

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева»

Кафедра теплоэнергетики

**И.В. Дворовенко**  
**А.Р. Богомоллов**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА**

Методические указания к лабораторной работе по дисциплине  
«Механика жидкости и газа. Основы теплогазоснабжения и венти-  
ляции» для студентов направления подготовки  
08.03.01 Строительство всех форм обучения

Рекомендовано учебно-методической комиссией направления под-  
готовки бакалавров 08.03.01 Строительство в качестве электронно-  
го издания для выполнения лабораторной работы студентами всех  
форм обучения

Кемерово 2019

Рецензент:

Темникова Е.Ю. – к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики.

Дворовенко Игорь Викторович, Богомолов Александр Романович. Определение гидравлического сопротивления участка трубопровода [Электронный ресурс]: методические указания к выполнению лабораторной работы для студентов направления подготовки бакалавров 08.03.01 Строительство, всех форм обучения / И.В. Дворовенко, А.Р. Богомолов. – Кемерово: КузГТУ, 2019. – Систем. требования: Pentium IV ; ОЗУ 8 Гб ; Windows XP ; (CD-ROM-дисковод); мышь. - Загл. с экрана.

Методические указания к выполнению лабораторной работы составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Механика жидкости и газа. Основы теплогазоснабжения и вентиляции» и предназначены для студентов направления подготовки бакалавров 08.03.01 Строительство всех форм обучения.

© КузГТУ  
Дворовенко И.В.  
Богомолов А.Р.

## 1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Целью лабораторной работы является исследование гидродинамики движения жидкости в трубах с различными местными сопротивлениями.

Задачами исследования являются:

- определение зависимости гидравлического сопротивления участка трубопровода от расхода жидкости;
- проверка уравнений расчета потерь давления (гидравлического сопротивления) при движении жидкости по трубопроводам;
- влияние местных сопротивлений на расход жидкости.

Лабораторная работа выполняется на виртуальной модели системы трубопроводов, параллельно подключенных к насосу. В ходе работы студенты задают размеры трубопроводов, выбирают гидравлическую схему с одним или несколькими параллельными участками трубопроводов, устанавливают расходы жидкости, изменяют величину местных сопротивлений, измеряют количество жидкости, прошедшей через участок трубопровода за определенное время, и давления в различных точках стенда.

На основе расчета и анализа полученных результатов студенты делают выводы в соответствии с задачей исследования.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

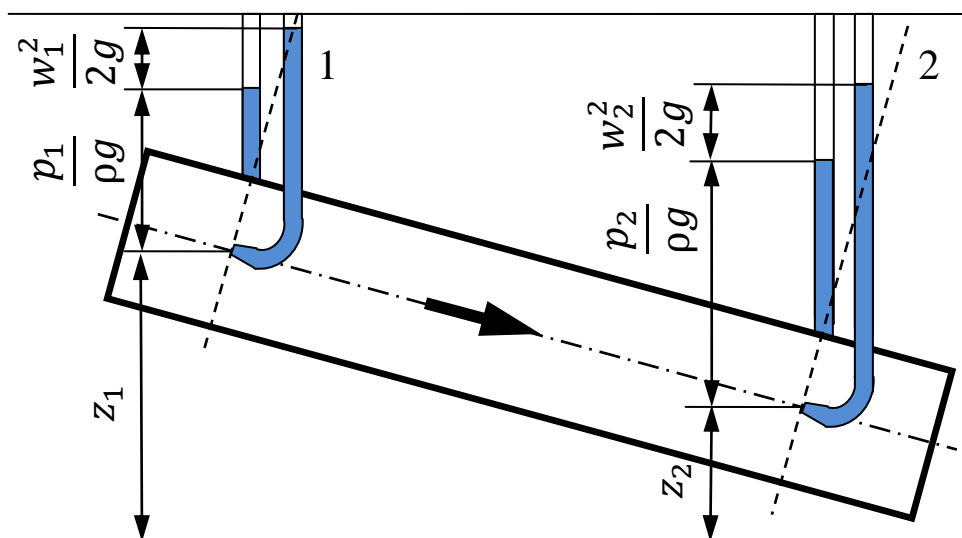


Рис.1. Движение жидкости по трубопроводу  
1,2 – сечения трубопровода

При движении жидкости по трубопроводам (рис.1) часть энергии потока расходуется на преодоление гидравлического сопротивления, обусловленного

