

# ВЕРИФИКАЦИЯ FLOWVISION ВЕРСИИ 3.08. ЧАСТЬ 2.

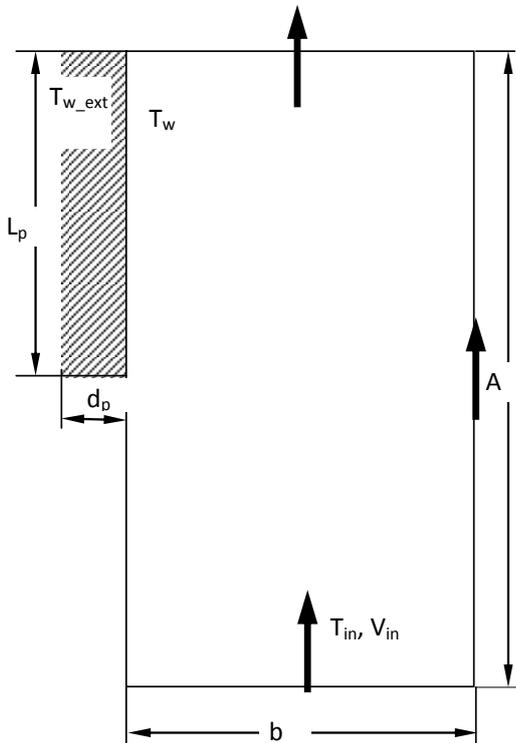
А.С. Шишаева, С.В. Жлуктов, П.И. Карасев

ООО ТЕСИС, г. Москва, 2011

## 1. Ламинарное обтекание пластины

### Постановка задачи

2D



<b>Параметры геометрии:</b>		
$L_p$	1	м
$b$	1	м
$L$	2	м
<b>Параметры вещества:</b>		
$\rho_f$	1000	кг м <sup>-3</sup>
$\mu_f$	0.001	кг м <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>
$\lambda_f$	0.6	Вт м <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>
$c_{p,f}$	4217	Дж кг <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>
<b>Входные параметры:</b>		
$V_{in}$	0.005	м с <sup>-1</sup>
$T_{in}$	0	С
<b>Параметры тонкой стенки:</b>		
$T_w$	20	С
<b>Параметры толстой стенки:</b>		
$T_{w\_ext}$	100	С
$\rho_{p,p}$	7900	кг м <sup>-3</sup>
$\lambda_p$	1	Вт м <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>
$c_p$	45	Дж кг <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>
$d_p$	0.05	м

### Параметры геометрии:

Длина пластины:

$L_p$

Поперечный размер толстой пластины:

$d_p$

### Граничные параметры:

Скорость потока:

$V_{in}$

Температура потока:

$T_{in}$

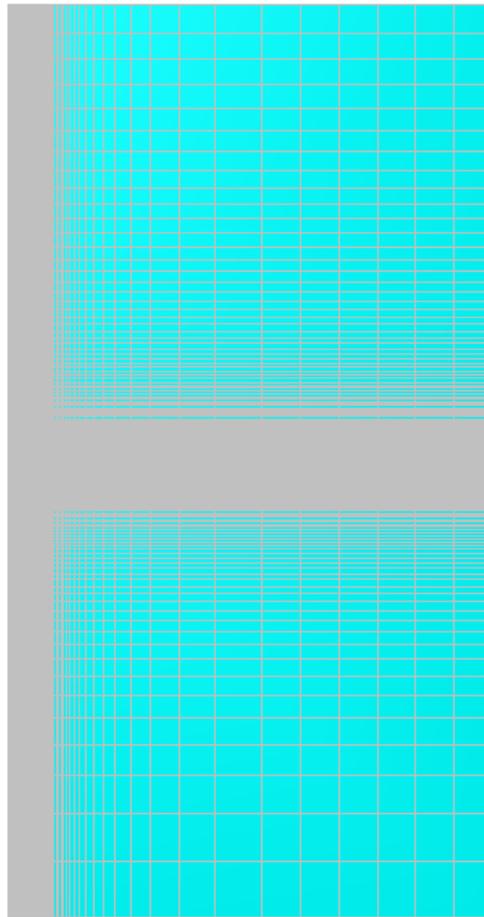
Температура тонкой пластины:

$T_w$

Температура внешней стенки  
толстой пластины:

$T_{w\_ext}$

## Расчетная сетка



Расчетная сетка 65x150x1.  
Общее количество расчетных ячеек 9700

## Теория

Средний коэффициент сопротивления [1]:

$$c_L = \frac{1.328}{\sqrt{Re_L}}$$

Средний коэффициент теплоотдачи [2]:

$$Nu_L = 0.66 Re_L^{0.5} Pr^{0.33}$$

Температура на внутренней поверхности толстой стенки:

$$T_w = \frac{\lambda_p T_{w\_ext} L_p + Nu_L \lambda_f T_{in} d_p}{Nu_L \lambda_f d_p + \lambda_p L_p}$$

## Результаты:

### Результаты для тонкой стенки

Величина	Теория	Погрешность расчета, %
$Nu_L$	88.8	-4.1
$C_L$	0.0188	-3.2

### Результаты для толстой стенки

Величина	Теория	Погрешность расчета, %
$T_w$	27.29	+2.85
$Nu_L$	88.8	-6
$C_L$	0.0188	-3.2

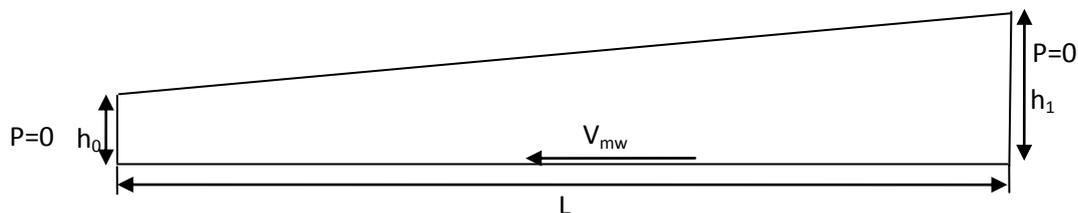
## Ссылки

1. Шлихтинг Г., «Теория пограничного слоя», М. 1974
2. Михеев М. А., Михеева И.М. «Основы теплопередачи», М., 1977

