

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Исследование стационарного потока жидкости в трубе

выполнили студенты 653 группы ФФКЭ

Агафонов Владислав
Карпова Татьяна

Долгопрудный, 2017 г.

1 Цель работы

1. Измерение скорости течения по методам Пито и Вентури
2. Сравнение результатов со скоростью, определённой по расходу воды.

2 В работе используются

- расходомерная установка
- секундомер

3 Теоретические положения

Формулы, используемые при расчётах:

Уравнение Бернулли для несжимаемой жидкости:

$$P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 = P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2$$

Формула Торричелли для истечения струи жидкости из отверстия:

$$v = \sqrt{2gh}$$

Для расходомера Вентури:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(S_1/S_2)^2 - 1}}$$

Для расходомера Пито:

$$v_2 = \sqrt{2(P_1 - P_2)/\rho}$$

4 Схема установки

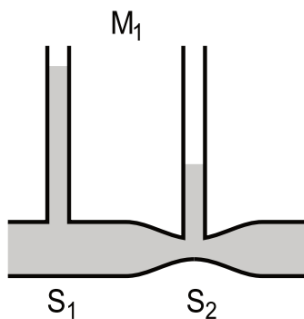


Рис. 1. Расходомер Вентури

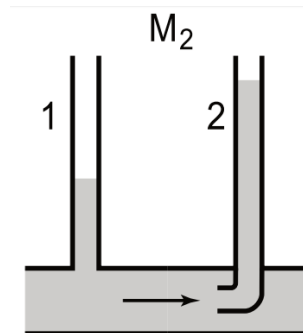


Рис. 2. Расходомер Пито

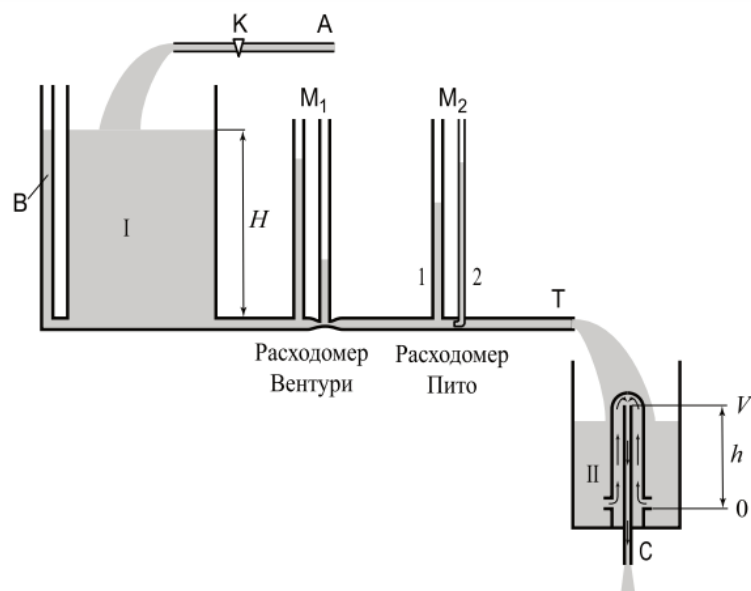


Рис. 3. Схема установки для исследования стационарного потока жидкости в трубе

- I - цилиндрический резервуар
- II - приёмный резервуар известного объёма
- A - водопроводная труба
- T - труба с исследуемой водой
- K - кран для регулировки поступающей воды
- C - сифон, автоматически выливающий воду по достижении ей уровня h

Скорость течения, усредненную по сечению трубы, можно определить по расходу, который находится по измеренному времени наполнения резервуара II, объем которого задан. С другой стороны, скорость может быть рассчитана по показаниям манометров. Сопоставление этих скоростей со скоростью, определенной по расходу, позволяет сделать вывод о применимости уравнения Бернулли, роли вязкости, которая, в частности, приводит к изменению скорости поперек потока. Для количественной оценки роли вязкости необходимо проделать следующий эксперимент. Установив уровень жидкости в резервуаре I на определенной высоте z_1 измерить скорость течения жидкости по трубе Т с помощью приемного резервуара II (в силу несжимаемости жидкости ее скорость на входе в трубу Т и на выходе из нее одинакова). По измеренному значению скорости по формуле Торричелли рассчитать ту высоту z_2 , при которой жидкость вытекала бы с этой же скоростью в отсутствие вязкости.