вязкостью жидкости, режимом ее движения и трением жидкости о стенку. Поэтому общее количество энергии потока по длине трубопровода будет непрерывно уменьшаться вследствие безвозвратно теряемой энергии потока, затрачиваемой на трение. Уравнение Бернулли для движения реальной жидкости в двух сечениях потока записывается в виде

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g} + h_n, \quad (1)$$

где  $z_1, z_2$  – нивелирная высота (геометрический напор) в двух сечениях трубопровода, м;  $\frac{p_1}{\rho g}, \frac{p_2}{\rho g}$  – пьезометрический напор, м;  $\frac{w_1^2}{2g}, \frac{w_2^2}{2g}$  – скоростной (динамический напор), м;  $h_n$  – потерянный напор на участке 1-2, м. Сумма  $z + \frac{p}{\rho g}$  является полным гидростатическим напором.

Уравнение (1) может быть представлено в другом виде:

$$\rho g z_1 + p_1 + \frac{\rho w_1^2}{2} = \rho g z_2 + p_2 + \frac{\rho w_2^2}{2} + \Delta p, \quad (2)$$

где  $\rho g z_1, \rho g z_2$  – удельная потенциальная энергия положения в двух сечениях трубопровода, н/м<sup>2</sup>;  $p_1, p_2$  – удельная потенциальная энергия давления, н/м<sup>2</sup>;  $\frac{\rho w_1^2}{2}, \frac{\rho w_2^2}{2}$  – удельная кинетическая энергия, н/м<sup>2</sup>;  $\Delta p = \rho g h_n$  – потерянное давление на участке 1-2, равное гидравлическому сопротивлению трубопровода, н/м<sup>2</sup>. Сумма  $\rho g z + p$  выражает полную удельную потенциальную энергию.

В виде (2) уравнение Бернулли является частным случаем закона сохранения энергии и выражает энергетический баланс потока жидкости: при установившемся движении жидкости сумма потенциальной и кинетической энергии жидкости для каждого поперечного сечения потока остается неизменной с учетом потерь энергии на преодоление гидравлического сопротивления трубопровода.

Расчет гидравлического сопротивления является важной инженерной задачей, связанной с определением требуемой мощности перекачивающих устройств.

Потери давления в трубопроводе обусловлены сопротивлением трения и местными сопротивлениями и в общем случае определяются формулой:

$$\Delta p = \Delta p_T + \Delta p_M, \quad (3)$$

где  $\Delta p_T$  – потери давления на трение по длине трубопровода, н/м<sup>2</sup>;  $\Delta p_M$  – потери давления на преодоление местных сопротивлений,

возникающих при любых изменениях величины скорости и направления потока, н/м<sup>2</sup>.

Потери давления на трение зависят от режима течения жидкости (ламинарный или турбулентный) и могут быть рассчитаны по уравнению Дарси:

$$\Delta p_T = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho w^2}{2}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – безразмерный коэффициент сопротивления трения;  $L$  – длина элемента трубопровода, м;  $d$  – гидравлический диаметр (для труб круглого сечения – диаметр трубопровода), м;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  – средняя по сечению скорость движения жидкости в трубопроводе, м/с.

Физические свойства жидкости определяются при средней температуре жидкости в трубопроводе.

Коэффициент сопротивления трения  $\lambda$  гладкой круглой трубы зависит только от числа Рейнольдса, которое определяют по формуле

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu}, \quad (5)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с.

При изотермическом ламинарном течении в круглой трубе ( $Re < 2000$ ) коэффициент  $\lambda$  рассчитывается по формуле

$$\lambda = \frac{64}{Re}; \quad (6)$$

при турбулентном течении ( $4000 < Re < 10^{12}$ ) используется формула А. Д. Альтшуля:

$$\lambda = \frac{1}{(1,82 \cdot \lg Re - 1,64)^2}; \quad (7)$$

в более узком диапазоне чисел Рейнольдса ( $4000 < Re < 10^5$ ) можно воспользоваться формулой Блазиуса:

$$\lambda = \frac{1}{(100 \cdot Re)^{1/4}}. \quad (8)$$

В переходной области течения ( $2000 < Re < 4000$ ) точных расчетных зависимостей нет. Для определения  $\lambda$  можно воспользоваться данными, приведенными в [1] и в табл. 1.

