

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П.О.Сухого»

Кафедра «Гидропневмоавтоматика»

ОТЧЕТ  
по лабораторным работам  
по курсу «Теория и проектирование гидропневмосистем»

Выполнил ст. гр. ГА-41

---

(фамилия И.О.)

Проверил ст.преподаватель  
Андреев Ю.А.

# Лабораторная работа №1

## Изучение теоретических основ объемного гидропривода

*Цель работы:* ознакомиться с теоретическими основами принципа действия объемного гидропривода, устройством опытной установки, изучить виды измерительных приборов для определения параметров гидропривода, научиться измерять параметры гидропривода.

### 1.1 Общие сведения

Механическая энергия состоит из трех частей: энергии положения, потенциальной энергии давления и кинетической энергии. В объемных гидромашинах используется удельная потенциальная энергия давления, которая с помощью объемных гидравлических двигателей преобразовывается в механическую работу; остальными видами механической энергии обычно пренебрегают.

Принцип действия объемных гидроприводов основан на высоком объемном модуле упругости (не сжимаемости) жидкости и на законе Паскаля: всякое изменение давления в какой-либо точке покоящейся капельной жидкости, не нарушающее ее равновесия, передается в другие точки без изменения. Кроме закона Паскаля при расчетах объемного гидропривода обычно используют следующие законы: закон Архимеда, законы Ньютона.

Жидкость в гидравлике рассматривают как непрерывную среду, заполняющую пространство без пустот и промежутков. Когда жидкость находится в равновесии, то под действием внешних сил в жидкости возникает давление. Давление в неподвижной жидкости называется *гидростатическим давлением*. Оно обладает двумя свойствами:

- 1) на внешней поверхности жидкости оно всегда направлено по нормали внутрь объёма жидкости;
- 2) в любой точке внутри жидкости оно по всем направлениям одинаково, т.е. зависит от угла наклона площадки, по которой действует.

В общем случае величина среднего давления  $p_{\text{ср}}$  будет равна

$$p_{\text{ср}} = \frac{F}{S}, \text{ Па}$$

Сила  $F$ , действующая на единицу площади  $S$  при стремлении (стягивании) этой площади к размерам точки  $A$ , называется силой *гидростатического давления*.

За единицу давления в Международной системе единиц СИ принят *Паскаль* – давление, вызываемое силой 1Н, равномерно распределённой по нормальной к ней поверхности площадью 1 м<sup>2</sup>.

В технике в настоящее время продолжают применять также систему единиц метр, килограмм-сила, секунда (МКГСС), в которой за единицу дав-

ления принимается  $1 \text{ кгс/м}^2$ . Широко используют также внесистемные единицы – техническую атмосферу и бар:

$$1 \text{ атм} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 10000 \text{ кгс/м}^2 = 98100 \text{ Па}; 1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 1,02 \text{ атм}.$$

Давление часто выражается высотой столба жидкости, которая называется пьезометрической высотой или пьезометрическим напором

$$h = \frac{p}{\rho \cdot g}, \text{ м}$$

*Пьезометрическая высота* есть высота такого столба жидкости, который своим весом способен создать давление, равное гидростатическому давлению в рассматриваемой точке. Измеряется в метрах водяного столба или миллиметрах ртутного столба:

$$1 \text{ атм (физ)} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 10,33 \text{ м в. ст.};$$

$$1 \text{ атм (тех)} = 736 \text{ мм рт. ст.} = 10 \text{ м в. ст.}$$

Рассмотрим случай равновесия жидкости, когда на неё действует одна сила тяжести, и получим уравнение, позволяющее находить гидростатическое давление в любой точке рассматриваемого объёма жидкости.