## 2. Ламинарное течение в сужающемся канале подшипника

### Постановка задачи

2D



#### Граничные условия:

Давление на концах канала: атмосферное

#### Параметры геометрии:

Длина нижней горизонтальной стенки канала:  $L$

Высота левой стенки канала:  $h_0$

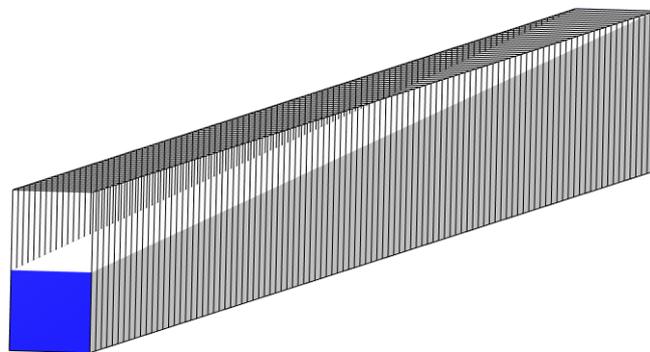
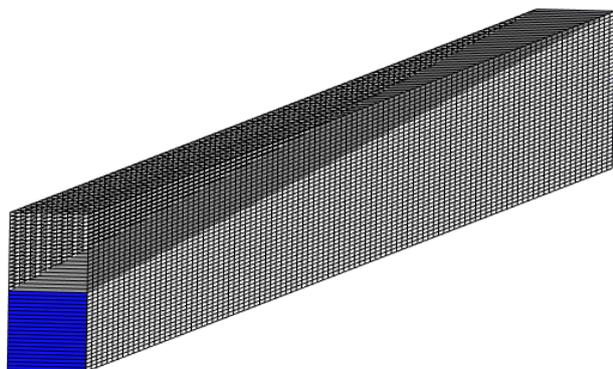
Высота правой стенки канала:  $h_1$

#### Граничные параметры:

Скорость нижней стенки канала:  $V_w$

<b>Геометрия:</b>		
$L$	0.5	м
$h_0$	0.01	м
$h_1$	0.02	м
<b>Свойства жидкости:</b>		
$\rho$	1000	кг м <sup>-3</sup>
$\mu$	0.01	кг м <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>
<b>Скорость движения стенки:</b>		
$V_{mw}$	0.01	м с <sup>-1</sup>

### Расчетная сетка



#### Нет модели зазора:

Расчетная сетка 100x40x1

Общее количество ячеек 3000

#### Есть модель зазора

Расчетная сетка 100x1x1

Общее количество ячеек 1000

## Теория

$$k = \frac{h_1}{h_0} - 1$$

Распределение давления в канале [1]:

$$P(x) = P_0 + \frac{6\mu LV_{mw}}{h_0^2 k} \left( \frac{L}{L+kx} - \frac{1}{2+k} - \frac{1+k}{2+k} \frac{L^2}{(L+kx)^2} \right)$$

Координата точки, в которой давление достигает максимума [1]:

$$x_m = \frac{L}{k+2}$$

Высота канала в точке, где давление достигает максимума [1]:

$$h_m = 2h_0 \frac{k+2}{k+1}$$

Расход в канале [1]:

$$Q = \frac{\rho V h_m z}{2} = \rho V h_m z \frac{k+2}{k+1}$$

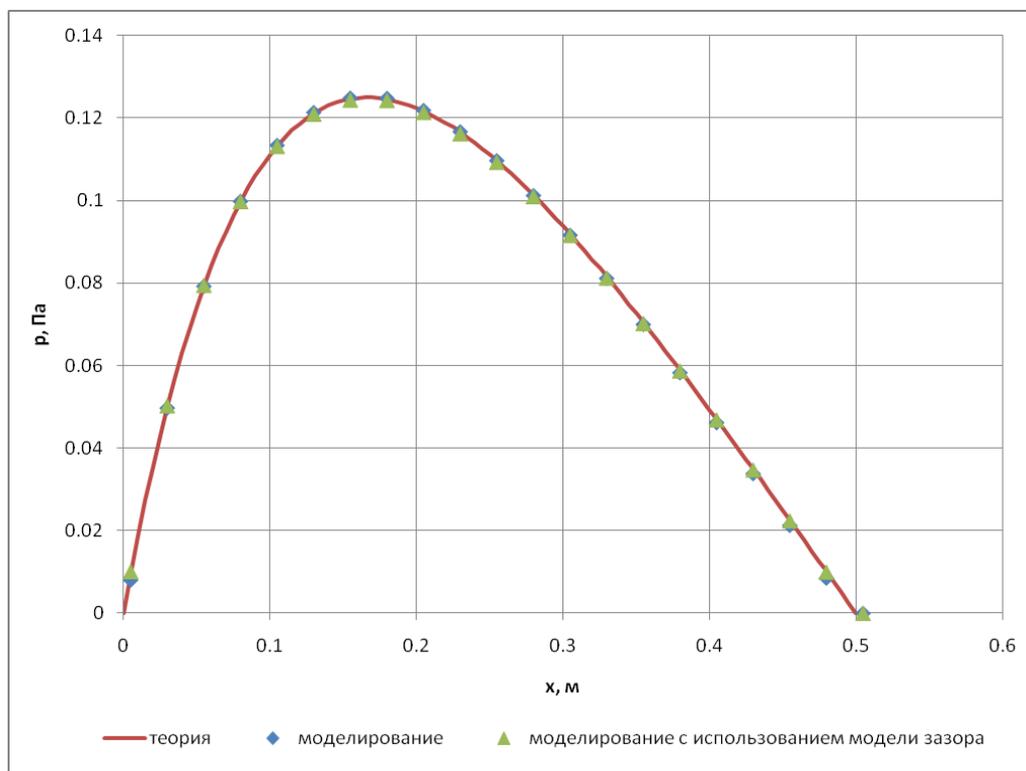
Подъемная сила, действующая на верхнюю стенку [1]:

$$F_{y,w} = \frac{6\mu V L^2 z}{k^2 h_0^2} \left( \ln(1+k) - \frac{2k}{k+2} \right)$$

