

## 6 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТНЫХ ПОТЕРЬ НАПОРА В ТРУБОПРОВОДЕ (ПОТЕРЬ ВСЛЕДСТВИЕ ВНЕЗАПНОГО РАСШИРЕНИЯ ТРУБЫ)

Цель работы: определить опытным путем потери при внезапном расширении трубы, сравнив со значением потерь, вычисленным по теоретической формуле Борда; определить коэффициент местного сопротивления при внезапном расширении трубы по результатам опыта и по теоретической формуле, сравнить его значения, вычислив относительную погрешность.

Оборудование и приборы: установка для следования местных потерь напора, термометр, измерительная линейка, мерный сосуд, секундомер.

### 6.1 Теоретические сведения

Гидравлические сопротивления делятся на сопротивления сил вязкостного трения по длине трубы и местные сопротивления.

Потери напора на трение при различных режимах рассмотрены для случая равномерного движения жидкости, т.е. живое сечение вдоль трубы сохранялось постоянным. При движении жидкости в местных сопротивлениях поток претерпевает деформацию, что приводит к изменению формы и размеров живого сечения, и, следовательно, движение жидкости становится неравномерным, вследствие чего происходит изменение скорости потока. В местах изменения живого сечения или направления потока происходит его отрыв от стенок, и образуются так называемые вихревые или застойные зоны. Между основным потоком и вихревыми зонами осуществляется интенсивный обмен частицами жидкости, что является основным источником местных потерь энергии.

На основании многочисленных опытов установлено, что местные потери напора подчиняются общему закону потерь энергии, т.е. при турбулентном режиме, они пропорциональны квадрату средней скорости, а при ламинарном - средней скорости в степени  $n < 2$ .

Потери напора в местных сопротивлениях при турбулентном режиме вычисляют по формуле Вейсбаха

$$h_{\omega} = \xi \cdot \frac{V^2}{2g}, \text{ м}, \quad (6.1)$$

где  $\xi$  - безразмерный коэффициент местного сопротивления,  
 $V$  - средняя скорость потока за местным сопротивлением, м/с.

Таким образом, местные потери напора, так же как и потери на трение по длине, пропорциональны скоростному напору.

Значения, коэффициентов местных сопротивлений, приведенные в гидравлических справочниках, обычно получают экспериментально для квадратичной зоны турбулентного режима из формулы (6.1):

$$\xi = \frac{2g}{V^2} \cdot h_{\omega} \quad (6.2)$$

Если местное сопротивление (например, вентиль, диафрагма и т.п.) расположено на горизонтальном трубопроводе постоянного сечения, то потери напора будут равны, как и в случае потерь напора по длине, разности показаний пьезометров, установленных по обе стороны местного сопротивления.

При внезапном расширении или сужении трубы разность показаний пьезометров уже не будет представлять потери напора, т.к. в узком и широком сечениях трубы скорости различны по величине.

Для нахождения этих потерь опытным путем составляется уравнение Бернулли для двух сечений (1-1, 2-2) и плоскости сравнения (0-0), проходящей через горизонтальную ось составной трубы (рисунок 6.1). Ввиду малости потерь по длине на коротком участке труб ими можно пренебречь, тогда уравнение примет вид

$$0 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} = 0 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} + h_{\text{вр}}$$

Откуда потери при внезапном расширении трубы равны

$$h_{\text{вр}} = \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2 - \alpha_2 \cdot V_2^2}{2g} + \frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2 - \alpha_2 \cdot V_2^2}{2g} - \frac{p_2 - p_1}{\rho g} = \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2 - \alpha_2 \cdot V_2^2}{2g} - \Delta h, \text{ м} \quad (6.3)$$

Разность показаний пьезометров  $\Delta h$  отрицательна, т.к.  $p_1 < p_2$  ввиду того, что  $V_1 > V_2$ .

Ввиду сложности явлений, происходящих в жидкости при движении через местные сопротивления, теоретические формулы для определения потерь напора и коэффициентов местных сопротивлений удалось получить только для простейших видов, таких как внезапное расширение и сужение, плавное расширение или сужение, диафрагмы и т.п.

Одним из наиболее часто встречающихся местных сопротивлений является внезапное увеличение живого сечения потока. Впервые расчетную формулу применительно к круглым трубам получил французский инженер Борда.

$$h_{\text{вр}} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}, \text{ м}, \quad (6.4)$$

т.е. потери напора вследствие внезапного расширения равны скоростному напору потерянной скорости.

Для вывода формулы коэффициента местного сопротивления выразим скорость в сечении (1-1) через скорость сечения (2-2) на основании уравнения постоянства расхода.

$$Q = V_1 \omega_1 = V_2 \omega_2, \text{ м}^3/\text{с}, \quad \text{откуда} \quad V_1 = V_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}, \text{ м/с}$$

Подставляя последнее выражение в формулу Борда (6.4), получим

$$h_{\text{вр}} = \frac{(V_2)^2}{2g} \cdot \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2 = \frac{1}{2g} \cdot \left(V_2 \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1} - V_2\right)^2$$

Сравнивая это выражение с формулой (6.1), приходим к выводу, что теоретический коэффициент местного сопротивления при внезапном расширении трубы равен

$$\xi_{\text{вр}} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2 = \left[\left(\frac{D}{d}\right) - 1\right]^2 \quad (6.5)$$

## 6.2 Схема установки

Опыты проводятся на универсальной, установке, на которой к присоединительным фланцам 11 напорного 3 и приемного 5 баков монтируется составной трубопровод 4 с диаметрами сечений  $d$  и  $D$ . Фрагмент установки показан на рисунке 6.1.