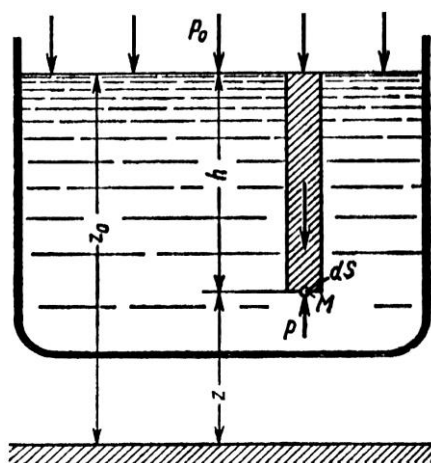


Рисунок 1.1. - Схема для вывода основного уравнения гидростатики

Пусть жидкость находится в сосуде (рисунок 1.1) и на её свободную поверхность действует давление  $p_0$ . Гидростатическое давление  $p$  в произвольно взятой точке  $M$ , расположенной на глубине  $h$  находится по формуле

$$p = p_0 \pm \rho \cdot g \cdot h = p_0 \pm h \cdot \gamma \text{ Па},$$

где  $\rho$  - плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\gamma$  - удельный вес жидкости,  $\text{Н/м}^3$ .

Полученное уравнение называют *основным уравнением гидростатики*; по нему можно подсчитывать давление в любой точке покоящейся жидкости.

Величина  $p_0$  является одинаковой для всех точек объёма жидкости, поэтому можно сказать, что давление, приложенное к внешней поверхности жидкости, передаётся всем точкам этой жидкости и по всем направлениям одинаково. Это *закон Паскаля*.

Рассмотрим случай, когда давление в сосуде больше атмосферного значения  $p_0 > p_{\text{атм}}$ .

Давление  $p_0$ , определенное с учетом атмосферного давления, называется *абсолютным* давлением и определяется по формуле

$$p_0 = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}}, \text{ Па.}$$

Давление  $p_0$ , действующее на свободной поверхности жидкости в сосуде, превышает атмосферное давление на величину давления столба жидкости  $\rho \cdot g \cdot h$ . Это давление называется *избыточным* давлением

$$p_{\text{изб}} = \rho \cdot g \cdot h, \text{ Па.}$$

Недостаток до атмосферного давления называется *вакуумметрическим* давлением

$$p_0 = p_{\text{атм}} - \rho \cdot g \cdot h_{\text{вак}} = p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}} \text{ или } p_{\text{вак}} = -\rho \cdot g \cdot h_{\text{вак}} < 0.$$

## 1.2 Приборы для измерения давления

Для измерения давления жидкости применяются различные приборы:

- ✓ манометры — для измерения избыточного (или манометрического) давления,
- ✓ вакуумметры — для измерения вакуума,
- ✓ дифференциальные манометры — для измерения разности (перепада) давлений в двух точках (например, в двух сосудах).

Эти приборы могут быть:

- ✓ жидкостными,
- ✓ пружинными,
- ✓ поршневыми,
- ✓ электрическими,
- ✓ комбинированными.

Наиболее широкое распространение получили жидкостные и пружинные приборы.

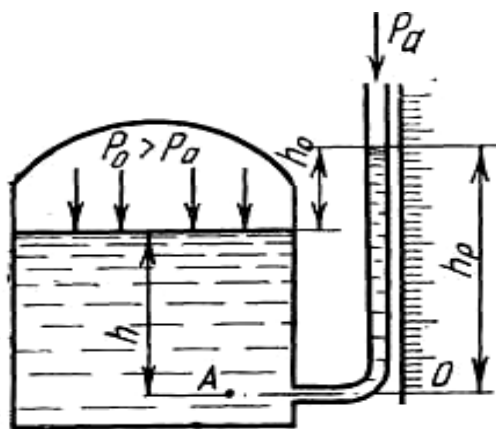


Рисунок 1.2. - Пьезометр

*Жидкостный манометр* (рисунок 1.2) – пьезометр представляет собой стеклянную трубку, нижний конец которой соединен с точкой, где измеряется

давление, а верхний открыт и сообщается с атмосферой.

Если давление на свободной поверхности жидкости в закрытом сосуде больше атмосферного, то уровень в пьезометрической трубке поднимется на высоту  $h_p$ , называемую *пьезометрической высотой*. Ее измерение производится по установленной строго вертикально линейной шкале.

Высоту столба жидкости в пьезометре  $h_p$  можно найти из условия равновесия жидкости по формуле

$$h_p = \frac{p_{\text{абс}}^A - p_{\text{атм}}}{\rho \cdot g} = \frac{p_{\text{изб}}^A}{\rho \cdot g}, \text{ м.}$$

Таким образом, по высоте столба жидкости в пьезометре с открытым верхним концом можно определить величину избыточного давления в сосуде на уровне точки подключения.

