

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

Кафедра теплоэнергетики

И.В. Дворовенко
А.Р. Богомолов
Л.Ю. Беляевская

ПОСТРОЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА

**Методические указания к лабораторной работе по дисциплине
«Гидрогазодинамика» для студентов всех форм обучения**

Рекомендовано учебно-методической комиссией направления
подготовки бакалавров 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
в качестве электронного издания
для использования в учебном процессе

Кемерово 2016

Рецензенты:

Темникова Е.Ю. – к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики;
Сливной В.Н. – к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики.

Дворовенко Игорь Викторович
Богомолов Александр Романович
Беляевская Лина Юрьевна

Построение гидравлической характеристики участка трубопровода [Электронный ресурс]: методические указания к лабораторной работе по дисциплине «Гидрогазодинамика» для студентов направления подготовки бакалавров 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», всех форм обучения / И.В. Дворовенко, А.Р. Богомол, Л.Ю. Беляевская; КузГТУ. – Кемерово, 2016. – Систем. требования: Pentium IV ; ОЗУ 8 Гб ; Windows XP ; мышь. – Загл. с экрана.

Методические указания к выполнению лабораторной работы составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Гидрогазодинамика» и предназначены для студентов направления подготовки бакалавров 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

© КузГТУ, 2016
© Дворовенко И.В.,
Богомол А.Р.,
Беляевская Л.Ю., 2016

1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Целью лабораторной работы является исследование движения жидкости в прямой трубе с местным сопротивлением.

Задачей исследования является построение гидравлической характеристики трубопровода, т.е. определение зависимости потери напора (давления) по длине трубопровода. В ходе лабораторной работы студенты также определяют влияние величины местного сопротивления на расход жидкости через рабочий участок.

Лабораторная работа выполняется на компьютере. В качестве лабораторной установки используется виртуальная модель гидравлической системы, с шестью насосами, которые могут быть включены параллельно или (и) последовательно. В ходе работы студенты задают схему включения насосов в гидравлическую систему, марку насосов, задают размеры трубопровода, изменяют величину местных сопротивлений, измеряют количество жидкости, прошедшей через участок трубопровода за определенное время, давления на входе и выходе участка и блока насосов, перепад давления на участке и повышение давления насосами.

На основе расчета и анализа полученных результатов студенты строят графики гидравлического режима системы, делают выводы в соответствии с задачей исследования.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

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. 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.

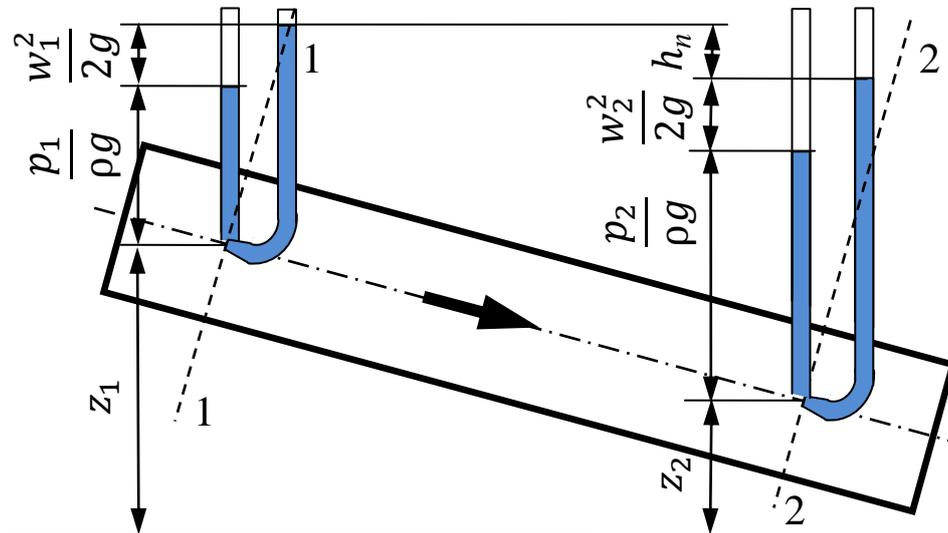


Рис. 1. Движение жидкости по трубопроводу
1, 2 – сечения трубопровода

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/м²; p_1, p_2 – удельная потенциальная энергия давления, н/м²; $\frac{\rho w_1^2}{2}, \frac{\rho w_2^2}{2}$ – удельная кинетическая энергия, н/м²; $\Delta p = \rho g h_n$ – потерянное давление на участке 1–2, равное гидравлическому сопротивлению трубопровода, н/м². 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