Сила сопротивления, действующая на верхнюю стенку [1]:

$$F_{x,w} = \frac{\mu V L z}{h_0} \left( \frac{4}{k} \ln(1+k) - \frac{6}{k+2} \right)$$

## Результаты



Распределение давления в канале вдоль оси X

	Теория	Погрешность расчета, %	Погрешность расчета с моделью зазора, %
$Q, \text{ кг с}^{-1}$	6.666e-4	+0.06	+1
$F_{y,w}, \text{ Н}$	3.972e-4	+0.03	+0.3
$F_{x,w}, \text{ Н}$	-3.86e-5	-0.004	+2.8

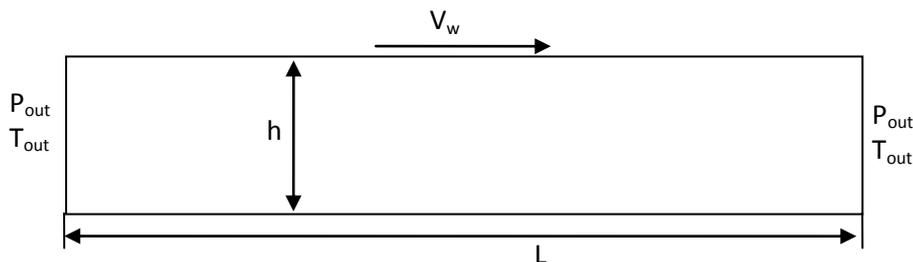
## Ссылки

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа . – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003

### 3. Ламинарное течение Куэтта с учетом тепловыделения за счет трения

#### Постановка задачи

2D



<b>Геометрия:</b>		
L	0.5	м
h	0.0001	м
<b>Свойства жидкости:</b>		
$\rho$	1000	кг м <sup>-3</sup>
$\mu$	0.01	кг м <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>
$\lambda$	0.6	Вт м <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>
$c_p$	4000	Дж кг <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>
<b>Граничные условия:</b>		
$V_w$	1	м с <sup>-1</sup>
$T_{out}$	0	С

#### Граничные условия:

Давление на концах канала: атмосферное

#### Параметры геометрии:

Длина канала L  
Высота канала h

#### Граничные параметры:

Скорость верхней стенки канала:  $V_w$   
Температура на концах канала:  $T_{out}$

#### Расчетная сетка

Равномерная

#### Нет модели зазора

Расчетная сетка 50x40x1

Общее число ячеек 3000

#### Есть модель зазора

Расчетная сетка 50x1x1

Общее число ячеек 50

#### Теория

Средняя скорость в канале:

$$V_{av} = \frac{V_{mw}}{2} = 0.5 \text{ м}$$

Напряжение трения на подвижной стенке:

$$\tau_{mw} = \frac{\mu V_{mw}}{h} = -0.005 \text{ Па}$$

Напряжение трения на неподвижной стенке:

$$\tau_w = \frac{\mu V_{mw}}{h} = 0.005 \text{ Па}$$

Максимальная разница температуры на входе и в канале:

$$\Delta T = \frac{2\mu L V_{mw}}{h^2 \rho c_p} = 0.25 \text{ С}$$

#### Результаты

	Теория	Погрешность	Погрешность расчета с
--	--------	-------------	-----------------------

		расчета, %	моделью зазора, %
$V_{av}, \text{ м с}^{-1}$	0.5	0	0
$\tau_{mw}, \text{ Па}$	0.005	0	0
$\tau_w, \text{ Па}$	-0.005	0	0
$\Delta T, \text{ С}$	0.25	-0.9	-0.3

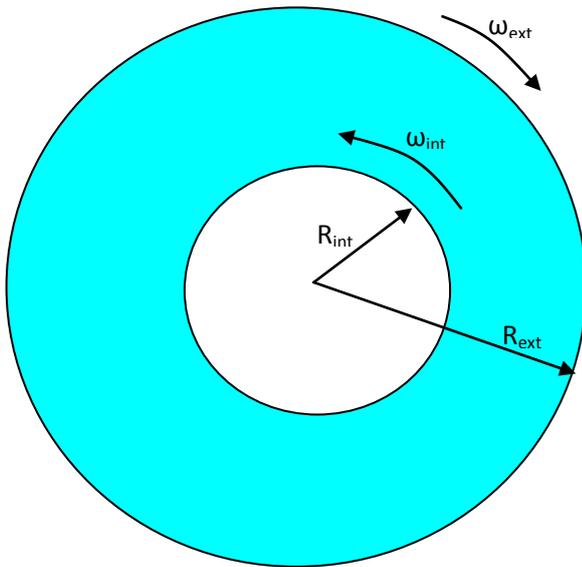
### Ссылки

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа . – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003.
2. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. “Теплопередача”, Энергия, 1965.