Разность $z_1 - z_2$ характеризует потери на внутреннее трение в жидкости, причем можно считать, что эти потери происходят только в трубе Т, так

как скорость жидкости в резервуаре I существенно меньше. Влияние вязкости изменяет показания манометра Вентури Δh на величину, которую можно оценить, умножив разность $z_1 - z_2$ на отношение расстояния между входами манометра Δl ко всей длине трубы L . При условии

$$\Delta h \geq (z_1 - z_2) \frac{\Delta l}{L}$$

неидеальностью жидкости в пределах манометра M можно пренебречь. В противном случае (Δh сравнимо с $z_1 - z_2$) $\frac{\Delta l}{L}$ в уравнении для расходомера Вентури из $p_1 - p_2$ необходимо вычесть $\Delta z \frac{\Delta l}{L} \rho g$

5 Ход работы

1. Проверим исправность установки: после пуска воды закроем конец трубы пробкой. Уровни воды в трубках расходомеров совпали
2. Измерим параметры установки

$$\begin{array}{lll} L = 222mm & S_1 = 78.5cm^3 & d_V = 6mm \\ \Delta l_V = 20mm & D_V = 10mm & \\ V = 0,0132m^3 & D_P = 10mm & \end{array}$$

3. Проведём измерения времени заполнения резервуара II для разных уровней H воды в резервуаре I. Результаты занесё в таблицу 1

Таблица 1: Результаты измерения показаний манометров

H , мм	t_1 , с	t_2 , с	t_3 , с	Δh_V , мм (ΔP_V , Па)	Δh_P , мм (ΔP_P , Па)
100	118	119	118	15	4
200	79	82	79	35	8
300	65	70	66	51	12
400	55	55	56	67	16
500	51	53	50	84	18
600	47	45	46	103	21
500	54	50	50	84	18
400	56	55	55	68	14
300	69	65	66	50	12
200	84	86	81	33	7.5
100	119	120	119	16	4

4. По среднему времени заполнения резервуара водой вычислим скорость течения воды по расходу $v_p = \frac{V}{tS_1}$. Оценим погрешность определения скорости по формуле $(\frac{\sigma_v}{v})^2 = (\frac{\sigma_t}{t})^2 + (\frac{\sigma_V}{V})^2 + (\frac{\sigma_S}{S})^2$, где $\sigma_t t = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (t_i - \langle x \rangle)^2}$ - погрешность отклонения от среднего, $(\frac{\sigma_V}{V})^2 = (\frac{\sigma_h}{h})^2 + (\frac{\sigma_w}{w})^2 + (\frac{\sigma_l}{l})^2 = 0.005625m^3$, где h, w, l - высота, ширина и длина резервуара II соответственно ($\sigma_w = \sigma_h = \sigma_l = 1cm$ - погрешность линейки) $\sigma_S = 10^{-8}m$ - погрешность штангенциркуля Результаты занесём в таблицу 2