$$\Delta p = \Delta p_{\text{т}} + \Delta p_{\text{м}}, \quad (3)$$

где $\Delta p_{\text{т}}$ – потери давления на трение по длине трубопровода, н/м²; $\Delta p_{\text{м}}$ – потери давления на преодоление местных сопротивлений, возникающих при любых изменениях величины скорости и направления потока, н/м².

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

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

где λ – безразмерный коэффициент сопротивления трения; L – длина элемента трубопровода, м; d – гидравлический диаметр (для труб круглого сечения – диаметр трубопровода), м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; w – средняя по сечению скорость движения жидкости в трубопроводе, м/с.

Физические свойства жидкости определяются при средней температуре жидкости в трубопроводе.

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

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

где μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с.

При изотермическом ламинарном течении в круглой трубе ($\text{Re} < 2000$) коэффициент λ рассчитывается по формуле

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

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

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

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

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

В переходной области течения ($2000 < Re < 4000$) точных расчетных зависимостей нет. Для определения λ 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
λ	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.

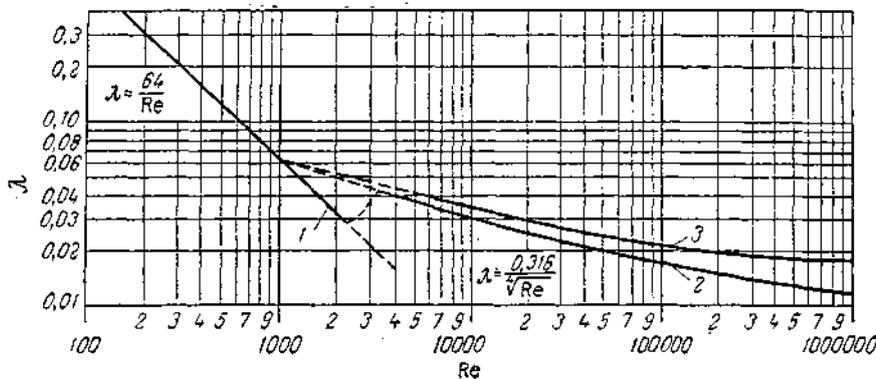


Рис. 2. Зависимость λ от критерия Re: 1 – гладкие и шероховатые трубы; 2 – гладкие трубы; 3 – шероховатые трубы

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 ζ – 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 гидравличе-

скому сопротивлению местного сопротивления при одинаковых скоростях потока. Уравнение (10) можно записать в виде

$$\Delta p = \lambda \frac{(\sum L + \sum L_{\text{ЭКВ}}) \rho w^2}{d \cdot 2} = \lambda \frac{L_{\Sigma} \rho w^2}{d \cdot 2}, \quad (11)$$

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

Для построения гидравлической характеристики участка трубопровода необходимо провести измерения расхода жидкости через участок и перепада давления в нем при различных расходах жидкости, но постоянной величине местных сопротивлений и размерах трубопровода. Для определения влияния величины местных сопротивлений на расход жидкости через участок изменяют значение сопротивлений, установленных на участке.

3. ОПИСАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ

Лабораторная работа выполняется на компьютере. Виртуальная установка (рис. 4) состоит из рабочего участка 1, шести насосов 2, соединительных трубопроводов 3, регулирующих вентилей 4 и 5, списка насосов 8, регуляторов размеров трубопроводов 9–11, приборов для измерения расхода, давления и перепада давления 12–18, кнопок управления работой установки 6 и 7.