## 4. Ламинарное течение между двумя вращающимися цилиндрами

### Постановка задачи

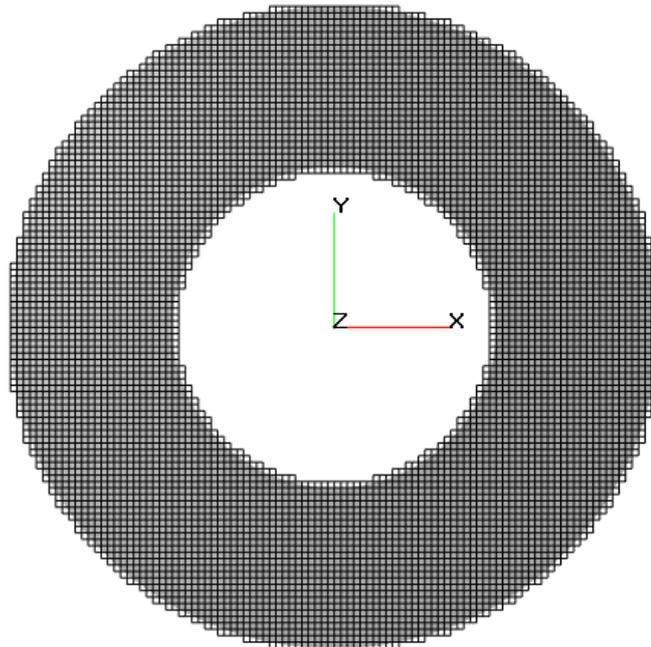
2D



<b>Геометрия:</b>		
$R_{ext}$	2	м
$R_{int}$	1	м
<b>Свойства жидкости:</b>		
$\rho$	1000	кг м <sup>-3</sup>
$\mu$	100	кг м <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>
<b>Граничные условия:</b>		
$\omega_{ext}$	1	м с <sup>-1</sup>
$\omega_{int}$	-1	м с <sup>-1</sup>
<b>Безразмерные параметры:</b>		
Re	20	

Два вложенных цилиндра с радиусами  $R_{int}$  и  $R_{ext}$  вращаются с угловыми скоростями  $\omega_{int}$  и  $\omega_{ext}$  в противоположные стороны. Пространство между цилиндрами заполнено жидкостью, которая увлекается вслед за цилиндрами.

### Расчетная сетка



Расчетная сетка 100x100x1  
Общее число ячеек 6000

### Теория

Профиль скорости [1]:

$$V(R) = \frac{1}{R} \frac{\omega_{int} - \omega_{ext}}{R_{int}^{-2} - R_{ext}^{-2}} + R \frac{\omega_{int} R_{int}^2 - \omega_{ext} R_{ext}^2}{R_{int}^2 - R_{ext}^2}$$

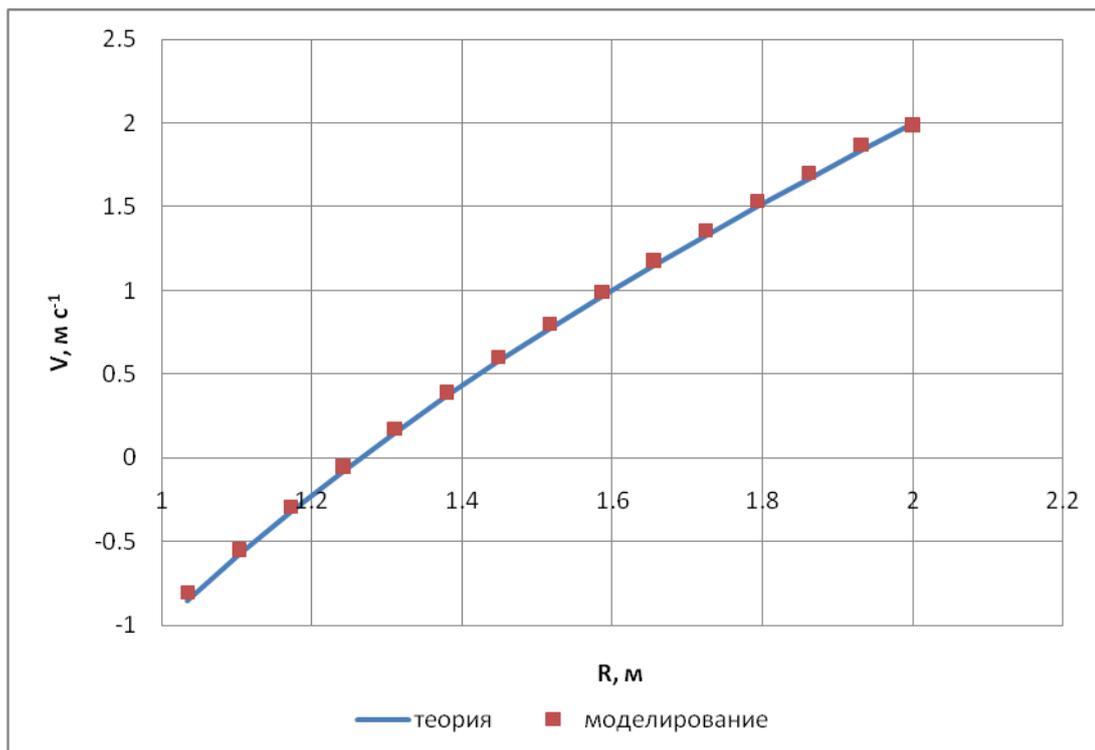
Момент сил на поверхности цилиндра [1]:

$$M_{int} = 4\pi\mu d \frac{\omega_{int} - \omega_{ext}}{R_{int}^{-2} - R_{ext}^{-2}}$$

$$M_{ext} = 4\pi\mu d \frac{\omega_{ext} - \omega_{int}}{R_{int}^{-2} - R_{ext}^{-2}}$$

## Результаты

	Теория	Погрешность расчета, %
$M_{int}$ , Н м	334.9	-0.8
$M_{ext}$ , Н м	-334.9	-4.1



Распределение скорости по радиусу между цилиндрами

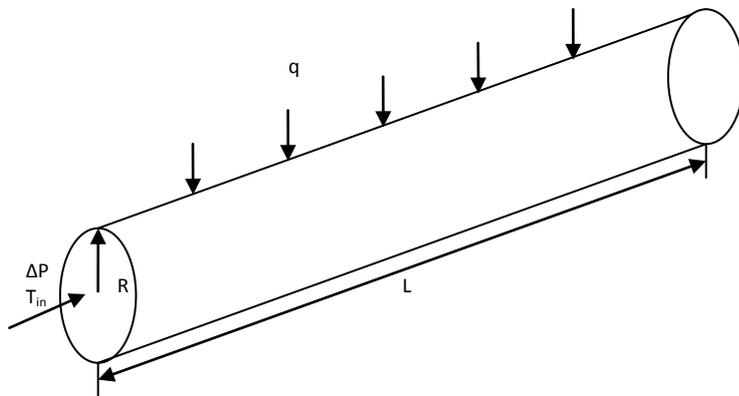
## Ссылки

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа . – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003