Таблица 2: Расчёт скорости течения по расходу, его погрешность

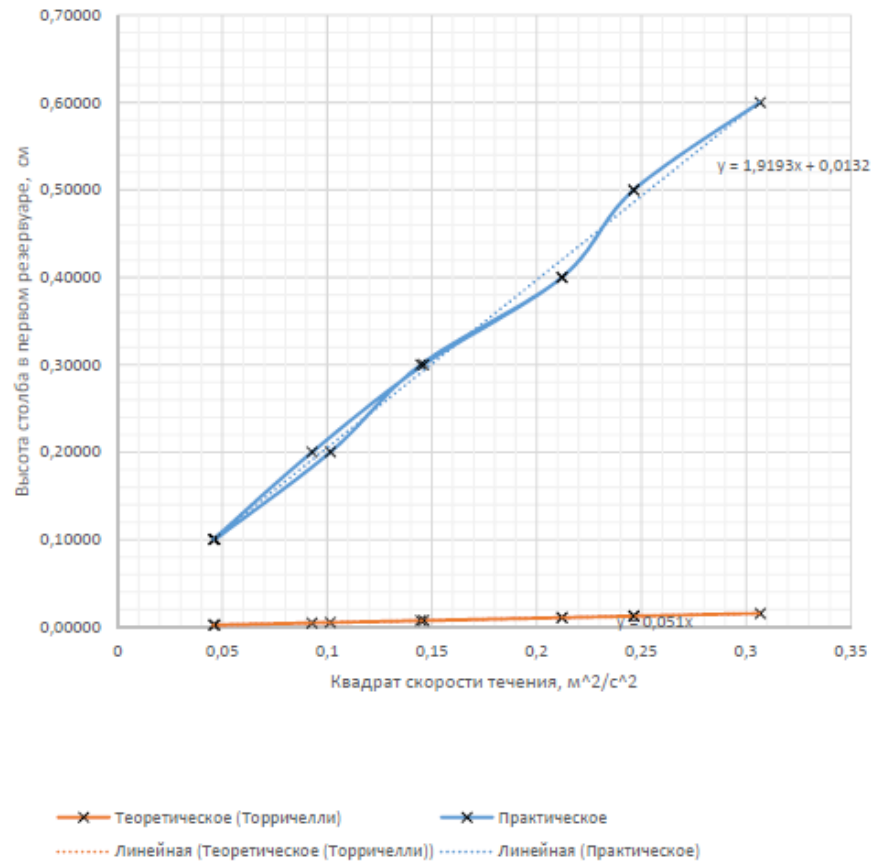
H, m	t, s	σ_t, s	$v, m/s$	$v^2, m^2/s^2$	$\sigma_v, m/s$	$\varepsilon, \%$	h_t, m^{-3}
0,1	118,33	0,37	0,22	0,05	0,017	7,77	2,37
0,2	80,00	1,10	0,32	0,10	0,008	2,42	5,17
0,3	67,00	1,67	0,38	0,14	0,012	3,20	7,38
0,4	55,33	0,37	0,46	0,21	0,010	2,11	10,82
0,5	51,33	0,97	0,50	0,25	0,014	2,75	12,57
0,6	46,00	0,63	0,55	0,31	0,013	2,43	15,65
0,5	51,33	1,46	0,50	0,25	0,017	3,48	12,57
0,4	55,33	0,37	0,46	0,21	0,010	2,11	10,82
0,3	66,67	1,32	0,38	0,15	0,011	2,81	7,45
0,2	83,67	1,59	0,30	0,09	0,008	2,76	4,73
0,1	119,33	0,37	0,21	0,05	0,004	2,02	2,33

5. Построим график зависимости квадрата скорости от высоты столба жидкости в первом резервуаре. На график нанесём практические значения и теоретическое, где высота столба рассчитана по формуле Торричелли. Погрешности измерения скорости на график наноситься не будут, так как они очень малы по сравнению с масштабом всего графика

Наблюдаем несовпадение практического и теоретического значений на два порядка. Возможные причины:

- Не учитывалась вязкость воды при расчёте предполагаемой высоты столба
- Турбулентный характер движения воды в резервуаре I при его заполнении
- То есть, неидеальность жидкости

Рис. 5. Зависимость квадрата скорости от высоты столба воды



6. По формулам для расходомеров Вентури и Пито вычислим скорость течения. Сначала вычисления проведём без учёта потерь, затем с ними. Результаты занесём в таблицу 3.