Перед запуском установки необходимо указать один или несколько насосов кнопками 6 в зависимости от задачи исследования, установить длину и диаметр трубопроводов, выбрать марку насосов в списке 8. Для выбора насоса нужно установить флажок напротив его изображения, для отказа – флажок снять. Кнопка запуска 7 может быть недоступна при установке некорректного числа насосов. При выполнении лабораторной работы можно устанавливать один насос, два или три насоса последовательно или одинаковое количество насосов при параллельном соединении. После нажатия кнопки «Запуск/Останов» будут недоступны регуляторы размеров трубопровода, список марок насосов, кнопки выбора насосов. Для активации этих элементов установки необходимо остановить насосы, т.е. нажать кнопку «Запуск/Останов» еще раз.

Изменение расхода жидкости осуществляется регулирующими вентилями 4 и 5. Для увеличения расхода нужно нажать на правую часть вентиля 5 или верхнюю часть вентиля 4, для уменьшения на левую и нижнюю части соответственно. При нажатии откроется окно индикации открытия вентиля (рис.5), 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.

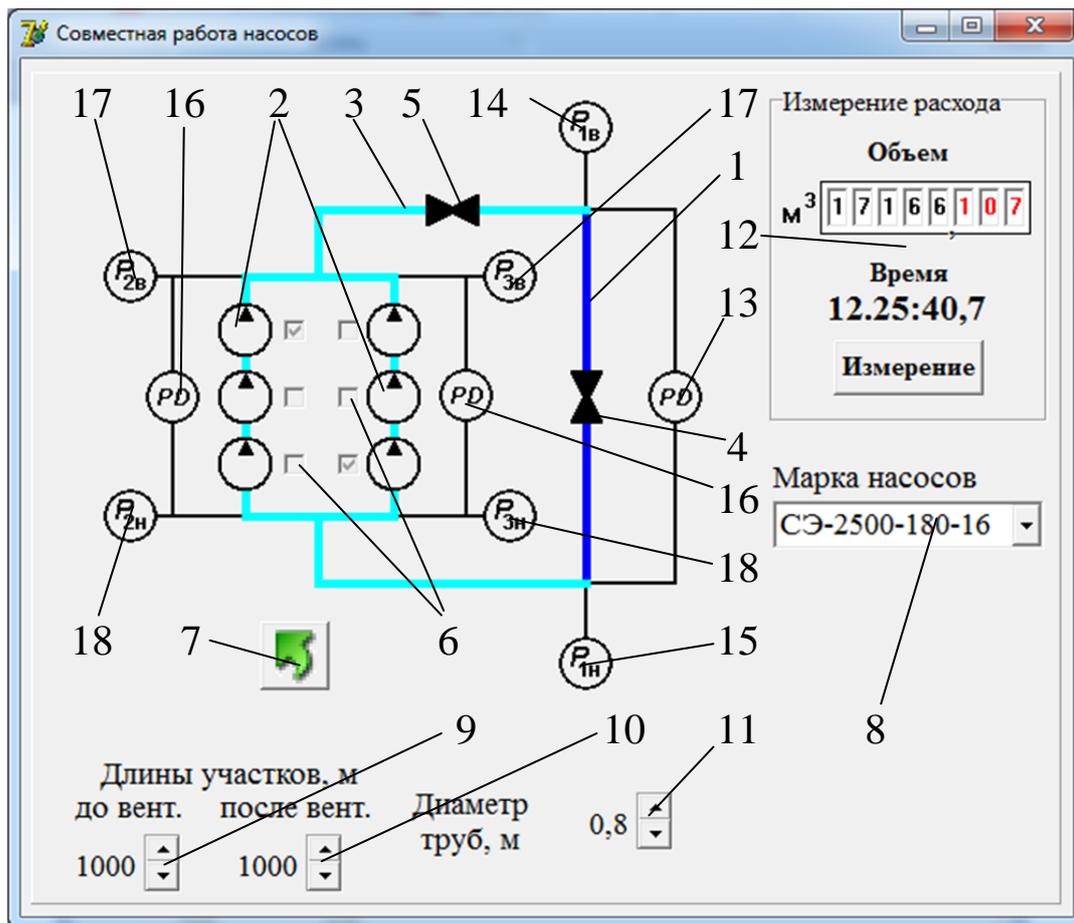


Рис. 4. Лабораторная установка по определению гидравлической характеристики участка трубопровода:
 1 – рабочий участок; 2 – насосы; 3 – сетевой трубопровод; 4 – регулирующий вентиль на рабочем участке; 5 – регулирующий вентиль на сетевом трубопроводе; 6 – кнопки управления насосами; 7 – кнопка запуска/остановки насосов; 8 – список насосов; 9, 10 – регуляторы длины рабочего участка; 11 – регулятор диаметра трубопроводов; 12 – измеритель расхода жидкости; 13 14, 15, – измерение перепада давления и давления на входе, выходе рабочего участка; 16, 17, 18 – измерение перепада давления, давления на нагнетании и всасе насосов

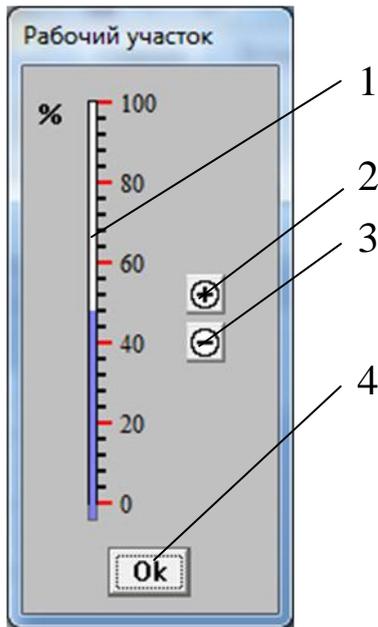


Рис. 5. Панель измерения:
1 – шкала прибора;
2 – кнопка увеличения диа-
пазона измерения;
3 – кнопка уменьшения диа-
пазона измерения; 4 – кноп-