## 5. Ламинарное течение в круглой трубе

### Постановка задачи

3D



### Граничные условия:

Вход: статическое давление + температура

Выход: статическое давление

Стенка: постоянный тепловой поток

### Граничные параметры:

Относительное статическое давление на входе  $P_{in}$

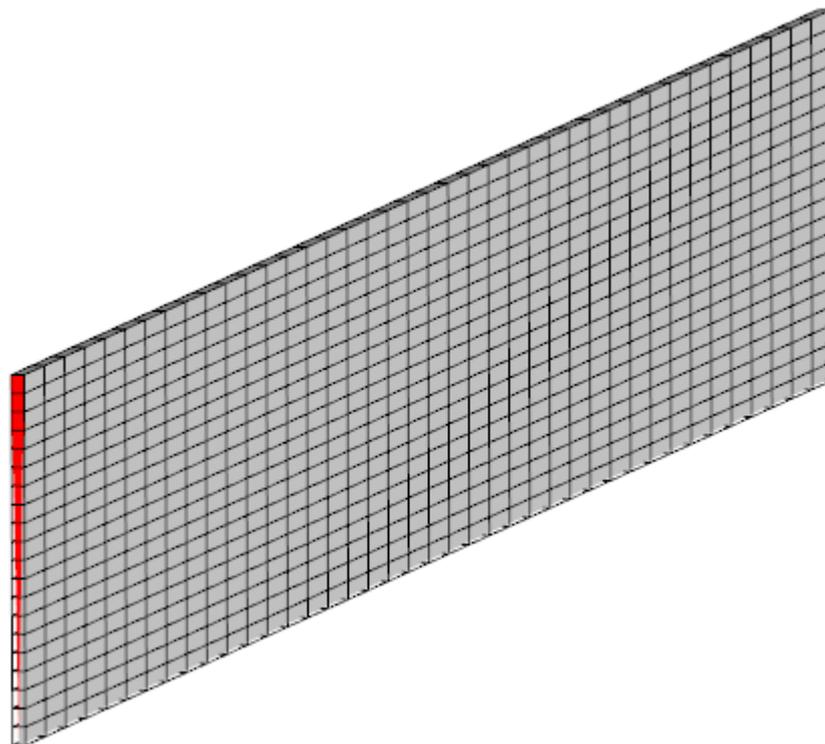
Относительное статическое давление на выходе  $P_{out}$

Относительная температура на входе  $T_{in}$

Постоянный тепловой поток, подводимый к стенке трубы  $q_w$

<b>Геометрия:</b>		
L	0.5	м
R	0.05	м
<b>Свойства жидкости:</b>		
$\rho$	1000	кг м <sup>-3</sup>
$\mu$	0.001	кг м <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>
$\lambda$	0.6	Вт м <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>
$c_p$	4217	Дж кг <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>
<b>Входные параметры:</b>		
$T_{in}$	0	С
$P_{in}$	$1.28 \cdot 10^{-3}$	Па
$P_{out}$	0	Па
$q_w$	1000	Вт м <sup>-2</sup>

## Расчетная сетка



Моделирование проводится на 1-градусном секторе  
Расчетная сетка 1x20x40  
Общее число ячеек 800

## Теория

При  $Re < 3 \cdot 10^3$  зависимость между скоростью и перепадом давления [1]:

$$V_{av} = \frac{R^2 \Delta p}{2\mu L}$$

Профиль скорости [1]:

$$V(r) = 2V_{av} \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$

Температура на выходе:

$$T_{out} = \frac{2qL}{\rho c_p \pi R V} + T_{in}$$

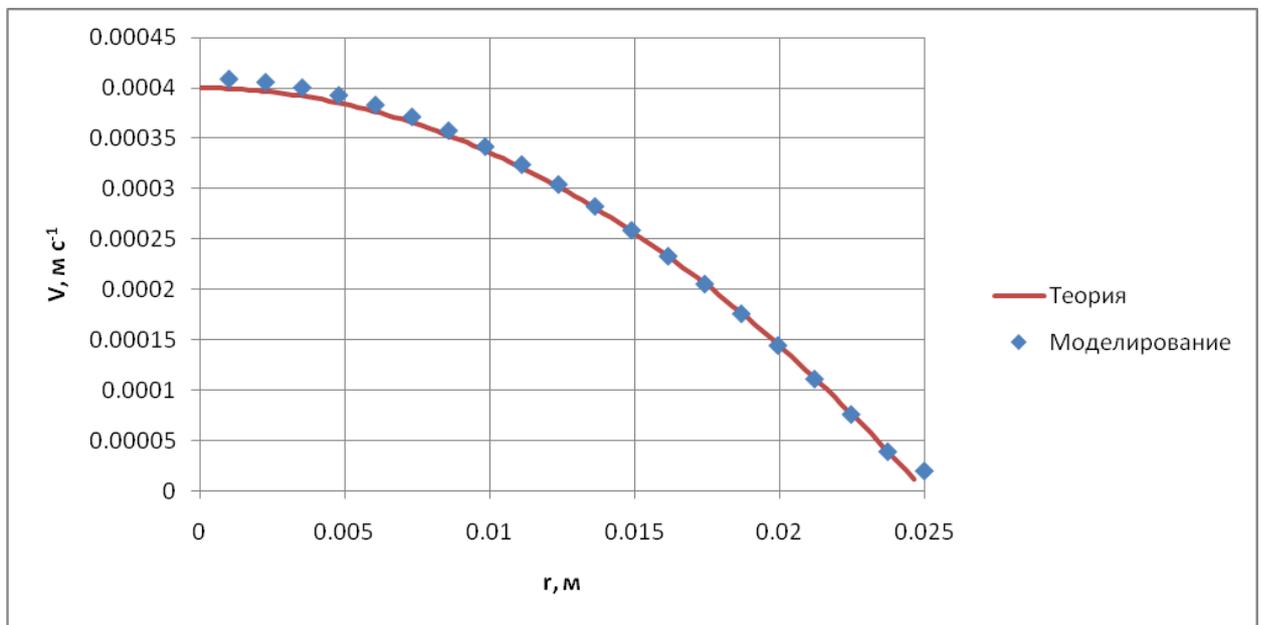
Температура на стенке [2]:

$$T_w = \frac{2rq}{\lambda Nu} + T_{av}$$

$$Nu = 4.36$$

## Результаты

Параметр	Теория	Погрешность расчета, %
$V_{av}, \text{ м с}^{-1}$	0.0002	0
$V_{max}, \text{ м с}^{-1}$	0.0004	-0.13
$T_{out}, \text{ C}$	47.42	0
$T_{wall}, \text{ C}$	66.5	+2



