скоростью плавучести, вычисленной по формуле  $V_b = (g\beta\Delta Th)^{\frac{1}{2}}$ .

	Gr1	Gr2	Gr3
средний угол на правой проницаемой границе	176.4878	119.8916	114.2037
значение скорости на правой проницаемой границе	0.1358	0.03255	0.02314
максимум скорости на верхней границе	0.986	0.333	0.151
скорость плавучести	0.5193	0.3501	0.156

И в самом конце сопоставим полученное в результате расчета распределение локального числа Нуссельта вдоль пластины с автомоделным и эмпирическим решениями.

Локальное число Нуссельта вдоль пластины вычисляется по формуле:

$$Nu_y = \frac{yq_w}{\lambda\Delta T},$$

Где  $q_w$  – тепловой поток на пластине.

Автомоделное решение имеет вид:

$$Nu_{auto} = H(Pr) * Ra_y^{\frac{1}{4}}$$

Эмпирическая формула имеет вид:

$$Nu_{empir} = 0.6 * \left[ 1 + \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{Pr}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$Ra_y = Pr * g\beta Ty^3 / \mu^2$$

$$H(Pr) = \frac{3}{4} \left[ \frac{2Pr}{5(1 + 2\sqrt{Pr} + 2Pr)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

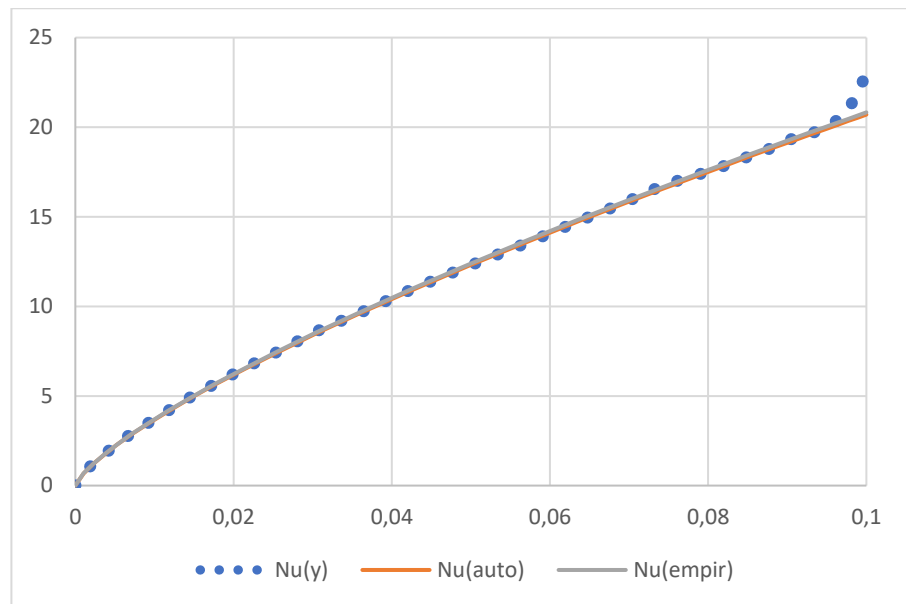


Рис. 18. Графики чисел Нуссельта для  $Gr_1$

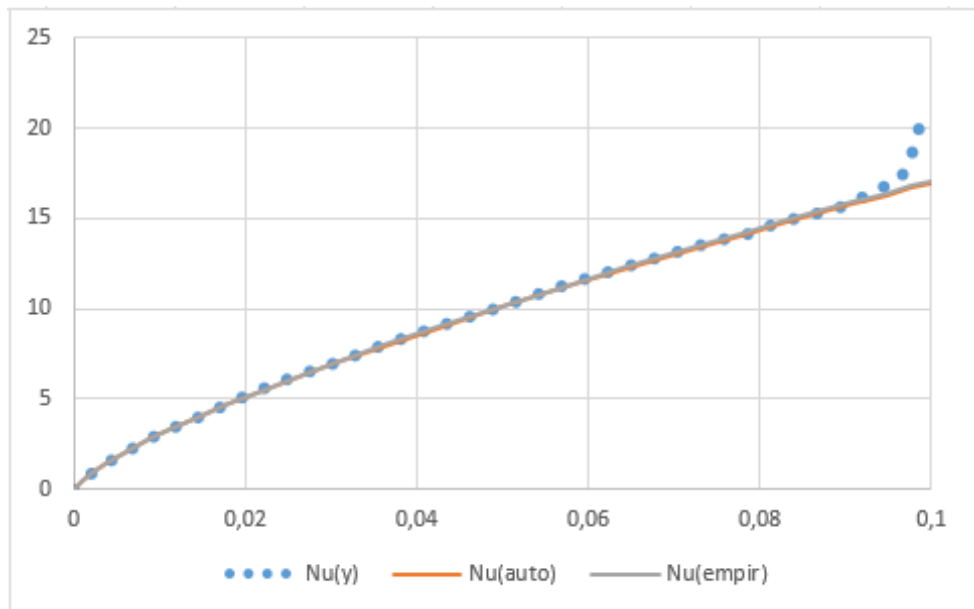


Рис. 19. Графики чисел Нуссельта для  $Gr_2$

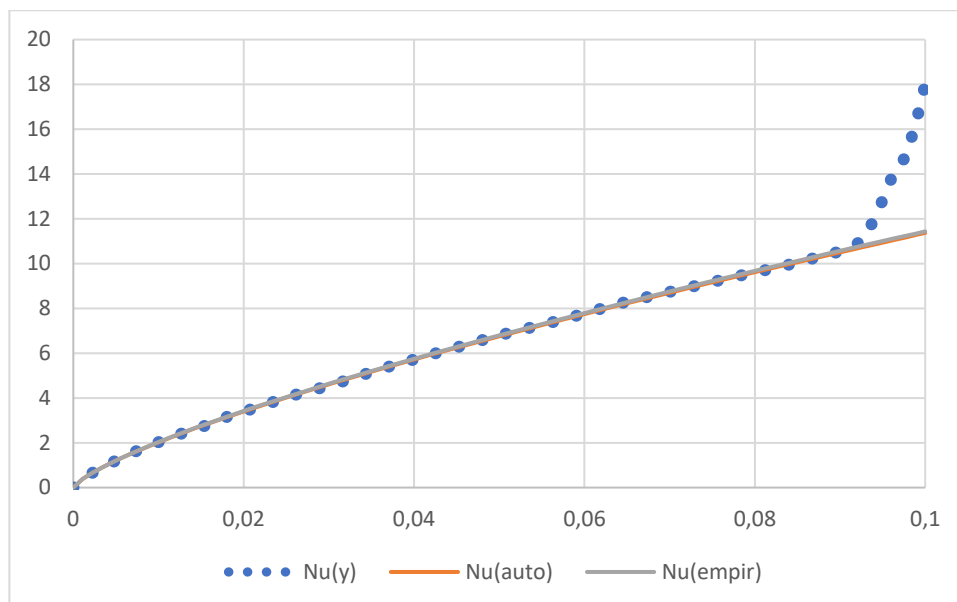


Рис. 19. Графики чисел Нуссельта для Gr<sub>3</sub>

#### 4. Заключение.

В вычислительной работе исследовалось влияние на результаты расчетов изменения числа  $Gr$  за счет варьирования  $T_w$ . Анализ результатов доказал их логичность и физическую корректность. Сравнение результатов с литературой, в которой решались аналогичные задачи, доказали правильность расчётов.