

ВЕРИФИКАЦИЯ FLOWVISION ВЕРСИИ 3.08. ЧАСТЬ 2.

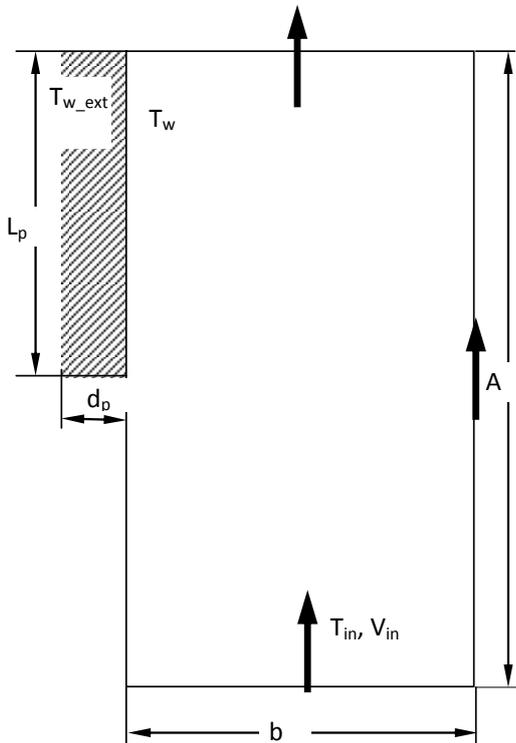
А.С. Шишаева, С.В. Жлуктов, П.И. Карасев

ООО ТЕСИС, г. Москва, 2011

1. Ламинарное обтекание пластины

Постановка задачи

2D



Параметры геометрии:		
L_p	1	м
b	1	м
L	2	м
Параметры вещества:		
ρ_f	1000	кг м ⁻³
μ_f	0.001	кг м ⁻¹ с ⁻¹
λ_f	0.6	Вт м ⁻¹ К ⁻¹
$c_{p,f}$	4217	Дж кг ⁻¹ К ⁻¹
Входные параметры:		
V_{in}	0.005	м с ⁻¹
T_{in}	0	С
Параметры тонкой стенки:		
T_w	20	С
Параметры толстой стенки:		
T_{w_ext}	100	С
$\rho_{p,p}$	7900	кг м ⁻³
λ_p	1	Вт м ⁻¹ К ⁻¹
c_p	45	Дж кг ⁻¹ К ⁻¹
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}

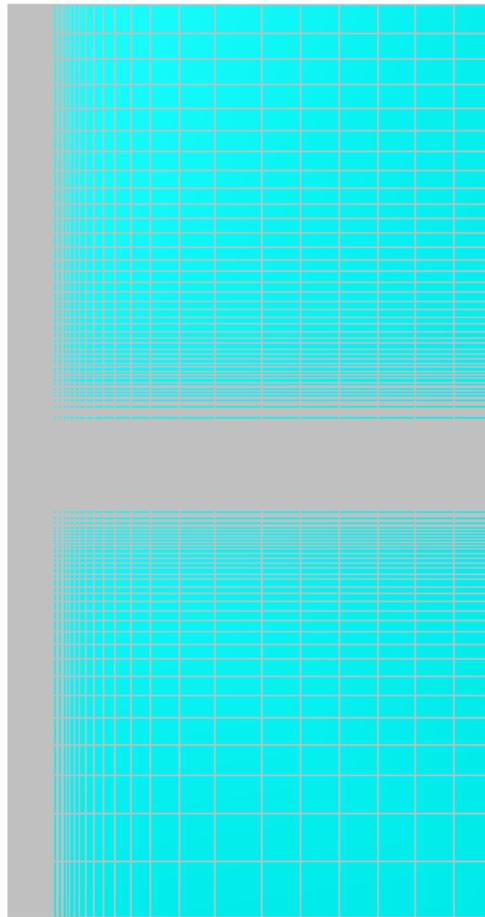
Температура тонкой пластины:

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

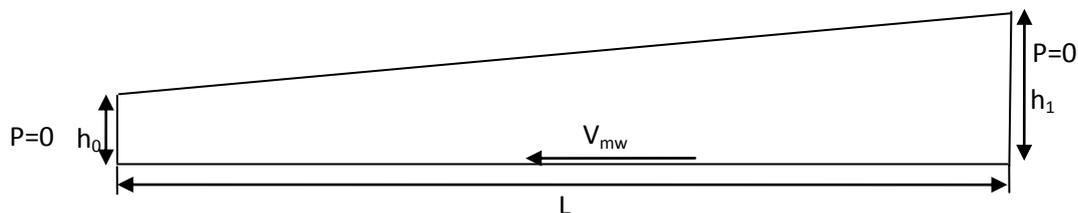
Ссылки

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

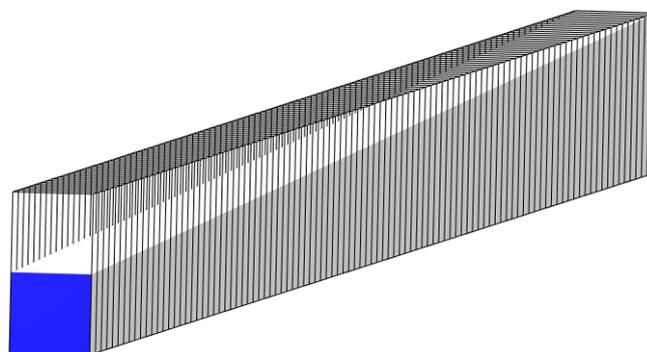
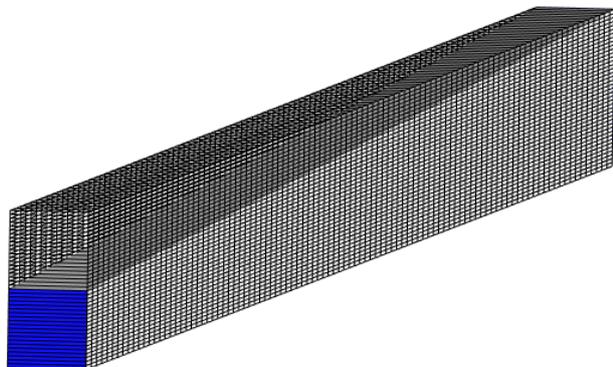
Граничные параметры:

Скорость нижней стенки канала:

V_w

Геометрия:		
L	0.5	м
h_0	0.01	м
h_1	0.02	м
Свойства жидкости:		
ρ	1000	кг м ⁻³
μ	0.01	кг м ⁻¹ с ⁻¹
Скорость движения стенки:		
V_{mw}	0.01	м с ⁻¹

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]:

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

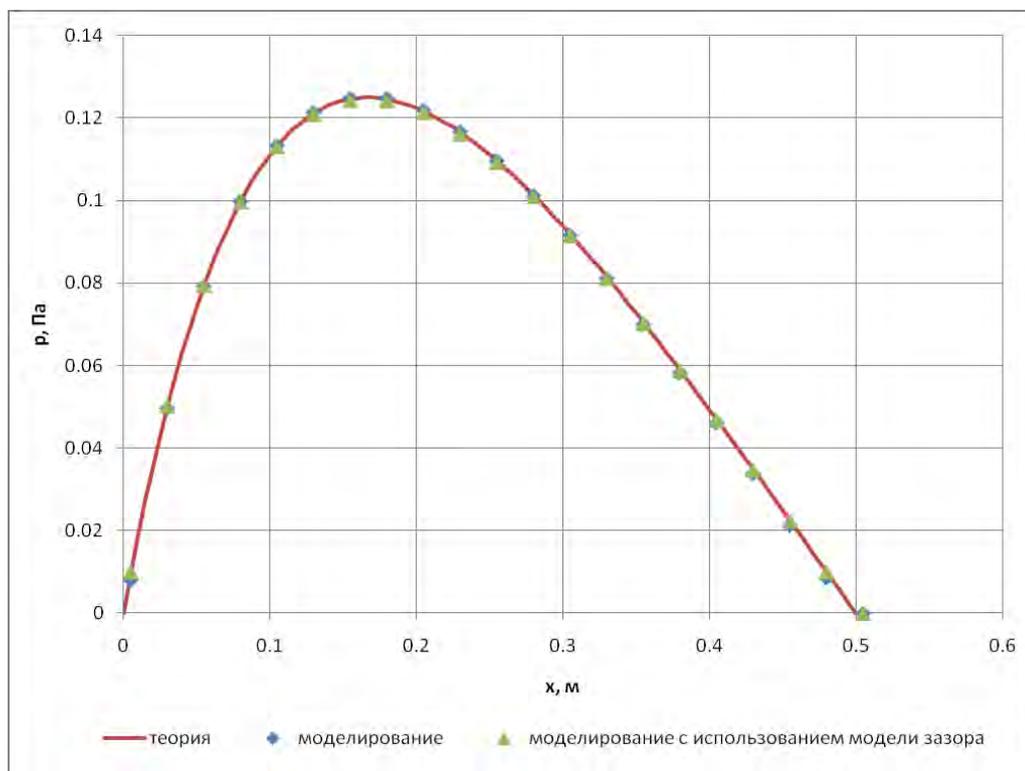
Подъемная сила, действующая на верхнюю стенку [1]:

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

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

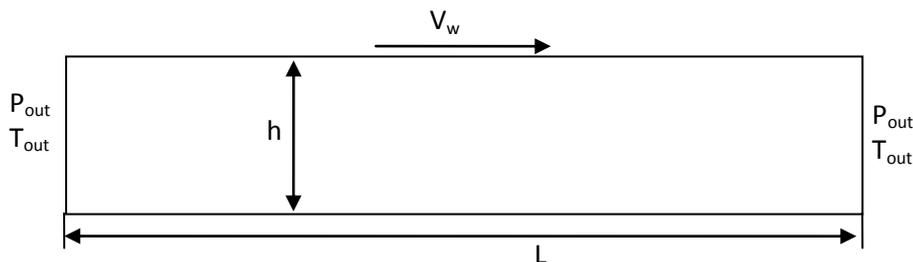
Ссылки

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



Геометрия:		
L	0.5	м
h	0.0001	м
Свойства жидкости:		
ρ	1000	кг м ⁻³
μ	0.01	кг м ⁻¹ с ⁻¹
λ	0.6	Вт м ⁻¹ К ⁻¹
c_p	4000	Дж кг ⁻¹ К ⁻¹
Граничные условия:		
V_w	1	м с ⁻¹
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

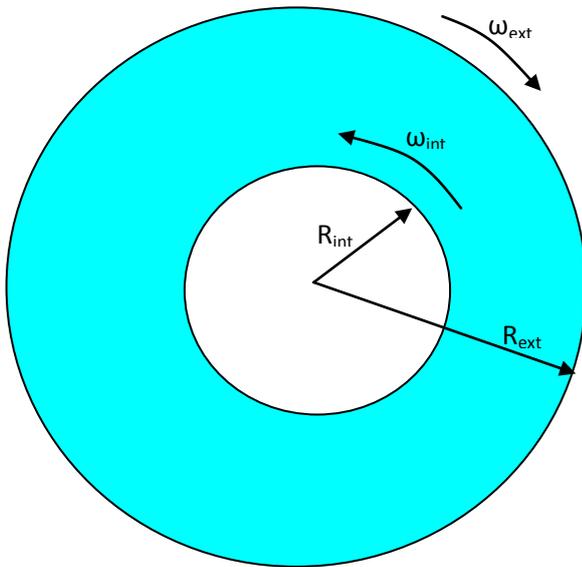
Ссылки

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

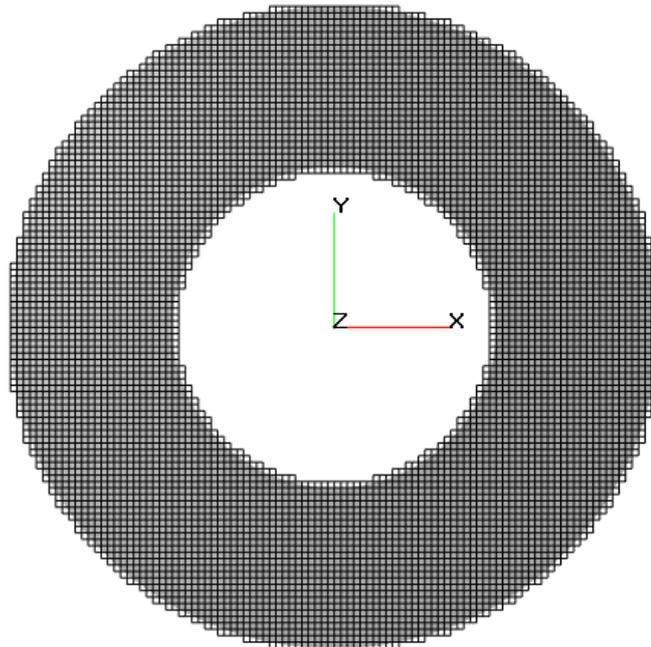
2D



Геометрия:		
R_{ext}	2	м
R_{int}	1	м
Свойства жидкости:		
ρ	1000	кг м ⁻³
μ	100	кг м ⁻¹ с ⁻¹
Граничные условия:		
ω_{ext}	1	м с ⁻¹
ω_{int}	-1	м с ⁻¹
Безразмерные параметры:		
Re	20	

Два вложенных цилиндра с радиусами R_{int} и R_{ext} вращаются с угловыми скоростями ω_{int} и ω_{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]:

