



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Автотранспортные, строительные и  
дорожные средства»

## **Методические указания** для выполнения практических работ по дисциплине

### **«Гидравлические и пневматические системы машин и оборудования»**

Авторы  
Веремеенко А.А.,  
Зайцева М.М.,  
Косенко Е.Е.,  
Котесова А.А.,  
Теплякова С.В.

Ростов-на-Дону, 2018

## Аннотация

Методические указания предназначены для выполнения практических работ по дисциплине «Гидравлические и пневматические системы машин и оборудования» студентами очной формы обучения специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»

## Авторы

доцент, канд. техн. наук,  
доцент кафедры АД  
Веремеенко А.А.,  
доцент, к.т.н.,  
доцент каф. АС и ДС  
Зайцева М.М.,  
доцент каф. АС и ДС  
Косенко Е.Е.,  
к.т.н.,  
доцент каф. АС и ДС  
Котесова А.А.,  
к.т.н.,  
ассистент каф. АС и ДС  
Теплякова С.В.



## Оглавление

<b>Элементы гидропривода</b> .....	Ошибка! Закладка не определена.
Краткая теория .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
<b>Динамика жидкости</b> .....	7
Расход. Уравнение Бернулли .....	7
Режим движения жидкости .....	12
Истечение капельных жидкостей .....	18
Гидравлический удар .....	18
<b>Элементы гидродинамической теории смазки</b> .....	20
Задачи .....	20
<b>Приложение</b> .....	22
<b>Список литературы</b> .....	<b>25</b>

## ЭЛЕМЕНТЫ ГИДРОПРИВОДА

### Краткая теория

*Давление в неподвижной жидкости называется гидростатическим* и обладает следующими свойствами:

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

Уравнение, выражающее гидростатическое давление  $p$  в любой точке неподвижной жидкости при действии только лишь силы тяжести, называется *основным уравнением гидростатики*:

$$p = p_0 + \gamma h,$$

где  $p_0$  - давление на какой-либо поверхности уровня жидкости, например на свободной поверхности;  $h$  - глубина расположения рассматриваемой точки, отсчитанная от поверхности с давлением  $p_0$ .

Обычно для определения давления жидкости, вызванного воздействием на нее поверхностных сил, применяется формула:

$$p = \frac{P}{\Omega}, \text{ Па}, \quad \frac{\text{кГ}}{\text{см}^2} = \text{ат}$$

где  $P$  – сила, действующая на жидкость;

$\Omega$  – площадь, на которую действует эта сила.

Гидростатическое давление имеет размерность напряжения.

За единицу давления в Международной системе единиц (СИ) принят паскаль – давление вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м<sup>2</sup>:

$$1 \text{ Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 10^{-3} \text{ кПа} = 10^{-6} \text{ МПа}$$

В технике в настоящее время продолжают применять систему единиц МКГСС, в которой за единицу давления принимается кг/м<sup>2</sup>, кг/см<sup>2</sup>=ат.

$$1 \text{ Па} = 0,102 \frac{\text{кГ}}{\text{м}^2} \quad \text{или} \quad 1 \frac{\text{кГ}}{\text{м}^2} = 9,81 \text{ Па}$$

Кроме того, в технической системе при измерении избыточного давления применяют атмосферы избыточные (*ати*), а при

измерении абсолютного давления – атмосферы абсолютные (*ата*). Разница между абсолютным и избыточным давлением равна одной атмосфере:

$$P_{ата} = 1 + P_{ати},$$

где  $P_{ата}$  – абсолютное давление, *ата*;

$P_{ати}$  – избыточное давление, *ати*.

### Пример

Определить величину избыточного гидростатического давления (гсд) в точке *A* под поршнем (рис. 1) и в точке *B* воды на глубине 2 м от поршня, если на поршень диаметром 200 мм производится давление с силой 314 кГ.

*Решение*

Давление в точке *A*  $p_A = P/S = 4P/(\pi \cdot d^2) = 4 \cdot 314 / (3.14 \cdot 400) = 1 \text{ кГ/см}^2$ .

Давление в точке *B*  $p_B = p_A + \gamma \cdot z = 1 + 0.001 \cdot 200 = 1.2 \text{ кГ/см}^2$ .