ка выключения панели



Рис. 6. Измеритель расхода:
1 – измеритель объема;
2 – таймер; 3 – кнопка
"Измерение"

Для увеличения значений длины и диаметра трубопровода нужно щелкнуть по верхней кнопке регуляторов 9, 10 или 11 (рис. 4), для уменьшения – по нижней. Размеры трубопровода указываются рядом с регуляторами. Для выбора марки насоса нужно установить курсор мыши на кнопку справа от списка 8 и щелкнуть левой кнопкой мыши, в раскрывшемся списке поместить курсор мыши на название нужного насоса и еще раз щелкнуть левой кнопкой.

Для измерения расхода предназначен прибор 12. На приборе (рис. 6) расположены измеритель объема жидкости, 1, таймер 2 и кнопка "Измерение" 3. Объем измеряется с точностью $0,001 \text{ м}^3$, таймер измеряет время с точностью $0,1 \text{ с}$. Измерение расхода производится следующим образом: нажимают кнопку 3, индикация объема и времени фиксируется, производят запись объема жидкости и текущего времени, снова нажимают кнопку 3, 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.

Измерение давлений и перепадов давлений производится при помощи датчиков 13–18. Для измерения нужно щелкнуть мышкой по датчику. Слева от окна лабораторной установки откроется панель прибора,

аналогичная рис. 7. После проведения измерения можно закрыть панель, щелкнув по кнопке "Ok", или щелкнуть по другому датчику.



Рис. 7. Измерение давления:
 1 – шкала прибора;
 2 – кнопка увеличения диапазона измерения;
 3 – кнопка уменьшения диапазона измерения; 4 – кнопка выключения панели

4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Перед выполнением работы студент должен знать теоретические положения изучаемого физического явления, изучить устройство лабораторной установки, уметь подключать и отключать насосы к сети, изменять гидравлическое сопротивление отдельных участков сети, запускать и останавливать насосы, изменять размеры трубопроводов, измерять расход жидкости и давление (перепад давления) в отдельных точках.