Таблица 1

Значение коэффициента сопротивления трения в переходной области ( $2000 < Re < 4000$ )

Re	2000	2100	2200	2400	2700	3000	3400	3700	4000
$\lambda$	0,032	0,035	0,035	0,037	0,038	0,040	0,0415	0,041	0,040

Зависимость безразмерного коэффициента гидравлического сопротивления от критерия  $Re$  представлена на рис.2.

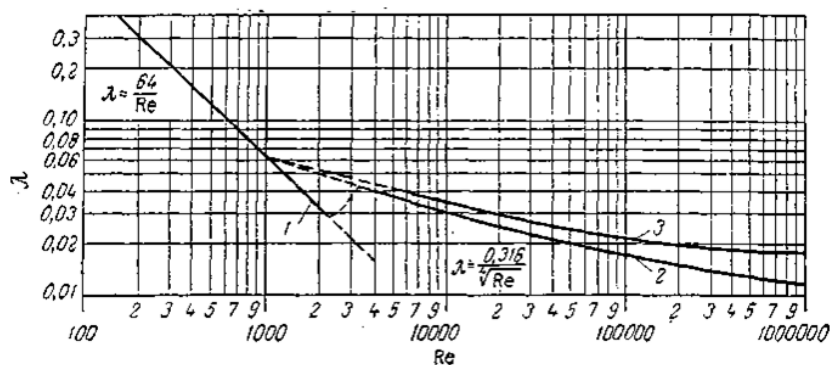


Рис.2. Зависимость  $\lambda$  от критерия  $Re$ :  
1 – гладкие и шероховатые трубы;  
2 – гладкие трубы;  
3 – шероховатые трубы [3]

Потери давления на преодоление местных сопротивлений также выражают через кинетическую энергию потока:

$$\Delta p_m = \sum \zeta \frac{\rho w^2}{2}, \quad (9)$$

где  $\zeta$  – безразмерные коэффициенты различных местных сопротивлений, значения которых приводятся в справочной литературе, например в [1];  $w$  – скорость набегающего потока, м/с. Значения коэффициентов местных сопротивлений, установленных в лабораторной работе, приведены в приложении.

Поскольку в лабораторной работе диаметр трубопровода, по которому движется поток жидкости, везде одинаков, то и скорость потока везде будет одинакова. Уравнение для расчета гидравлического сопротивления трубопровода в этом случае можно записать в виде:

$$\Delta p = \left( \lambda \frac{\sum L}{d} + \sum \zeta \right) \frac{\rho w^2}{2}, \quad (10)$$

где  $\sum L$  – сумма прямых участков изучаемого трубопровода, м.

На практике часто используют понятие эквивалентной длины местного сопротивления, т.е. такой длины прямого участка трубопровода, гидравлическое сопротивление которого будет равно гидравлическому сопротивлению местного сопротивления при одинаковых скоростях потока среды:

$$L_{\text{ЭКВ}} = \frac{\zeta d}{\lambda}. \quad (11)$$

Уравнение (10) можно записать в виде:

$$\Delta p = \lambda \frac{(\sum L + \sum L_{\text{ЭКВ}}) \rho w^2}{d} = \lambda \frac{L_{\Sigma} \rho w^2}{d}, \quad (12)$$

где  $\sum L_{\text{ЭКВ}}$  – сумма эквивалентных длин местных сопротивлений, м;  
 $L_{\Sigma} = \sum L + \sum L_{\text{ЭКВ}}$  – суммарная эквивалентная длина трубопровода, м.

### 3. ОПИСАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ

Лабораторная работа выполняется на компьютере. Виртуальная модель установки (рис.3) состоит из насоса 1, параллельных участков трубопровода 5 и 6, горизонтальных соединительных участков 7 и 8, регулирующих вентилей 2 и 3, регуляторов размеров трубопровода 11 и 12, приборов для измерения расхода 4, давления 9 и перепада давления 10.