Для точки А, находящейся под свободной поверхностью в сосуде на глубине  $h$  абсолютное давление равно

$$p_{\text{абс}}^A = p_0 + \rho \cdot g \cdot h_p$$

где  $p_0$  — давление на свободной поверхности в сосуде.

Жидкость поднимается в пьезометрах на определенную высоту и если установить несколько пьезометров на одном уровне, то измеряя пьезометрическую высоту (или давление) в каждом сечении можно получить пьезометрическую линию (рисунок 1.3).

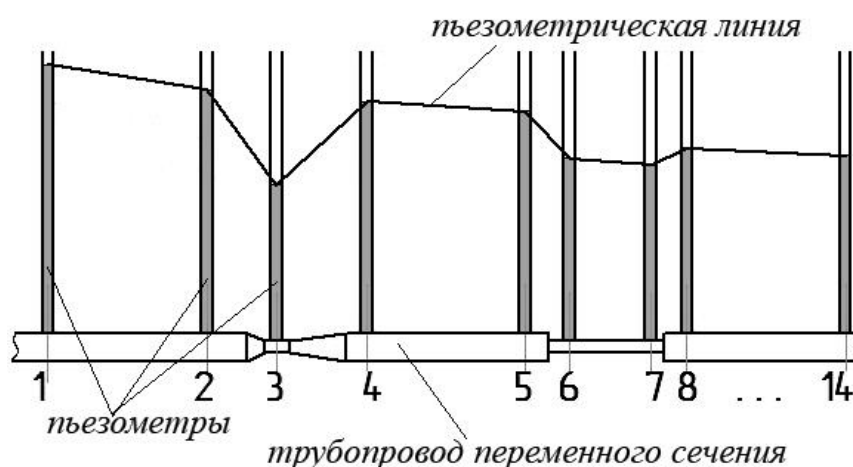


Рисунок 1.3. - Пьезометрическая линия

Для измерения небольших давлений (не более 0,15...0,20 атм) применяются пьезометры, наполненные водой, для больших давлений, но не свыше 2,0...2,5 атм (0,2...0,25 МПа) – пьезометры, наполненные ртутью, так называемые *ртутные манометры*.

Для измерений значительных величин избыточных давлений в жидкостях в практике используются металлические манометры. В *пружинном манометре* (рисунок 1.4) жидкость или газ поступает через штуцер 1 в изогнутую медную или стальную полую трубку-пружину 2. Под действием избыточного давления трубка-пружина стремится разогнуться. Движение ее конца при помощи пластинки 3 передается на зубчатку, приводящую в движение

ние стрелку 4, отклонение которой показывает на шкале прибора величину избыточного (манометрического) давления.

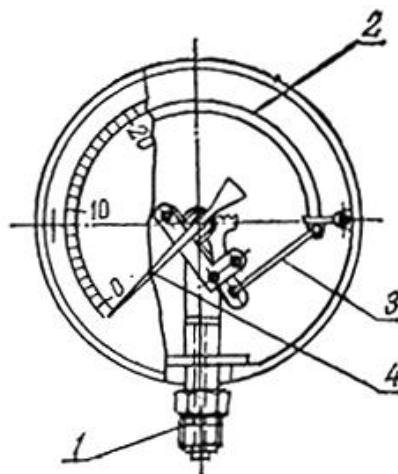


Рисунок 1.4. - Пружинный манометр

Для измерения вакуума применяются металлические *вакуумметры*, устройство которых аналогично металлическим манометрам. Кроме того, в технике используются *мановакуумметры* — приборы, одна часть шкалы которых показывает манометрическое (избыточное) давление, а другая — вакуум.

### 1.3 Описание опытной установки

Опытная установка (рисунок 1.5) состоит из резервуара 12, заполненного водой, центробежного насоса 13 с электродвигателем, расходомерного устройства (счетчика жидкости) 11, всасывающего 3 и напорного трубопроводов 4.