Профиль скорости

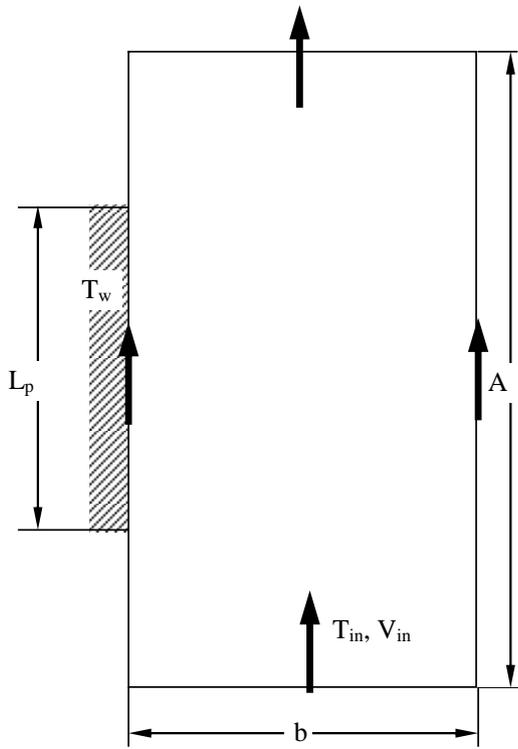
### Ссылки

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа . – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003
2. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. “Теплопередача”, Энергия, 1965.

## 6. Турбулентное обтекание пластины

### Постановка задачи

2D



<b>Геометрия:</b>		
$L_p$	1	м
$B$	1	м
$A$	2	м
<b>Параметры вещества:</b>		
$\rho_f$	1000	кг м <sup>-3</sup>
$\mu_f$	0.001	кг м <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>
$\lambda_f$	0.6	Вт м <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>
$c_{p,f}$	4217	Дж кг <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>
<b>Входные параметры:</b>		
$V_{in}$	1	м с <sup>-1</sup>
$T_{in}$	0	С
<b>Параметры тонкой стенки:</b>		
$T_w$	20	С

### Параметры геометрии:

Длина пластины:  $L_p$

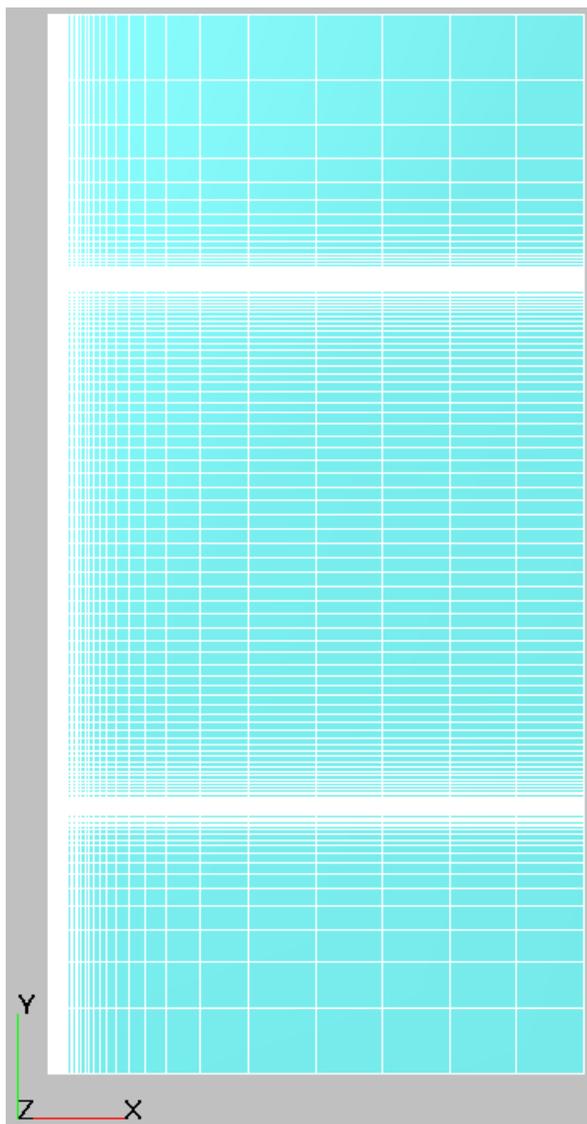
### Граничные параметры:

Скорость потока:  $V_{in}$

Температура потока:  $T_{in}$

Температура пластины:  $T_w$

## Расчетная сетка



Расчетная сетка 37x124x1  
Общее число ячеек 4500

## Теория

Локальный коэффициент сопротивления пластины [1]:

$$c_x = \frac{0.0588}{\sqrt[5]{Re_x}}$$

Средний коэффициент сопротивления пластины [1]:

$$c_L = \frac{0.074}{\sqrt[5]{Re_L}}$$

Средний коэффициент сопротивления второй части пластины:

$$c_{L0.5} = \frac{0.0626}{\sqrt[5]{Re_L}}$$

Локальное число Нуссельда для пластины [2]:

$$Nu_x = 0.03 Re_x^{0.8} Pr^{0.43}$$

Среднее число Нуссельда для пластины [2]:

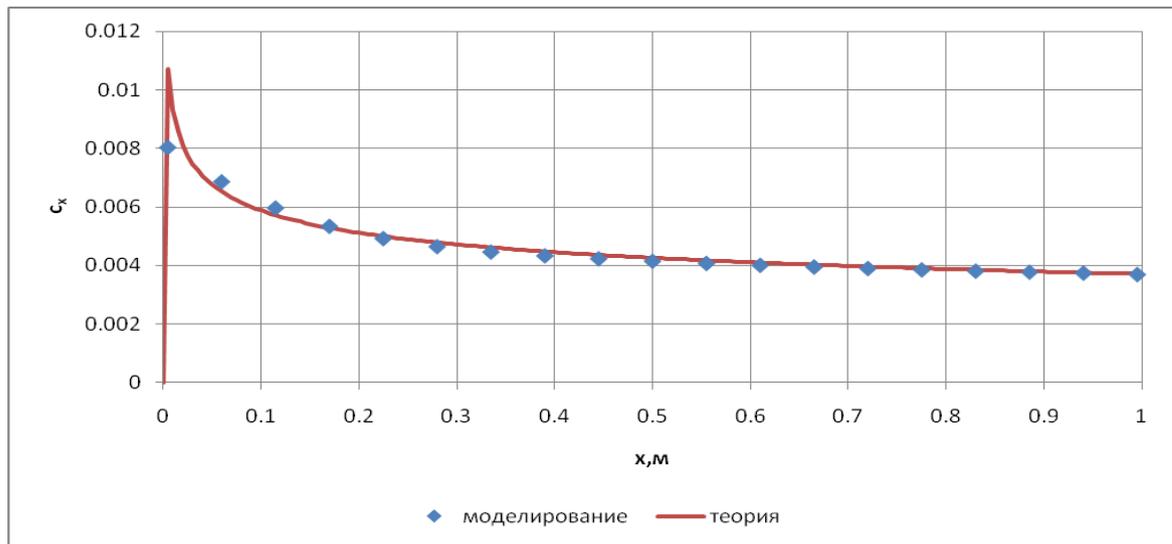
$$Nu_L = 0.037 Re_L^{0.8} Pr^{0.43}$$

Среднее число Нуссельда для второй части пластины:

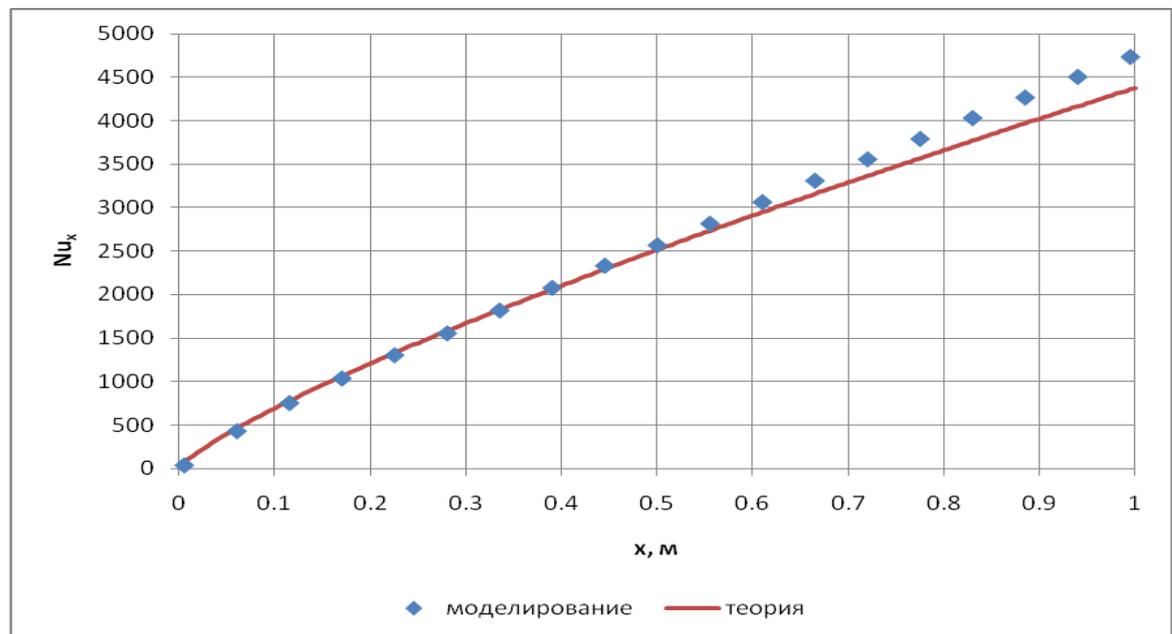
$$Nu_{L,0.5} = 0.032 Re_L^{0.8} Pr^{0.43}$$

### Результаты моделирования

Параметры	Теория	Погрешность расчета, %
$c_{L,0.5}$	0.00395	1.27%
$Nu_{L,0.5}$	4669.781	-5.4%



Локальный коэффициент сопротивления пластины



Локальное значение числа Нуссельда для пластины

### Ссылки

1. Шлихтинг Г., «Теория пограничного слоя», М. 1974
2. Михеев М. А., Михеева И.М. «Основы теплопередачи», М., 1977

## 7. Турбулентное обтекание обратного уступа

### Постановка задачи

2D



#### Параметры геометрии:

Высота обратного уступа  $H$

#### Граничные параметры:

Скорость на входе  $V_{in}$

#### Геометрия:

$H$	1	м
-----	---	---

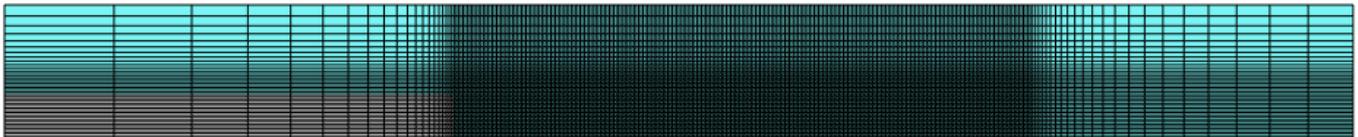
#### Свойства вещества:

$\rho$	1	кг м <sup>-3</sup>
$\mu$	0.0000182	кг м <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>