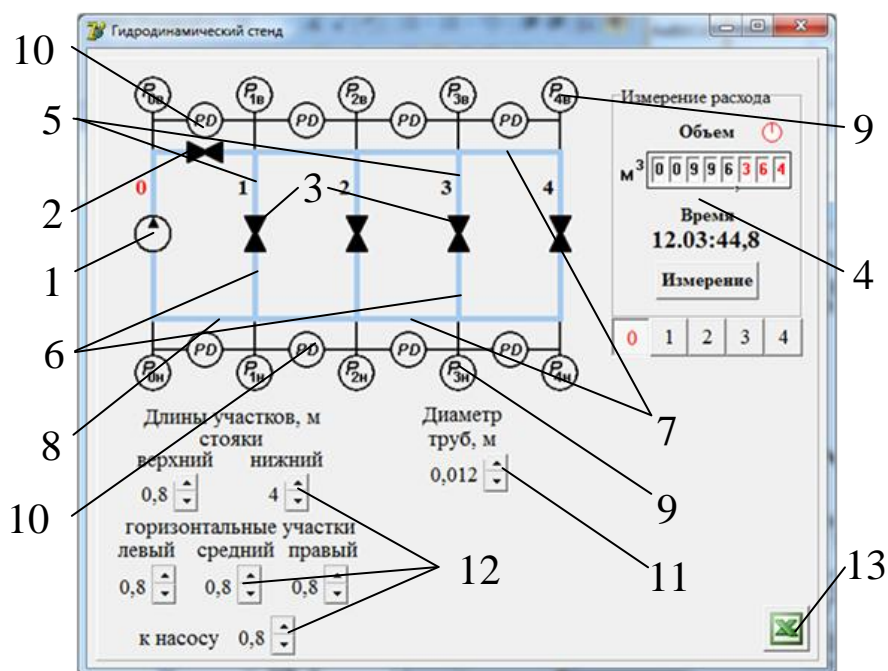


Рис. 3. Вид лабораторной установки:

- 1 – насос; 2 – регулирующий вентиль сети; 3 – регулирующие вентили участков трубопроводов; 4 – измеритель расхода; 5 – верхние стояки; 6 – нижние стояки; 7 – горизонтальные участки трубопровода; 8 – трубопровод к насосу; 9 – датчики давления; 10 – датчики перепада давления; 11 – регулятор диаметра трубопровода; 12 – регуляторы длин участков; 13 – кнопка формирования таблицы в Excel

При запуске программы насос 1 включен, вентили 2 и 3 полностью открыты.

Изменение гидравлического сопротивления и расхода жидкости через участок трубопровода осуществляется регулируемыми вентилями 3, для изменения общего расхода и сопротивления подводящей сети предназначен вентиль 2. Для увеличения расхода нужно нажать на правую часть вентиля 2 или верхнюю часть вен-

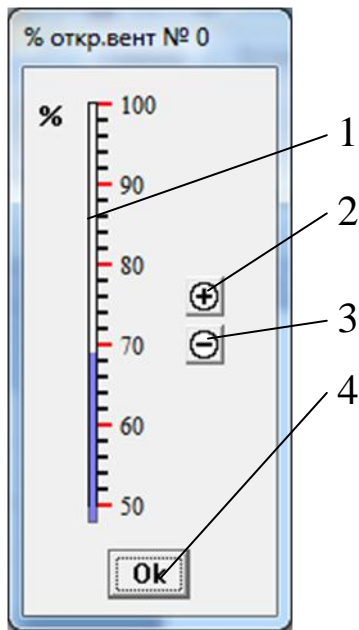


Рис. 4. Панель измерения:

- 1 – шкала прибора;
- 2 – кнопка увеличения диапазона измерения;
- 3 – кнопка уменьшения диапазона измерения;
- 4 – кнопка выключения панели

тиля 3, для уменьшения на левую и нижнюю части соответственно. При нажатии откроется окно индикации открытия вентиля (рис.4), в котором показывается процент открытия вентиля от максимально возможного. Кнопка «+» на панели предназначена для увеличения диапазона, но уменьшения точности измерений, «-» – для повышения точности и уменьшения диапазона измерений, «Ok» – для закрытия панели. Для просмотра величины открытия вентиля щелкните по цифре возле соответствующего трубопровода.