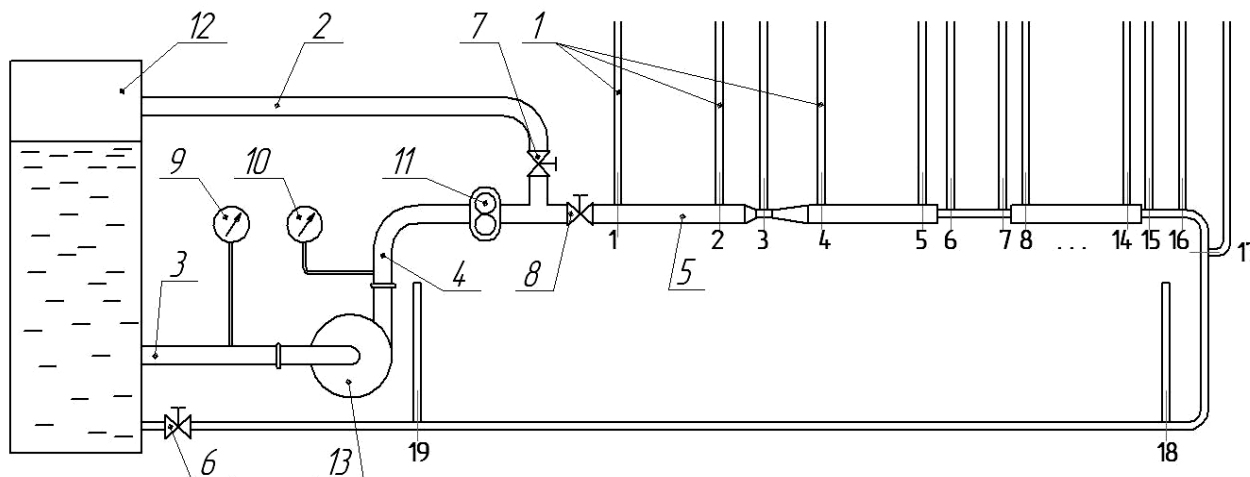


Рисунок 1.5. - Схема опытной установки

Напорная труба 4 после вентиля 8 переходит в трубопровод переменного сечения 5, на характерных участках которого установлены пьезометры 1, сливной трубопровод с вентилем 6. Вакуумметр 9 и манометр 10 служат для измерения давления соответственно на входе и на выходе из насоса.

Расходомер *11* служит для измерения количества жидкости, проходящего через поперечное сечение трубопровода.

Вентиль *6* перекрывает подачу жидкости на сливе трубопровода *5* переменного сечения. Вентиль *7* предназначен для регулирования расхода жидкости. Вентиль *8* перекрывает подачу жидкости в трубопровод переменного сечения.

В данной работе для измерения давления служат вакуумметр *9*, манометр *10* и пьезометры *1*. Пьезометры *1* сообщаются верхним концом с атмосферой, а нижним концом – с трубопроводом переменного сечения *5*. Пьезометры служат для определения избыточного давления в трубопроводе переменного сечения *5*, вакуумметр – во всасывающем трубопроводе *3*, манометр – в напорном трубопроводе *4*.

#### 1.4 Порядок проведения работы

- 1) Снять эскиз (схему) трубопровода переменного сечения с указанием геометрических размеров (диаметры сечений и расстояния между ними), а также нумерации пьезометров (сечений) (результаты внести в таблицу 1.1).
- 2) Измерить расстояние по горизонтали  $l_0$  между точкой подключения манометра *10* и центром сечения *1* на трубопроводе *5*.
- 3) Полностью открыть вентили *6* и *8*, вентиль *7* закрыть.
- 4) Включить в работу насос *13*, подающий воду из водосборного бака *12* в систему.
- 5) Установить уровень жидкости вентилем *8* в пьезометре, соответствующем сечению *1* на максимальном уровне (примерно 1 м).
- 6) Произвести измерения давления в трубопроводах *4* и *5* по манометру *10* и пьезометрам в сечениях 1...14.
- 7) Повторить измерения три раза.

#### 1.5 Обработка опытных данных

Измерить расстояние  $l_0 =$  \_\_\_\_\_ см.

Измерить манометрическое давление  $p_{\text{ман}} =$  \_\_\_\_\_ Па.

Измерить пьезометрический напор сечения *1*:  $h_p =$  \_\_\_\_\_ см.