На испытуемом участке составного трубопровода установлены 7 пьезометров: 1 пьезометр - на трубе малого диаметра ( $d$ ), 6 пьезометров - на трубе большого диаметра ( $D$ ) с целью визуального наблюдения за кривой изменения гидродинамического давления на начальном участке потока жидкости.

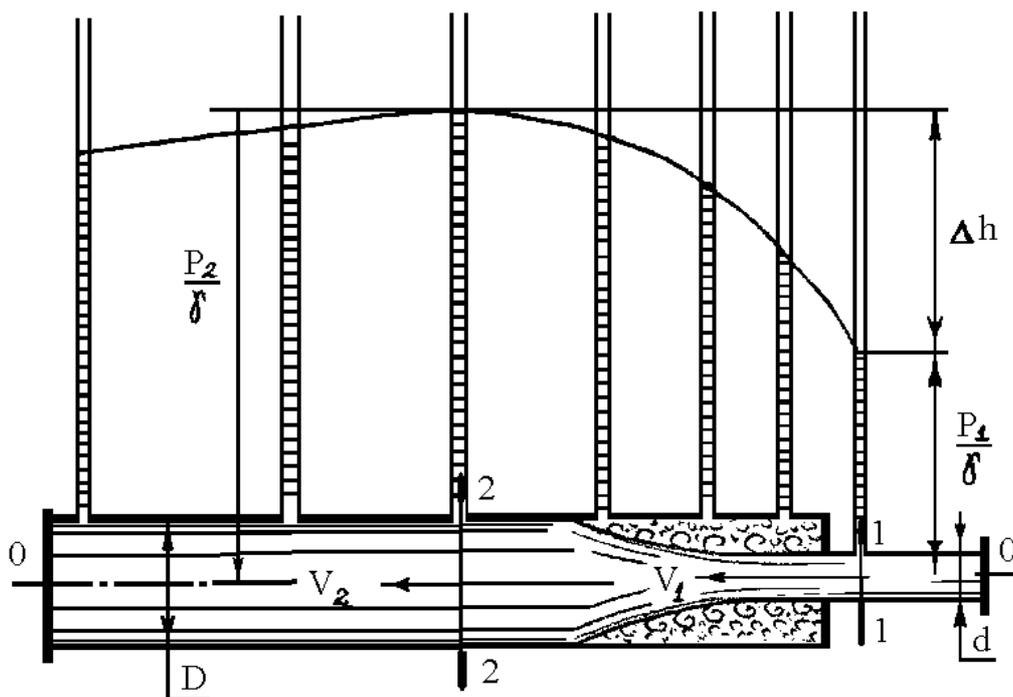


Рисунок 6.1 - Фрагмент схемы установки

### 6.3 Получение и обработка результатов

Провести опыт по определению потерь напора.

Произвести необходимые измерения. Измерить:

- высоту столба жидкости в пьезометрах;
- температуру воды;
- емкость и время наполнения мерного сосуда;
- диаметры сечений.

Данные измерений занести в таблицу 6.1.

Произвести расчеты по формулам таблицы 6.1. Вычислить:

- кинематический коэффициент вязкости;
- площади сечений;
- расход воды в трубопроводе;
- средние скорости и скоростные напоры в сечениях;
- числа Рейнольдса;
- разность уровней воды в пьезометрах;
- местные потери напора и коэффициент местного сопротивления по опы-

ту;

- местные потери напора и коэффициент местного сопротивления теоретические;

- относительную погрешность потерь напора и коэффициента местного сопротивления.

Результаты вычислений занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты измерений и расчетов