**В ходе лабораторной работы нельзя полностью перекрыть вентиль 2 и одновременно закрыть все вентили 3.**

Для увеличения значений диаметра трубопровода и его длины нужно щелкнуть по верхней кнопке регуляторов 11 или 12 (рис.3), для уменьшения – по нижней. Размеры трубопровода указываются рядом с регуляторами.

Для измерения расхода предназначен прибор 4. На приборе (рис. 5) расположены измеритель объема жидкости 2, указатель 1 для измерения тысячных долей кубического метра, таймер 3, кнопка «Измерение» 4 и переключатель точек измерения 5. Объем жидко-

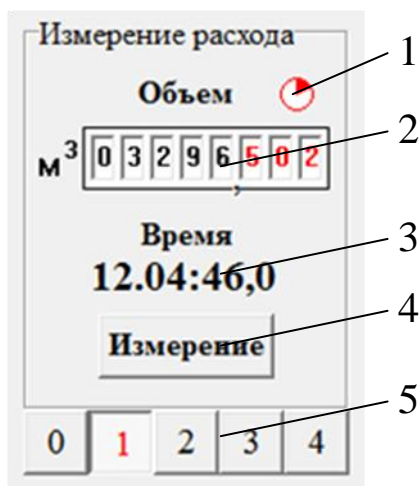


Рис. 5. Измеритель расхода:  
 1 – указатель 0,0001 м<sup>3</sup>;  
 2 – измеритель объема;  
 3 – таймер; 4 – кнопка «Измерение»; 5 – переключатель точек измерения



сти измеряется с точностью  $0,0001 \text{ м}^3$ , таймер измеряет время с точностью  $0,1 \text{ с}$ .

Измерение расхода проводится в пяти точках установки: в нагнетательном трубопроводе насоса и четырех вертикальных участках трубопроводов. Для выбора точки измерения расхода нужно щелкнуть по кнопке переключателя точек измерения 5. Номера точек замера указаны возле трубопроводов на схеме установки. При выборе точки замера она выделяется красным цветом на схеме. Измерение расхода производится следующим образом: нажимают кнопку 4, индикация объема и времени фиксируется, производят запись объема жидкости и текущего времени, снова нажимают кнопку 4, индикация объема и времени меняется, после определенного промежутка времени снова фиксируют индикацию объема и времени и повторно записывают показания объема жидкости и текущего времени. Расход определяют как отношение разности измеренных объемов к промежутку времени, в течение которого производили измерения.