Определить пьезометрическое давление исходя из пьезометрического напора  $h_p$  по формуле

$$p_p = h_p \cdot \rho \cdot g = \text{_____} \text{ Па}$$

где  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$  – плотность воды;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

Результаты измерений и вычислений заносятся в таблицу 2.1.

Таблица 1.1 Результаты измерений и расчетов

№ сеч.	Диаметр сечения $d$ , см	Расстояние между сечениями, $l$ , см	Пьезометрический напор $h_p$ , см	Пьезометрическое давление $p_p$ , Па
1				
2				
3				
4				
...				
...				

По данным этой таблицы в масштабе построить пьезометрическую линию  $p_p = f(l)$ . За начало отсчета принять точку подключения манометра.



## Лабораторная работа №2

### Исследование характеристики короткого простого трубопровода

Цель работы: закрепление знаний по разделу "Расчет простого трубопровода", определение коэффициента сопротивления трубопровода, определение потерь давления в трубопроводе, построение характеристики простого трубопровода.

#### 2.1 Общие сведения

*Простыми* называют трубопроводы, не имеющие ответвлений и обслуживающие только одну точку. Причем, диаметр трубы, а также расход жидкости на всей длине трубы остается неизменными (рисунок 2.1, а).

Трубопроводы, у которых местные потери напора составляют менее 10 % от потерь по длине, считаются гидравлически *длинными*, если же более 10 %, то гидравлически *короткими*.

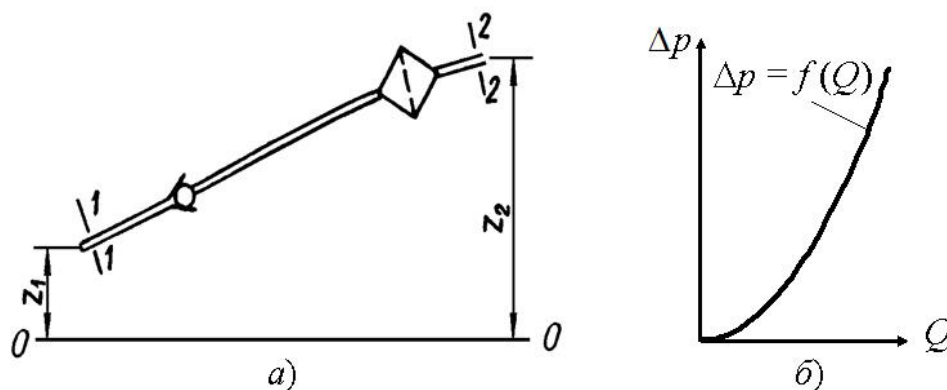


Рисунок 2.1. Простой трубопровод (а) и характеристика простого трубопровода (б)

Одной из основных задач гидравлики является расчет потерь давления в трубопроводе. Зависимость потери давления  $\Delta p$  от расхода жидкости  $Q$   $\Delta p = f(Q)$  называется гидравлической *характеристикой трубопровода*.

В общем случае потери складываются из потерь давления по длине трубопровода  $\Delta p_{\text{тр}}$  и потерь на местных сопротивлениях  $\Delta p_{\text{мс}}$ :

$$\Delta p = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{мс}}$$

Потери удельной энергии, или *гидравлические потери*, зависят от формы, размеров русла, скорости течения и вязкости жидкости, а иногда и от абсолютного давления в ней.

*Местные потери энергии* обусловлены так называемыми местными гидравлическими сопротивлениями, т.е. местными изменениями формы и размера русла, вызывающими деформацию потока. При протекании жидкости через местные сопротивления изменяется её скорость, и обычно возникают крупные вихри. Вихри образуются за местом отрыва потока от стенок и представляют собой области, в которых частицы жидкости движутся в ос-

новном по замкнутым кривым или близким к ним траекториям.

Наиболее типичные местные сопротивления и характер движения жидкости в них показаны на рисунок 2.2.