В уравнении для расходомера Вентури из $p_1 - p_2$ необходимо вычесть $\Delta z \frac{\Delta l}{L} \rho g$

Для расходомера Пито проведём следующую оценку

Скорость жидкости в центре трубы по формуле Пуазейля:

$$v_0 = \frac{1}{4\nu} \frac{\Delta P}{L} (R^2)$$

Скорость жидкости у края трубки расходомера Пито:

$$v(r) = \frac{1}{4\nu} \frac{\Delta P}{L} (R^2 - r^2)$$

Средняя скорость в трубке Пито:

$$v_P = \frac{1}{4\nu} \frac{\Delta P}{L} (R^2 - \frac{r^2}{2})$$

Тогда

$$\frac{1}{4\nu} \frac{\Delta P}{L} = \frac{v_0}{R^2}$$

Окончательно средняя скорость воды в трубе:

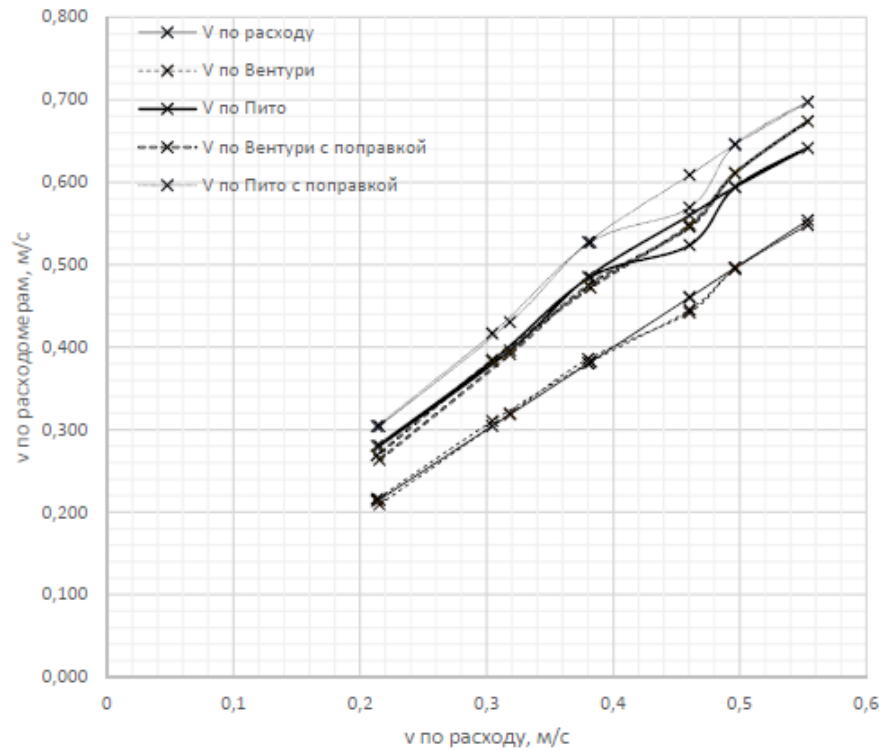
$$v_0 = \frac{v_P R^2}{R^2 - \frac{r^2}{2}}$$

Таблица 3: Скорости по расходу и по расходомерам

v_p , м/с	v_{Vent} , м/с	v_{Pitot} , м/с	$v * v_{ent}$, м/с	$v * v_{pitot}$, м/с
0,215	0,209	0,280	0,264	0,304
0,318	0,320	0,396	0,392	0,430
0,380	0,386	0,485	0,475	0,527
0,460	0,442	0,560	0,546	0,609
0,496	0,495	0,594	0,611	0,646
0,554	0,548	0,642	0,674	0,697
0,496	0,495	0,594	0,611	0,646
0,460	0,445	0,524	0,548	0,569
0,382	0,382	0,485	0,472	0,527
0,305	0,310	0,383	0,384	0,417
0,214	0,216	0,280	0,269	0,304

Для наглядности представим зависимость этих значений от значения скорости по расходу на одном графике (рисунок 5).