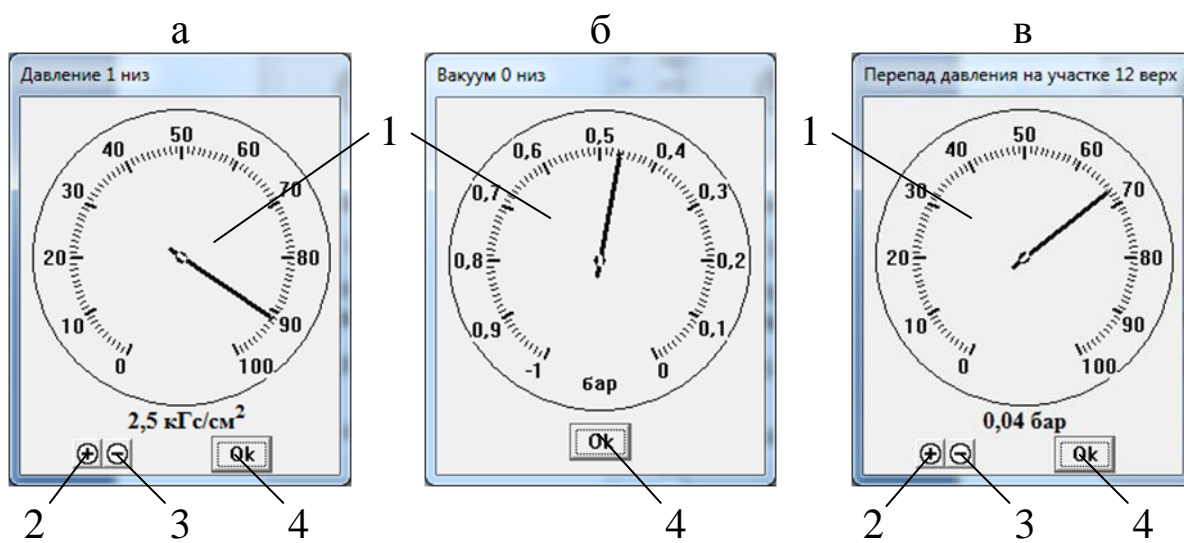


Рис. 6. Приборы для измерения давления: а – манометр; б - вакууметр; в – дифманометр; 1 – шкала прибора; 2 – кнопка увеличения диапазона измерения; 3 – кнопка уменьшения диапазона измерения; 4 – кнопка выключения панели

Измерение давлений и перепадов давлений производится при помощи датчиков 9-10 (рис.3). Для измерения нужно щелкнуть мышкой по датчику. Слева от окна лабораторной установки откроется панель прибора, аналогичная рис. 6а для измерения давления, рис. 6б для измерения вакуума и рис. 6в для измерения перепада давления. Управление приборами аналогично описанному для индикации доли открытия вентиля.

#### 4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Перед выполнением работы студент должен знать теоретические положения изучаемого физического явления, изучить устройство лабораторной установки, уметь задавать расходы жидкости, изменять гидравлическое сопротивление отдельных участков и сети в целом. Измерять расходы жидкости и давление в отдельных точках, контролировать параметры корректной работы установки.

Перед проведением работы подготавливаются таблицы «Размеры трубопроводов и свойства жидкости» и «Журнал наблюдений» для записи измеряемых величин по образцу табл. 1 и 2 приложения. Для автоматического формирования шаблонов таблиц в Excel нужно щелкнуть по кнопке 13 (рис.3).

Работу выполняют в следующей последовательности:

1. Преподаватель ставит задачу исследования.
2. Студенты определяют последовательность действий для выполнения поставленной задачи и согласовывают их с преподавателем.
3. Запускают приложение «Гидродинамический стенд». На экране компьютера появится окно программы, аналогичное рис. 3.
4. Задают размеры исследуемого трубопровода. Данные заносят в таблицу «Размеры трубопроводов и свойства жидкости».
5. Устанавливают расход жидкости при помощи регулирующих вентилях. Для отключения отдельных участков нужно полностью перекрыть соответствующий вентиль 3. При исследовании влияния местных сопротивлений на расход жидкости управляют регулирующим вентиляем 3 на соответствующем участке трубопровода, в других случаях при помощи регулирующего вентиля сети 2.
6. Производят измерения давления или перепада давления в нужных точках стенда. В таблице указывают размерность измеряемого давления.
7. Измеряют количество жидкости, прошедшей через счетчик 4 за определенное время. В зависимости от задачи исследования возможно измерение показаний нескольких счетчиков, установленных на разных участках. Сведения заносят в журнал наблюдений.
8. Повторяют пункты 5-7 нужное количество раз.

## 5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Определяют расход жидкости через исследуемый участок трубопровода:

$$V = \frac{G_2 - G_1}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $G_1, G_2$  - показания счетчика количества жидкости в начале и конце отсечки времени,  $\text{м}^3$ ;  $\tau$  - интервал времени, с.

2. Вычисляют скорость движения жидкости по трубопроводу:

$$w = \frac{V}{S} = \frac{V}{0,785 \cdot d^2}, \text{ м/с},$$

где  $S$  - площадь сечения участка трубопровода,  $\text{м}^2$ .

3. Определяют критерий  $Re$  по формуле (5).
4. Рассчитывают безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления по формулам (6-8).
5. Определяют гидравлическое сопротивление одного метра прямого трубопровода по уравнению (4)
6. Вычисляют гидравлическое сопротивление участка трубопровода по результатам измерений.
7. Определяют суммарную эквивалентную длину трубопровода  $L_{\Sigma}$  исследуемого участка трубопровода.
8. Строят графики зависимостей гидравлического сопротивления от расхода или обратных зависимостей.