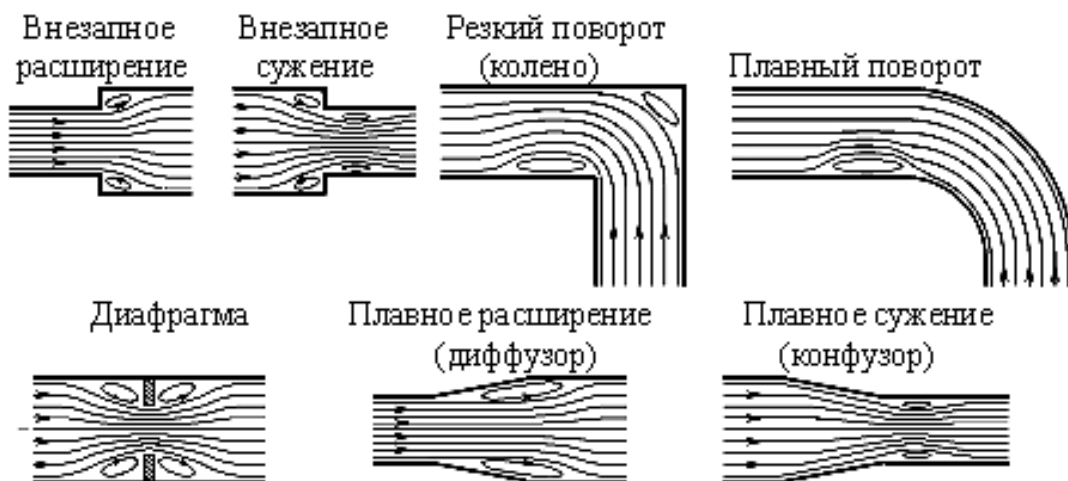


Рисунок 2.2. Схема типичных местных гидравлических сопротивлений

Во многих случаях гидравлические потери приблизительно пропорциональны скорости течения жидкости во второй степени, поэтому местные потери напора можно определить по формуле Вейсбаха

$$\Delta h_{\text{м.с}} = \zeta \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad \text{или} \quad \Delta p_{\text{м.с}} = \zeta \cdot \rho \cdot v^2 / 2,$$

где  $\rho$  – плотность рабочей жидкости

$v$  – средняя скорость по сечению в трубе, в которой установлено местное сопротивление. Если диаметр трубы и скорость в ней изменяются по длине, то для расчёта принимают большую из скоростей.

$\zeta$  – коэффициент сопротивления, значение которого постоянно для данной формы местного сопротивления.

При инженерных расчетах коэффициент местного сопротивления определяется по формулам, таблицам или графикам, которые приводятся в справочной литературе.

*Потери на трение по длине* – это потери, которые в чистом виде возникают в прямых трубах постоянного сечения, и возрастают пропорционально длине трубы.

Рассматриваемые потери обусловлены внутренним трением в жидкости и трением жидкости о стенки трубопровода, и поэтому имеются как в шероховатых, так и в гладких трубах. Эти потери определяются по формуле Дарси:

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2},$$

где  $l$  и  $d$  – длина и диаметр трубопровода;

$\lambda$  – безразмерный коэффициент потерь на трение по длине, или коэффициент Дарси, который в общем случае зависит от шероховатости стенок трубопровода и режима течения жидкости.

Режим движения жидкости определяется по числу Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu},$$

где  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости.

При ламинарном режиме движения жидкости  $Re < 2320$  коэффициент гидравлического трения определяется по формуле:

$$\lambda = 64 / Re.$$

При турбулентном режиме движения жидкости  $Re > 2320$  коэффициент гидравлического трения упрощенно определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}.$$

Т.о. зависимость потерь от расхода жидкости с учетом уравнения расхода  $Q = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v$  выражается уравнением:

$$\Delta p = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{м.с}} = \left( \lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot d^4}$$

где  $K_{\text{тр}}$  – гидравлическое сопротивление трубопровода.

Это выражение называется *характеристикой трубопровода* при турбулентном движении жидкости. Эта характеристика представляет собой зависимость суммарных потерь давления (напора) от расхода в трубопроводе  $\Delta p = f(Q)$  ( $\Delta h = f(Q)$ ) (рис. 4.1, б).

Если в трубопроводе установлены гидравлические аппараты, имеющие свои сопротивления, то их необходимо добавить к коэффициенту сопротивления трубопровода, и в результате получится суммарное гидравлическое сопротивление.