#### Входные параметры:

$V_{in}$	1.76	м с <sup>-1</sup>
----------	------	-------------------

### Расчетная сетка



Расчетная сетка 299x41x1

Общее количество ячеек 12000

### Результаты

	Эксперимент [1]	Погрешность расчета, %			
		к-ε модель турбулентности	низкорейнольдсовая к-ε модель турбулентности	квадратичная к-ε модель турбулентности	SST модель турбулентности
Размер вихря за уступом	7 H	12.4	-1.2	0.9	0.2

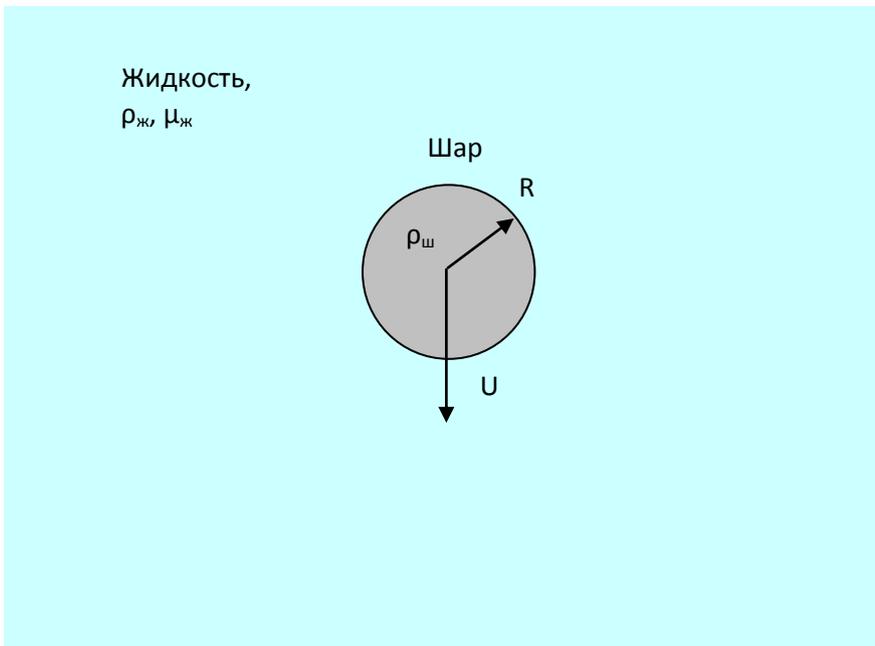
### Ссылки

1. Kim J., Kline S. J., Johnston J. P. Investigation of a Reattachment Turbulent Shear Layer: Flow over a Backward-Facing Step // Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering. 1980. V. 102, P. 302-308.

## 8. Падение шара в вязкой жидкости

### Постановка задачи

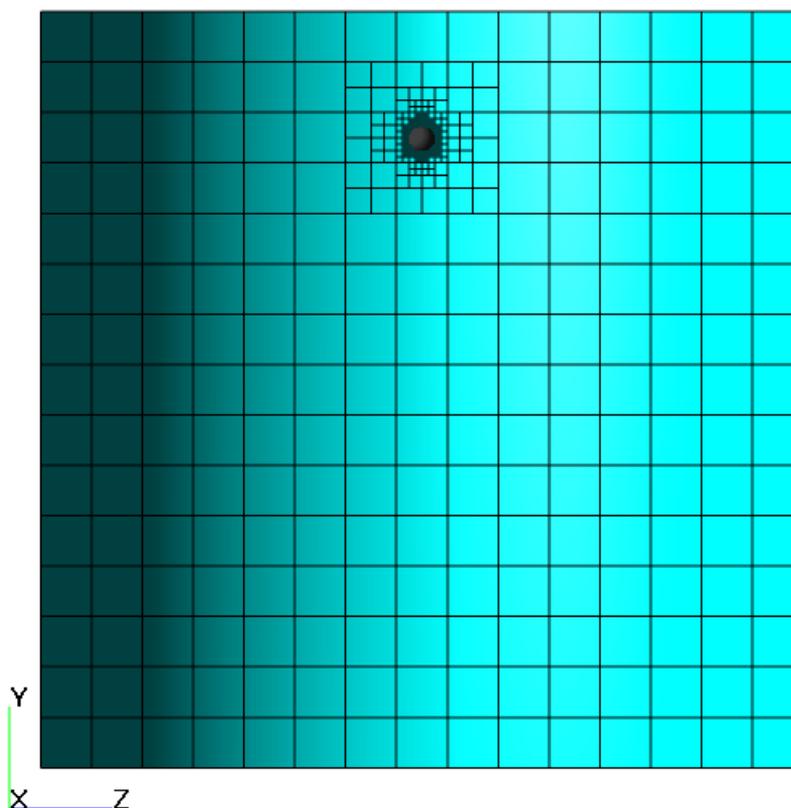
3D



$g$	9.8	$\text{м с}^{-2}$
<b>Геометрия:</b>		
$R$	0.5	$\text{м}$
<b>Свойства жидкости:</b>		
$\rho_{ж}$	1000	$\text{кг м}^{-3}$
$\mu_{ж}$	1000	$\text{кг м}^{-1} \text{с}^{-1}$
<b>Свойства шара:</b>		
$\rho_{ш}$	1500	$\text{кг м}^{-3}$

Шар радиусом  $R$  и плотностью  $\rho_{ш}$  движется под воздействием силы тяжести в вязкой жидкости.

## Расчетная сетка



Расчетная сетка 15x15x15  
Адаптация до 4 уровня по поверхности шара  
Общее число ячеек 4500.

## Теория

Скорость движения шара [1]:

$$U = \frac{2 R^2 (\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}}) g}{9 \mu_{\text{ж}}} = \frac{2 \cdot 0.5^2 (1500 - 1000) \cdot 9.8}{9 \cdot 1000} = 0.272 \text{ м с}^{-1}$$

Сила сопротивления, действующая на шар [1]:

$$F = 6\pi\mu UR = 2564 \text{ Н}$$

## Результаты

Параметр	Теория	Погрешность расчета, %
Скорость, м с <sup>-1</sup>	0.272	-0.7
Сила, Н	2564	+0.3

## Ссылки

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа . – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003