## 6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет оформляется на листах бумаги формата А4 в соответствии со стандартами. Отчет должен содержать:

- а) титульный лист установленной формы;
- б) краткое изложение теоретических положений;
- в) схему проведения исследования;
- г) таблицы «Размеры трубопроводов и свойства жидкости», «Журнал наблюдений» и «Результаты расчета»;
- д) графики зависимостей;
- е) анализ результатов работы.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие физические свойства жидкости, движущейся в трубе, влияют на гидравлическое сопротивление?
2. Как рассчитать гидравлическое сопротивление по длине трубы?
3. Что такое коэффициент сопротивления трения? От чего он зависит?
4. Как влияют коррозия трубопровода и отложения на стенках на гидравлическое сопротивление?
5. Как влияет диаметр трубопровода на гидравлическое сопротивление при движении в нем среды?
6. Предложите способ уменьшения гидравлического сопротивления трубопровода при неизменной скорости жидкости и диаметре трубы.
7. Выразите число  $Re$  через расход движущейся среды?
8. Как определить требуемую мощность перекачивающего устройства для перемещения потока жидкости по трубопроводу?

## 8. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим расчетам. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1975. – 559 с.
2. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для студентов химико-технологических специальностей вузов. - Москва : Альянс , 2014. – 752 с.

## Приложение

Таблица 1

## РАЗМЕРЫ ТРУБОПРОВОДОВ И СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

Диаметр труб, м	Плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup>	Вязкость жидкости, Па*с	Высота насоса, м	Высота вентиля, м	Длины участков, м						Участок трубопровода
					стояки		горизонтальные участки				
					верхний	нижний	к насосу	левый	средний	правый	

Таблица 2

## ЖУРНАЛ НАБЛЮДЕНИЙ

№ п/п		% от-крытия венти-лей		Показания счетчиков количе-ства жидкости				Давление в точках										
				на линии на-соса		на опытном участке		0в		0н		верх уча-стка		низ уча-стка				
				Вре-мя, с	Объ-ем, м <sup>3</sup>	Вре-мя, с	Объ-ем, м <sup>3</sup>	Единица измерения	Максимальное давление	Показания прибора	Единица измерения	Максимальное давление	Показания прибора	Единица измерения	Максимальное давление	Показания прибора		
на линии насоса	на опытном участке	Начало замера	Конец замера	Начало замера	Конец замера	Начало замера	Конец замера	Начало замера	Конец замера	Единица измерения	Максимальное давление	Показания прибора	Единица измерения	Максимальное давление	Показания прибора	Единица измерения	Максимальное давление	Показания прибора

Таблица 3

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

$\frac{P}{\rho}$
Объемный расход через насос, м <sup>3</sup> /с
Объемный расход через опытный участок, м <sup>3</sup> /с
Средний объемный расход, м <sup>3</sup> /с
Средняя скорость жидкости, м/с
Критерий Re
Коэффициент сопротивления трения
Потерянный напор, м
Потерянное давление, Па
Эквивалентная длина местных сопротивлений, м