## 2.2 Описание опытной установки

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 2.3. Схема включает электродвигатель 1 и насос 2. Для предохранения системы от перегрузок служит предохранительный клапан 3. Изменение расхода и давления производится дросселями 4 и 5. В системе предусмотрен фильтр 10 для очистки попадающего в бак 11 воздуха. По манометрам 7 и 9 определять давление в точках А или В длинного трубопровода. Давление насоса определяется по манометру 8.

На данной экспериментальной установке можно производить исследования авиационного аксиально-поршневого гидромотора 6 или одноштокового гидроцилиндра 13. Изменение направления рабочей жидкости при исследовании гидромотора производится автоматически распределителем 12.

Длина хода поршня гидроцилиндра измеряется по линейке 14.

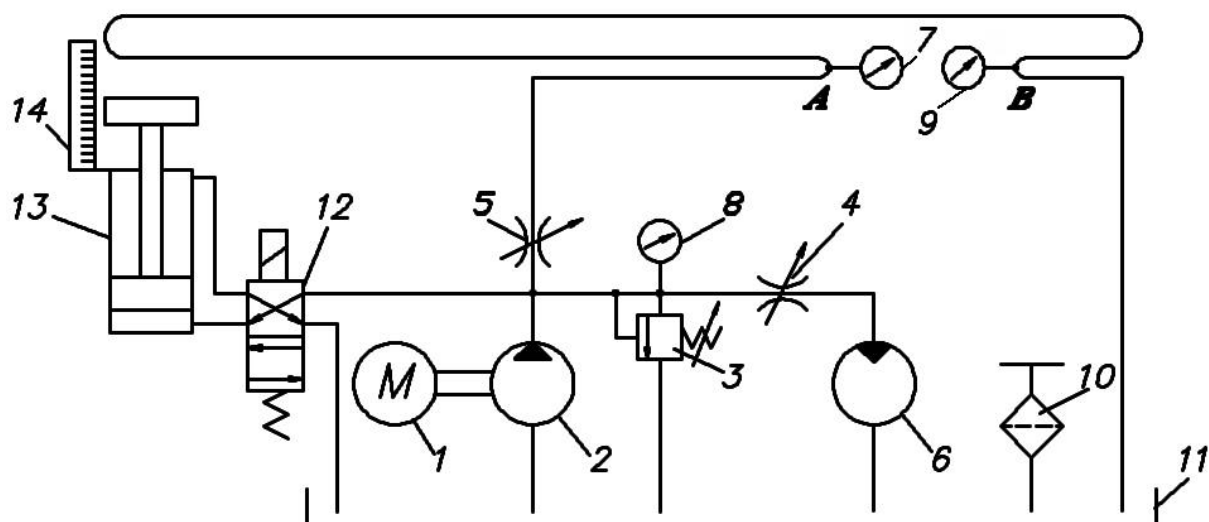


Рисунок 2.3. Схема опытной установки

## 2.3 Порядок проведения работы

- 1) Полностью закрыть дроссели 5 и 4. Включить установку.
- 2) Измерить ход поршня  $L$ , диаметр поршня  $D$  и штока  $d_{шт}$ , время движения штока внутрь гидроцилиндра  $t_{шт}$ .
- 3) Полностью открыть дроссель 4.
- 4) Ручным тахометром измерить частоту движения вала гидромотора  $n_{гм}$  и занести в таблицу 4.1.
- 5) Произвести измерение потерь давления в петле трубопровода на входе  $p_{вх}$  и на выходе  $p_{вых}$  для различных скоростей движения потока. Исходное состояние при закрытом дросселе 5 и открытом дросселе 4 соответствует нулевому расходу в петле и отсутствию показаний манометров 7 и 9. Приоткрывая дроссель 5, часть потока направляется в петлю трубопровода и измеряется давление на входе в петлю манометром 7 и на выходе из петли манометром 9.

## 2.4 Обработка результатов измерений

Измерить параметры гидроцилиндра:

ход поршня  $L = \underline{\hspace{2cm}}$  м;  
 диаметр поршня  $D = \underline{\hspace{2cm}}$  м;  
 диаметр штока  $d_{шт} = \underline{\hspace{2cm}}$  м;  
 время движения штока внутрь гидроцилиндра  $t_{шт} = \underline{\hspace{2cm}}$  с.