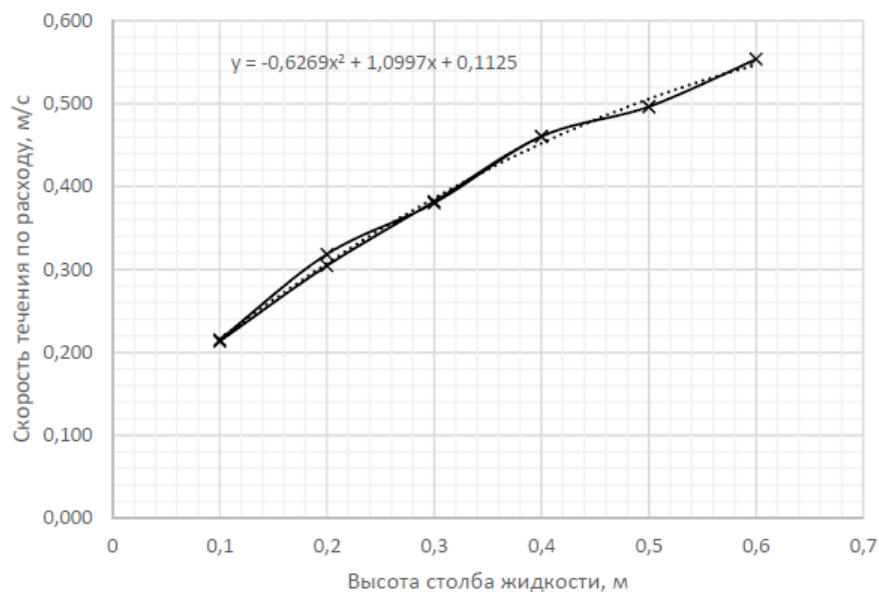
Рис. 5. Сравнение получившихся скоростей со скоростью, определённой по расходу



Видим, что примерно одинаковыми оказались скорости, определённые по расходу и по расходомеру Вентури, по расходомеру Пито и по расходомеру Вентури с поправкой. Истинная скорость движения жидкости самая малая среди всех определённых скоростей, так как при их расчёте мы не учитывали вязкость жидкости, снижающую скорость.

- Построим график зависимости скорости течения по расходу от высоты столба воды (рисунок 6)

Рис. 6. График зависимости скорости течения от
высоты столба жидкости



По графику определим участки ламинарного и турбулентного течений. Вычислим значение числа Рейнольдса для точки, в которой теряется линейный характер графика: на третьей точке при $v = 0.380$ м/с определим число Рейнольдса по формуле $Re = \frac{v_p R \rho}{\eta} = 1900$. В справочниках указано, что в трубе круглого сечения переход течения воды при комнатной температуре из ламинарного в турбулентный режим происходит при $Re \approx 1800$. Убедимся, что при меньших чем граничная точка значениях скорости число Рейнольдса 1000 , а при больших > 2000 :

$$Re(0.215) = 1075$$

$$Re(0.554) = 2770$$

Теоретическая скорость, когда течение станет турбулентным: $v = 0.360$ м/с. Итак, наша оценка верна. Стоит отметить, что при достижении достаточно больших скоростей в трубе наблюдалось образование пузырьков жидкости, что также является признаком турбулентного течения жидкости.

6 Вывод

В ходе работы было исследовано течение жидкости в цилиндрической трубе, изучен принцип работы расходомеров Вентури и Пито, исследованы ламинарный и стационарный режимы течения жидкости.

- По расходу жидкости была определена зависимость квадрата скорости воды от высоты столба воды в резервуаре I: чётко прослеживается линейный характер
- Выяснено, что использование уравнения Торричелли для расчёта столба жидкости по скорости её течения неуместно по причине того, что рассматривается реальная, а не идеальная жидкость. Учитывая явно турбулентный характер движения жидкости в резервуаре при его заполнении, использование любых формул для ламинарного истечения из него бессмысленно
- Исследованы расходомеры Пито и Вентури, определены поправки для более точного расчёта скорости воды по их показаниям. Выяснилось, что наиболее точным является расходомер Вентури. Расходомер Пито показывает повышенное значение скорости, так как его трубка расположена в центре потока (параболический профиль скоростей в реальной жидкости). Для более точных измерений с помощью расходомера Пито необходимо использовать несколько расходомеров, расположив их на разных расстояниях от центра трубы и усреднив полученные значения.
- По графику зависимости скорости течения от высоты столба жидкости определены участки ламинарного и турбулентного течения воды, найдена точка, в которой предположительно течение меняет характер с ламинарного на турбулентное; эмпирически и теоретически подтверждено что при больших скоростях течение имеет турбулентный характер.