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

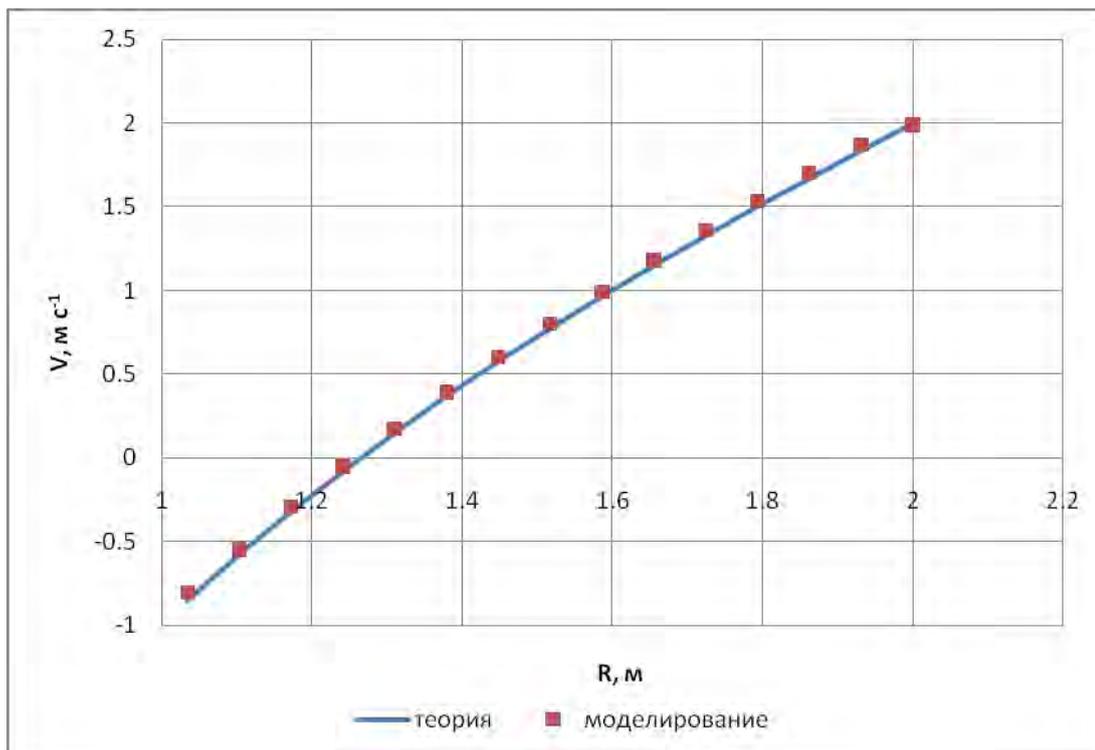
Момент сил на поверхности цилиндра [1]:

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

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

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

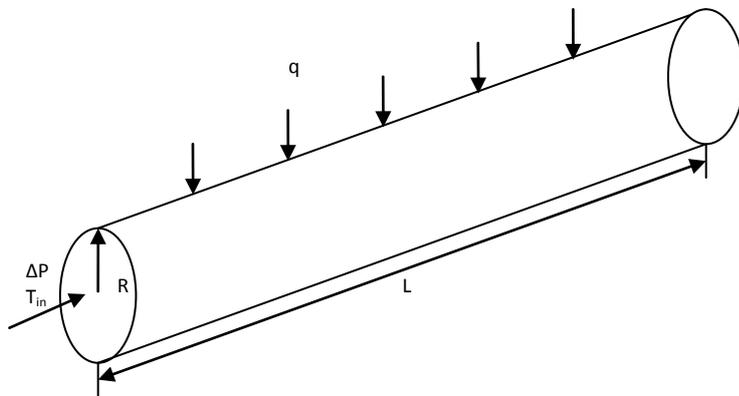
Ссылки

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}

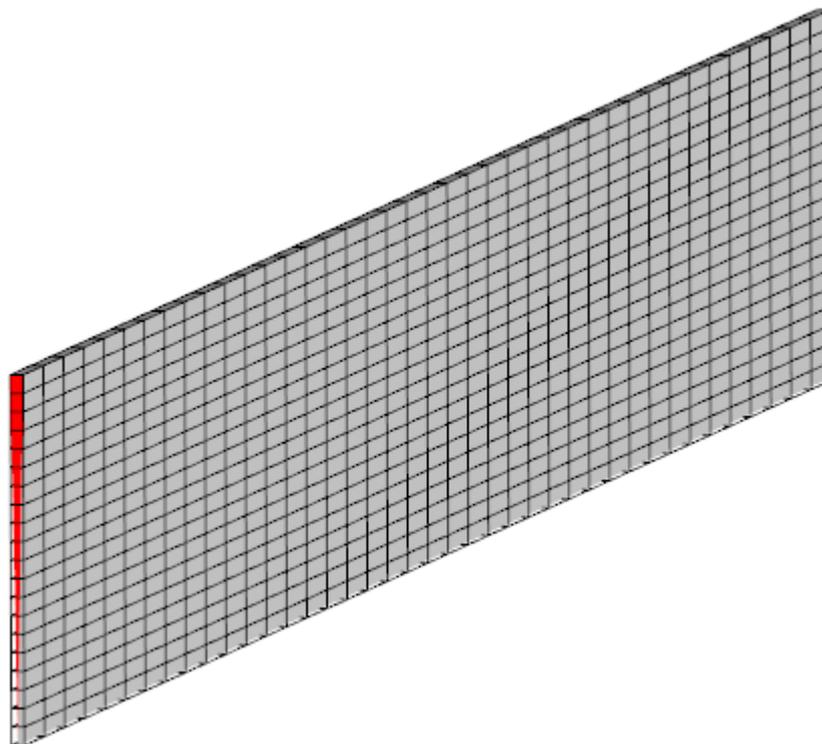
Относительное статическое давление на выходе P_{out}