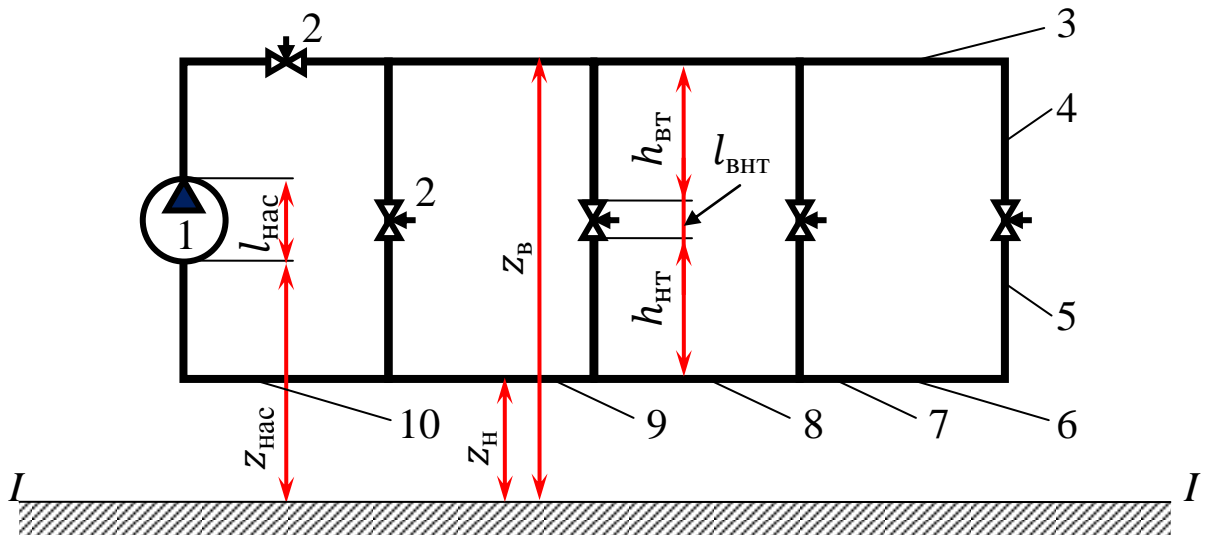


Рис. 3. Схема замера длин участков и нивелирных высот:  
*I-I* – плоскость отсчета давлений (напоров), 1 – насос, 2 – регулирующий вентиль, 3 – верхний горизонтальный трубопровод, 4 – верхний вертикальный трубопровод, 5 – нижний вертикальный трубопровод, 6 – нижний горизонтальный трубопровод, 7 – правый участок, 8 – средний участок, 9 – левый участок, 10 – участок к насосу

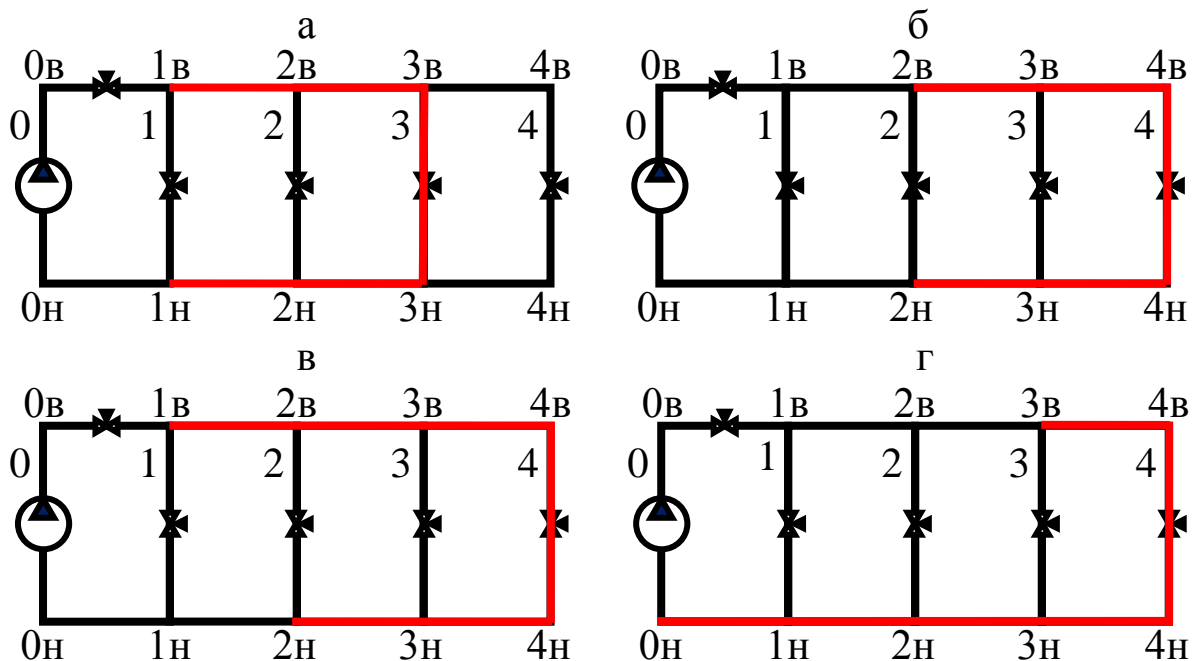


Рис. 3. Точки замера давлений и примеры обозначения опытных участков: а – опытный участок 1в-3-1н, б – опытный участок 2в-4-2н, в – опытный участок 1в-4-2н, г – опытный участок 3в-4-0н; 0в – 4в – точки замера давлений на верхнем трубопроводе, 0н – 4н - точки замера давлений на нижнем трубопроводе