№ п/п	Наименование показателей	Обозначения, формулы, размерность	Сечения	
			1	2
1	Показания пьезометров	$\frac{p_1}{\rho g}$ , м; $\frac{p_2}{\rho g}$ , м		
2	Диаметры сечений	d, м; D, м		
3	Площади сечений	$\omega_1 = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ , м <sup>2</sup> ; $\omega_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ , м <sup>2</sup>		
4	Средние скорости в сечениях	$V_1 = \frac{Q}{\omega_1}$ , м/с; $V_2 = \frac{Q}{\omega_2}$ , м/с		
5	Числа Рейнольдса	$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}$		
6	Скоростные напоры в сечениях	$\frac{V_1^2}{2g}$ , м; $\frac{V_2^2}{2g}$ , м		
7	Разность уровней воды в пьезометрах	$\Delta h = \frac{p_2 - p_1}{\rho g}$		
8	Потери напора при внезапном расширении (по опыту)	$h_{\text{вп}} = \frac{\alpha_1(V_1)^2 - \alpha_2(V_2)^2}{2g}$		
9	Коэффициент местного сопротивления (по опыту)	$\xi_{\text{вп}} = \frac{2g}{(V_2)^2} \cdot h'_{\text{вп}}$		
10	Теоретические потери по формуле Борда	$h'_{\text{вп}} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$ , м		
11	Коэффициент местного сопротивления (теоретический)	$\xi_{\text{вп}} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2 = \left[\left(\frac{D}{d}\right) - 1\right]^2$		
12	Относительная погрешность потерь напора	$\delta h = \frac{h_{\text{вп}} - h'_{\text{вп}}}{h_{\text{вп}}} \cdot 100$ , %		
13	Относительная погрешность коэффициента местного сопротивления	$\delta \xi = \frac{\xi_{\text{вп}} - \xi'_{\text{вп}}}{\xi_{\text{вп}}} \cdot 100$		
14	Емкость мерного сосуда	W, см <sup>3</sup>		
15	Время наполнения мерного сосуда	t, с		
16	Расход воды в трубопроводе	$Q = \frac{W}{t}$ , м <sup>3</sup> /с		
17	Температура воды	t °C		
18	Кинематический коэффициент вязкости	$\nu = \frac{0,0178}{1 + 0,0337 \cdot t^{\circ\text{C}} + 0,000221 \cdot (t^{\circ\text{C}})^2}$ , м <sup>2</sup> /с		

#### 6.4 Контрольные вопросы

- 1) Что характеризует коэффициент местного сопротивления?
- 2) Приведите примеры местных сопротивлений.
- 3) Что вызывает потери напора в местных сопротивлениях?
- 4) Местные потери напора пропорциональны средней скорости потока в какой степени?
- 5) Как изменятся местные потери напора при изменении длины участка трубопровода?
- 6) Как изменятся потери напора на трение при изменении диаметра трубопровода?
- 7) По какой формуле определяются местные потери напора на трение для ламинарного и турбулентного режимов движения потока? Чем они отличаются друг от друга?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика: учебник / А.Д.Альтшуль, Л.С.Животовский, Л.П.Иванов. - М.: Стройиздат, 1987. - 413. - Библиогр.: с. 409.
- 2 Альтшуль, А.Д. Примеры расчетов по гидравлике: Учебное пособие. / А.Д.Альтшуль, В.И.Калицун, Ф.Г.Майрановский и др.- М.: Стройиздат, 1976. – 256 с.
- 3 Башта, Т.М. Машиностроительная гидравлика. Справочное пособие. / Т.М.Башта. - М.: Машиностроение, 1973.
- 4 Большаков, В.А. Гидравлика: Общий курс: учеб. / В.А.Большаков, В.Н.Попов. - Киев: Вища. шк., 1989. - 215 с.: ил. - Библиогр.: с. 205-206.
- 5 Вильнер, Я.М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. / Я.М.Вильнер, Я.Т.Ковалёв, Б.Б.Некрасов. - Минск: Высшая школа, 1985.
- 6 Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учеб. для вузов / Т.М.Башта, С.С.Руднев, Б.Б.Некрасов и др. - 2-е изд. перераб. - М.: Машиностроение, 1982. - 423 с. - Библиогр.: с. 418.
- 7 Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод: учеб. пособие для вузов / под ред. С. П. Стесина. - М.: Академия, 2005. - 335 с. - (Высшее профессиональное образование). - Библиогр.: с. 332.
- 8 Гидравлика и гидропривод: учеб. пособие / Н.С.Гудилин, Е.М.Кривенко, Б.С.Маховиков, И.Л.Пастоев; Ред. И.Л.Пастоев. - 3-е изд., стереотип. - М.: МГГУ, 2001. - 519 с.: ил. - (Высшее горное образование). - Библиогр.: с. 518.
- 9 Гидравлика: учеб. пособие для ВУЗов / А.Д.Тян, М.К.Скаков, Ю.К.Назаров, В.А.Петров. - Алма-Ата: Рауан, 1992. – 240 с.
- 10 Константинов, Ю.М. Гидравлика: учеб. для вузов / Ю.М.Константинов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Киев: Вища шк., 1988. - 398. - Библиогр.: с. 386.
- 11 Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник / Л.Г.Лойцянский. - 7-е изд., испр. - М.: Дрофа, 2003. - 840 с.
- 12 Механика жидкости и газа: учеб. пособие / Ред. В.С.Швыдкой. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: ИКЦ "Академкнига", 2003. - 462 с.: рис., табл. - Библиогр.: с.458.
- 13 Примеры гидравлических расчетов: Учеб. Пособие / Под ред. А.И. Богомолова - 2-е изд., перераб. - М.: Транспорт, 1977. – 526 с.
- 14 Сугуров, Ш.Б. Гидравлика (на казахском языке). / Ш.Б.Сугуров - Алматы, 1988. -198 с.
- 15 Ухин, Б.В. Гидравлика: учебник / Б.В.Ухин, А.А.Гусев. - М.: Инфра-М, 2008. - 431 с.: табл. - (Среднее профессиональное образование). - Библиогр.: с. 413-416.