Перед проведением работы подготавливается журнал наблюдений для записи измеряемых величин по образцу табл. 1 приложения.

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. 4.
4. Устанавливают размеры трубопровода регуляторами 9–11.
5. Выбирают марку насоса регулятором 8.

6. Задают схему включения насосов при помощи кнопок 6. При некорректной схеме включения (см. п. 3) кнопка запуска/остановки 7 будет недоступна.
7. Запускают установку кнопкой 7.
8. Построение гидравлической характеристики сети:
 - а. Задают величину открытия вентиля 4
 - б. Измеряют перепад давления и давления в точках рабочего участка с помощью датчиков 13–15.
 - в. Определяют расход жидкости при помощи прибора 12.
 - г. Повторяют пункты 8а–8в нужное количество раз.
9. Определение влияния величины местного сопротивления на расход жидкости:
 - а. Задают величину открытия вентиля 4 или 5
 - б. Измеряют перепад давления и давления в точках линии насосов 16–18 или рабочего участка с помощью датчиков 13–15.
 - в. Определяют расход жидкости при помощи прибора 12.
 - г. Повторяют пункты 9а–9в нужное количество раз.
10. В журнал наблюдений записывают размеры трубопровода, марку исследуемого насоса, схему включения насосов, показания приборов 12–18.

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Рассчитать объемный расход по формуле

$$V = \frac{W_2 - W_1}{\tau_2 - \tau_1}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где W_1 и W_2 – объемы рабочего вещества в первом и втором за-
мере, м^3 ; τ_1 , τ_2 – время первого и второго замера соответствен-
но, с.

2. Рассчитать среднюю скорость движения жидкости w .
3. Рассчитать критерий Рейнольдса по уравнению

$$\text{Re} = \frac{wd\rho}{\mu},$$

где μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с.

4. Определить перепад давления в паскалях и потерю напора в метрах в трубопроводе по данным измерений.

5. Построить графики гидравлической характеристики участка трубопровода.
6. Рассчитать перепад давления в паскалях и потерю напора в метрах в трубопроводе по уравнению 4.
7. Определить эквивалентную длину местных сопротивлений участка трубопровода и суммарную эквивалентную длину.
8. Построить график по уравнению 11.
9. Провести анализ полученных результатов.

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) принципиальную схему установки;
- г) таблицы "Журнал наблюдений" и "Результаты расчета";
- д) графики изменения параметров;
- е) анализ результатов работы.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое гидравлическая характеристика трубопровода.
2. Методика построения гидравлической характеристики участка трубопровода.
3. Какие виды сопротивления движению жидкости оказывает трубопровод.
4. Какие свойства жидкости, движущейся в трубе, влияют на перепад давления?
5. Как влияет изменение температуры жидкости на гидравлическое сопротивление трубопровода?
6. Напишите уравнение для расчета потери напора в трубопроводе.
7. Как изменится сопротивление трубопровода при изменении диаметра трубопровода в два раза; длины трубопровода в де-

- сять раз, при изменении плотности среды, движущейся по трубопроводу, в три раза; при изменении вязкости среды в два раза.
8. Как увеличить крутизну гидравлической характеристики трубопровода.
 9. Что такое эквивалентная длина местного сопротивления, как ее рассчитать.

8. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов. – 7-е изд. стереот. – М. : Издательство МЭИ, 2001. – 472 с.: ил.
2. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим расчетам. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1975. – 559 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

$\frac{N_0}{P/P}$
Объемный расход V , м ³ /с
Скорость жидкости w , м/с
Критерий Re
Напор, создаваемый насосом, м
Перепад давления, создаваемый насосом, Па
Потери напора на участке трубопровода, м
Перепад давления на участке трубопровода, Па
Перепад давления, рассчитанный по уравнению (11), Па
Потери напора по уравнению (11)