Определить расход жидкости, поступающей в гидроцилиндр  $Q_{ц} = Q_{н}$  по формуле (все количество жидкости от насоса идет в гидроцилиндр)

$$Q_H = Q_{\text{ц}} = S \cdot v = \frac{\pi \cdot (D^2 - d_{\text{шт}}^2)}{4} \cdot \frac{L}{t_{\text{шт}}} = \text{_____} \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $v$  – линейная скорость штока гидроцилиндра;

$S$  – площадь рабочей полости.

Определить рабочий объем насоса при частоте вращения электродвигателя  $n_{\text{дв}} = 2660$  об/мин и объемном КПД насоса  $\eta_{\text{об.н}} = 0,9$  по формуле

$$V_{0\text{н}} = \frac{Q_H}{n_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{об.н}}} = \text{_____} \text{ м}^3.$$

Определить текущее значение расхода, проходящего через гидромотор, которое определяется по формуле для каждой величины открытия дросселя 5

$$Q_{\text{гм.тек}} = \frac{V_{0\text{гм}} \cdot n_{\text{гм.тек}}}{\eta_{\text{об.гм}}} = \text{_____} \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $V_{0\text{гм}} = 2 \text{ см}^3$  – рабочий объем гидромотора;

$n_{\text{гм.тек}}$  – текущая частота вращения гидромотора;

$\eta_{\text{об.гм}} = 0,98$  – объемный КПД гидромотора.

Определить расход жидкости, поступающей в трубопровод по формуле

$$Q_{\text{тр}} = Q_H - Q_{\text{гм.тек}} = \text{_____} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Определить скорость движения жидкости в трубопроводе по формуле

$$v = \frac{4 \cdot Q_{\text{тр}}}{\pi \cdot d^2} = \text{_____} \text{ м/с},$$

где  $d = 3 \text{ мм}$  – внутренний диаметр трубопровода.

Определить режим движения жидкости по формуле

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} = \text{_____},$$

где  $\nu = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости.

Определить коэффициент гидравлического трения по формуле в п. 2.1 в зависимости от режима движения жидкости

$$\lambda = \text{_____}.$$

Рассчитать потери давления в петле трубопровода по формуле

$$\Delta p_p = \Delta p_{\text{мс}} + \Delta p_{\text{тр}} = \left( \sum \zeta_{\text{мс}} + \lambda \cdot \frac{l}{d} \right) \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \text{ Па},$$

где  $\rho = 890 \text{ кг/м}^3$  – плотность рабочей жидкости;

$\sum \zeta = \text{_____}$  – суммарный коэффициент сопротивления, в рассматриваемом трубопроводе принимаем в качестве местных сопротивлений плавные повороты с коэффициентом сопротивления  $\zeta_{\text{п}} = 0,15$  и тройники с коэффициентом сопротивления  $\zeta_{\text{тр}} = 1$ .

$l = 3,8 \text{ м}$  и  $d = 3 \text{ мм}$  – длина и диаметр трубопровода,

$$\Delta p_p = \text{_____}, \text{ Па},$$

Определить потери давления в петле трубопровода по опытным данным

$$\Delta p_{\text{оп}} = p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}} = \text{_____} \text{ Па.}$$

Сравнить значения расчетных потерь с измеренными

$$\Delta p_{\text{оп}} = \text{_____} \text{ Па, } \Delta p_{\text{р}} = \text{_____}, \text{ Па,}$$

Данные экспериментов и расчетов занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты расчетов и измерений

№ оп.	Частота вращения мотора, $n_{\text{гм.тек}}$ , об/мин	Расход гидромо- тора, $Q_{\text{гм.тек}}$ , $\text{м}^3/\text{с}$	Расход, $Q_{\text{тр}}$ , $\text{м}^3/\text{с}$	Скорость движения жидкости, $v$ , м/с	Re	$\lambda$	Давление		Потери давления	
							на входе, $p_{\text{вх}}$ , атм	на выходе, $p_{\text{вых}}$ , атм	опыт, $\Delta p_{\text{оп}}$	расчет, $\Delta p_{\text{р}}$
1										
2										

Построить характеристику трубопровода для расчётного и опытного значения потерь давления  $\Delta p_{\text{р}} = f(Q_{\text{тр}})$ ,  $\Delta p_{\text{оп}} = f(Q_{\text{тр}})$ .