Относительная температура на входе T_{in}

Постоянный тепловой поток, подводимый к стенке трубы q_w

Геометрия:		
L	0.5	м
R	0.05	м
Свойства жидкости:		
ρ	1000	кг м ⁻³
μ	0.001	кг м ⁻¹ с ⁻¹
λ	0.6	Вт м ⁻¹ К ⁻¹
c_p	4217	Дж кг ⁻¹ К ⁻¹
Входные параметры:		
T_{in}	0	С
P_{in}	$1.28 \cdot 10^{-3}$	Па
P_{out}	0	Па
q_w	1000	Вт м ⁻²

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:

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

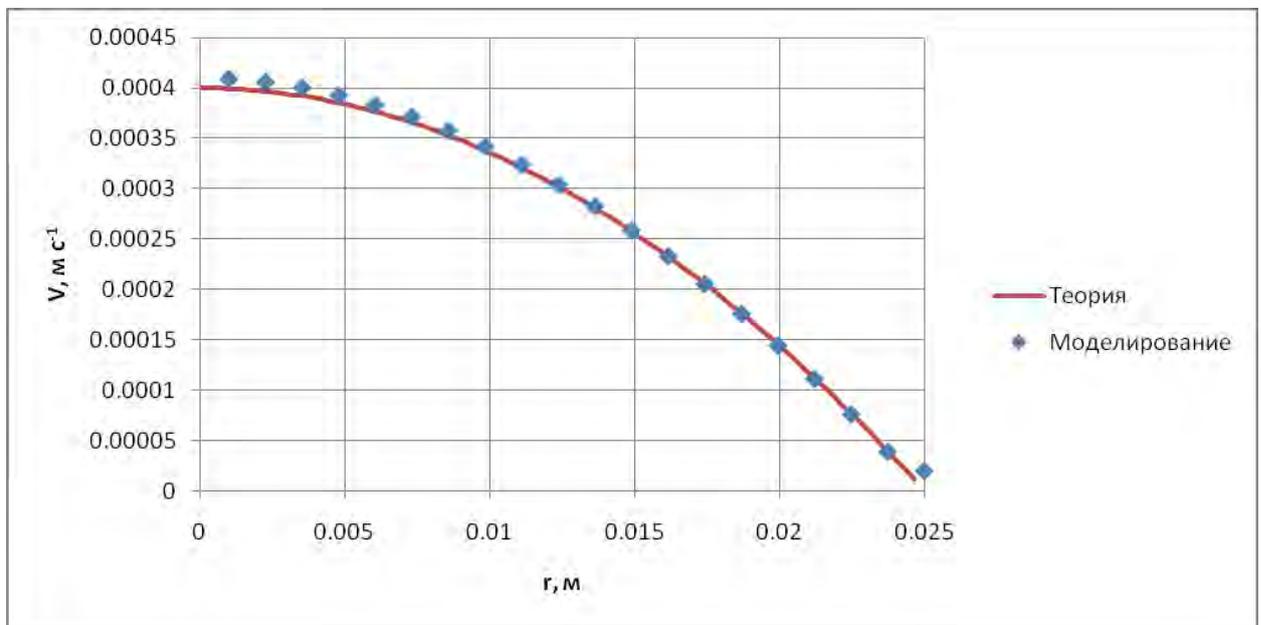
Температура на стенке [2]:

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

$$Nu = 4.36$$

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

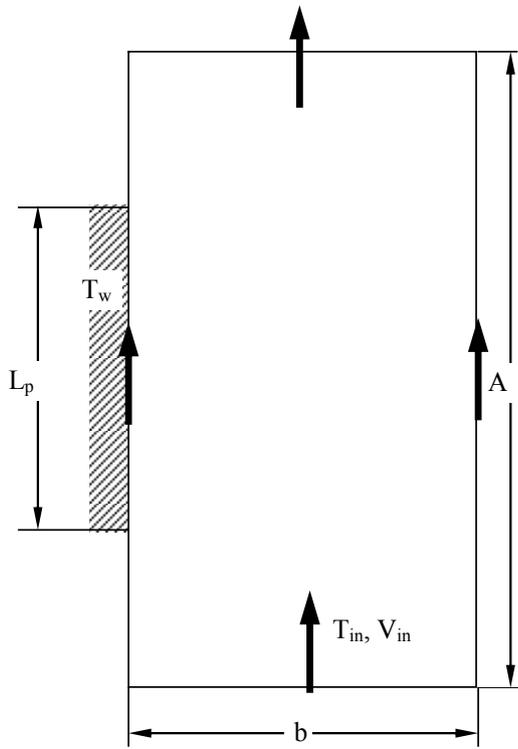
Ссылки

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



Геометрия:		
L_p	1	м
B	1	м
A	2	м
Параметры вещества:		
ρ_f	1000	кг м ⁻³
μ_f	0.001	кг м ⁻¹ с ⁻¹
λ_f	0.6	Вт м ⁻¹ К ⁻¹
$c_{p,f}$	4217	Дж кг ⁻¹ К ⁻¹
Входные параметры:		
V_{in}	1	м с ⁻¹
T_{in}	0	С
Параметры тонкой стенки:		
T_w	20	С

Параметры геометрии:

Длина пластины: L_p

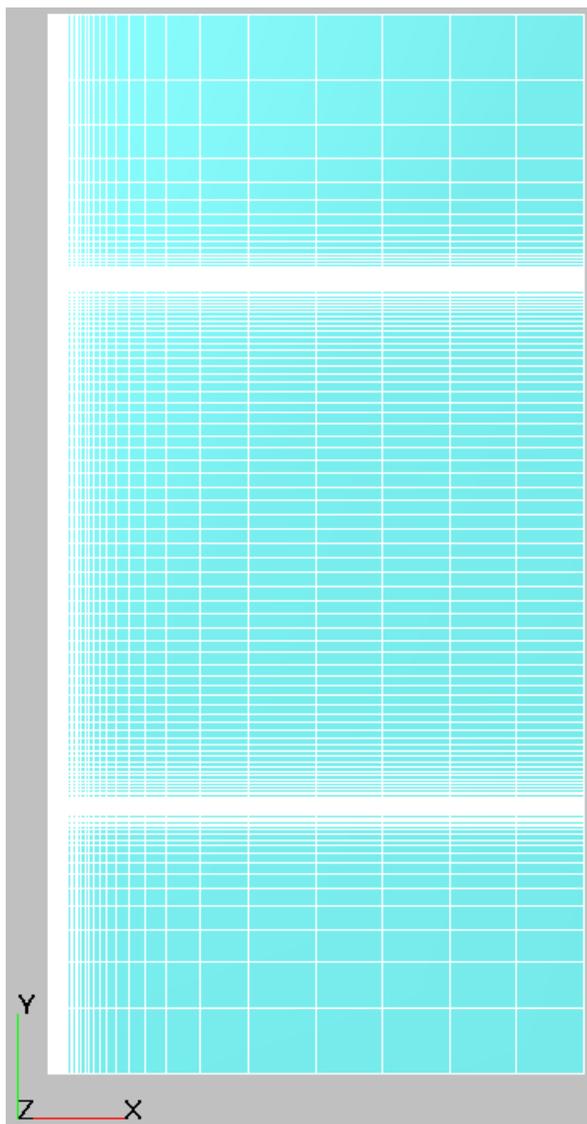
Граничные параметры:

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]:

$$c_x = \frac{0.0588}{\sqrt[3]{Re_x}}$$

Средний коэффициент сопротивления пластины [1]:

$$c_L = \frac{0.074}{\sqrt[3]{Re_L}}$$

Средний коэффициент сопротивления второй части пластины:

$$c_{L0.5} = \frac{0.0626}{\sqrt[3]{Re_L}}$$

Локальное число Нуссельда для пластины [2]:

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

Среднее число Нуссельда для пластины [2]:

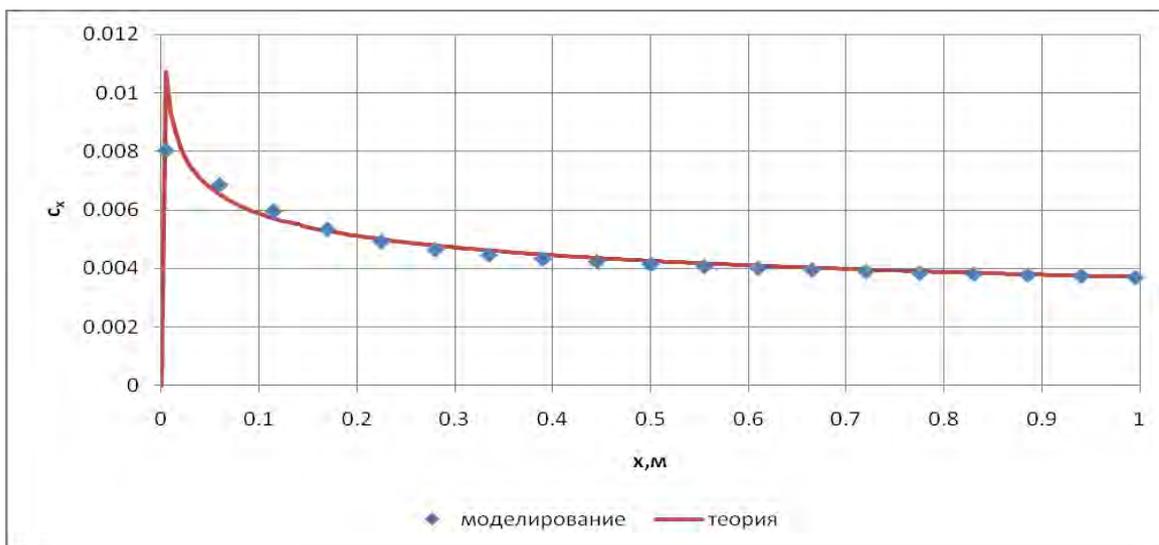
$$Nu_L = 0.037 Re_L^{0.8} Pr^{0.43}$$

Среднее число Нуссельда для второй части пластины:

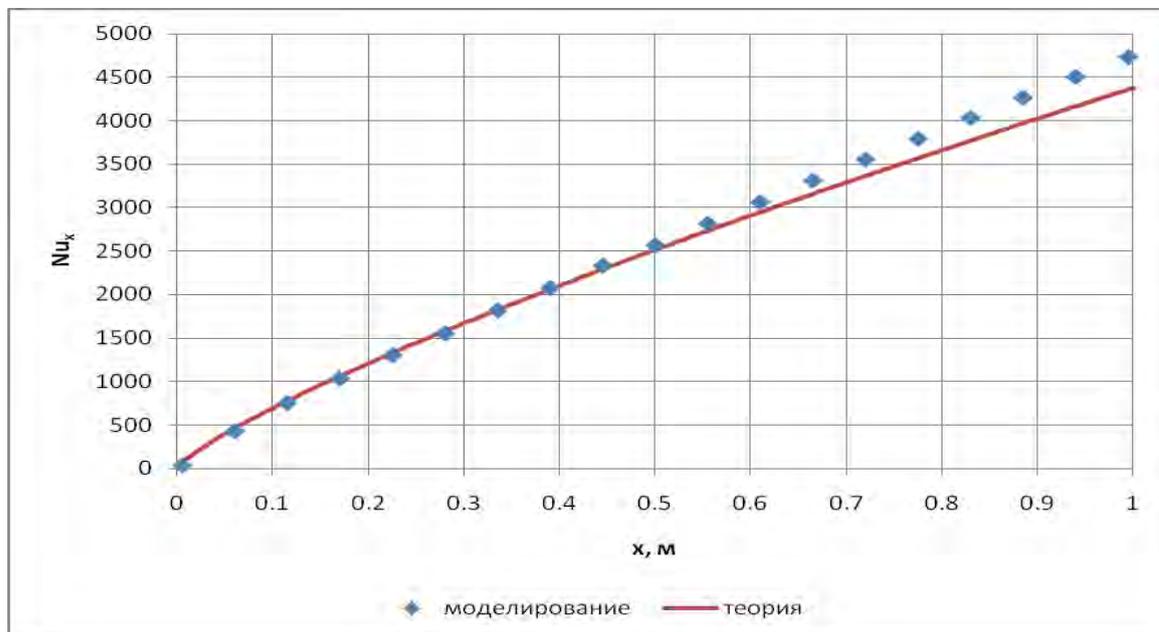
$$Nu_{L,0.5} = 0.032 Re_L^{0.8} Pr^{0.43}$$

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
-----	---	---

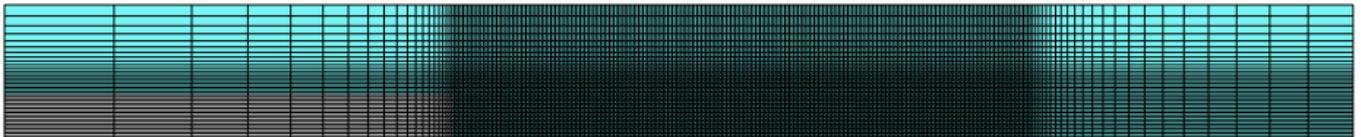
Свойства вещества:

ρ	1	кг м ⁻³
μ	0.0000182	кг м ⁻¹ с ⁻¹

Входные параметры:

V_{in}	1.76	м с ⁻¹
----------	------	-------------------

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

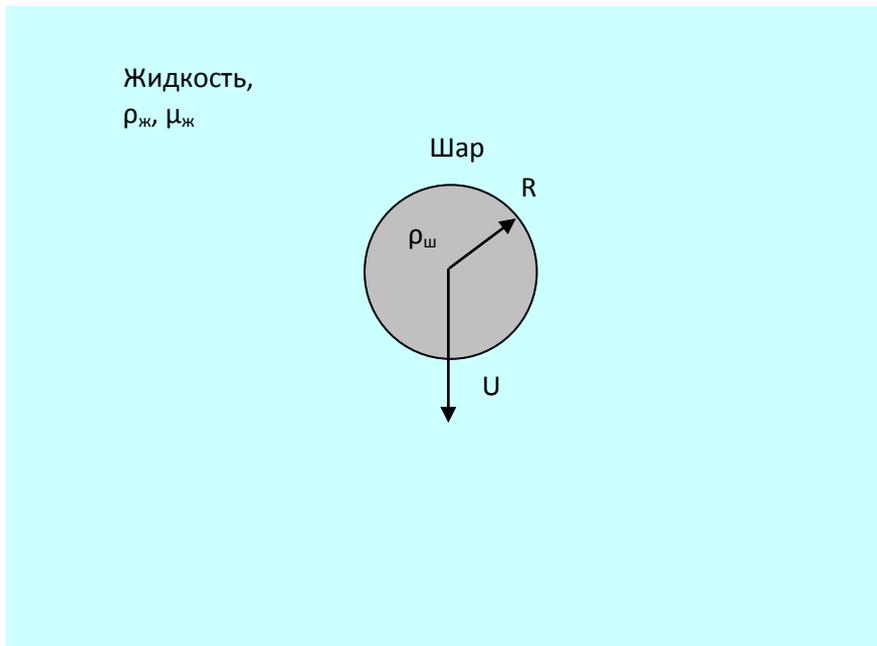
Ссылки

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

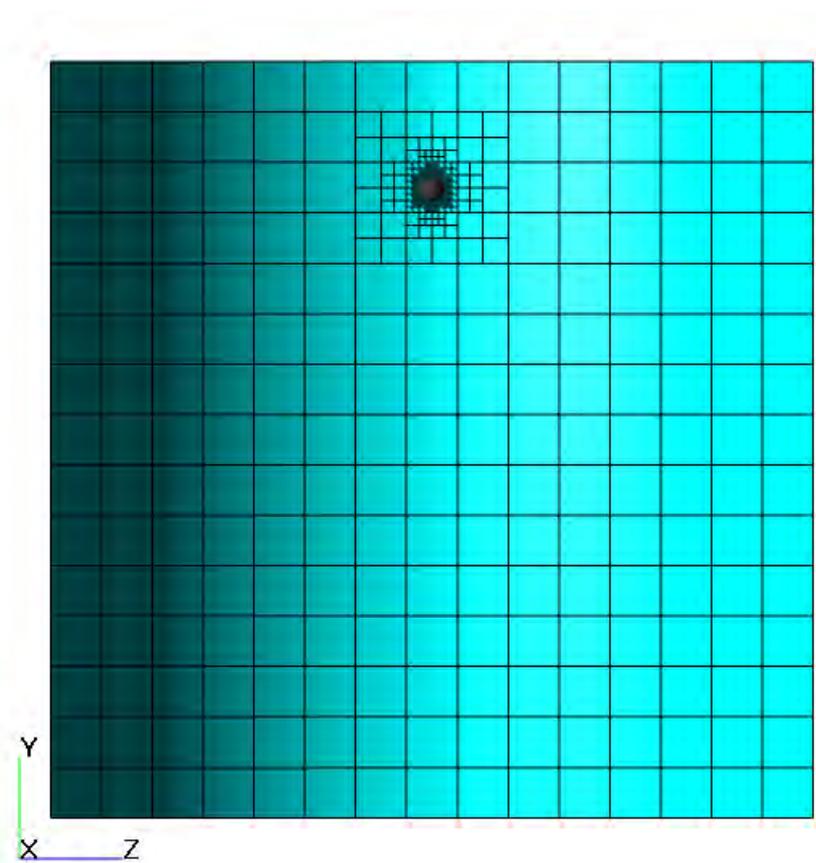
3D



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