*Ответ:* 1 кГ/см<sup>2</sup>; 1.2 кГ/см<sup>2</sup>.

### Задачи

1. Определить давление в верхнем цилиндре гидропреобразователя (рис. 2), если манометр показывает 0.48 МПа. Сила трения составляет 10% от силы давления жидкости на нижний поршень. Вес поршня 4 кН. Диаметры поршней - 400 мм и 100 мм. Манометр расположен на высоте 2.5 м. Плотность жидкости 900 кг/м<sup>3</sup>. *Ответ:* 6.57 МПа.

2. Определить показания манометра (рис. 3), если известно, что сила действующая на поршень равна 0.1 кН, диаметр поршня 100 мм, высота столба жидкости 1,5 м, плотность жидкости 800 кг/м<sup>3</sup>. *Ответ:* 0.97 кПа.

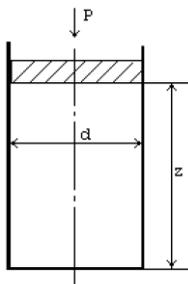


Рис. 1

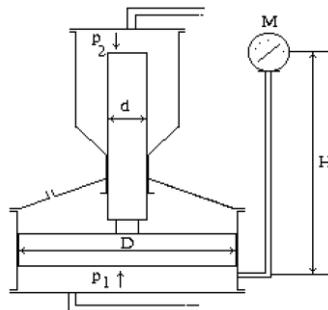


Рис. 2

3. Определить усилие пружины в регулирующем золотнике (рис. 4), поддерживающее систему в равновесии, если плотность жидкости  $870 \text{ кг/м}^3$ , диаметр поршней 80 мм и 30 мм, высота столба жидкости 1000 мм, избыточное давление в золотнике 10 кПа. *Ответ:* 79,7 Н.

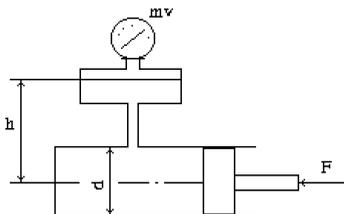


Рис. 3

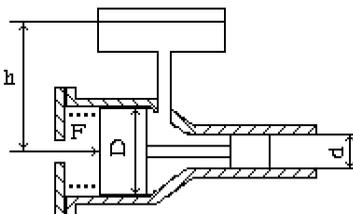


Рис. 4

4. Определить силы, действующие на крышки цилиндра, если к плунжеру (рис. 5) приложена сила 20 кН, диаметр плунжера 120 мм, диаметр цилиндра – 160 мм. *Ответ:* 40 кН, 15 кН.

5. Определить минимальное управляющее давление в гидрозамке (рис. 6), если давление в впускном трубопроводе 0.5 МПа, в выпускном – 0.2 МПа, диаметр поршня 25 мм, диаметр штока – 15 мм, усилие пружины 50 Н. *Ответ:* 0.41 МПа.

6. Определить число двойных ходов рычага гидропресса (рис. 7) и максимальное усилие на рукояти, если нужно увеличить силу, прессующую деталь от 0 до 0.8 МН. Известно, диаметр прессующего поршня 500 мм, диаметр плунжера 10 мм, длина хода плунжера 30 мм, объем жидкости 60 л, модуль сжатия жидкости 1300 МПа, отношение длин рычага  $b/a$  равно 10. *Ответ:* 80 шт, 32 Н.

7. Определить величину предварительного поджатия пружины, чтобы было обеспечено открытие предохранительного клапана (рис. 8), если давление в цилиндре 0.8 МПа, жесткость пружины 6 Н/мм, диаметры поршней 24 мм и 18 мм. *Ответ:* 26.25 мм.

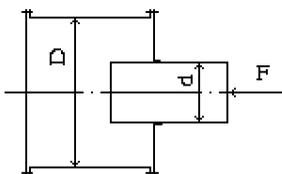


Рис. 5

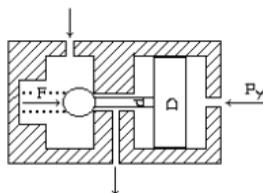


Рис. 6

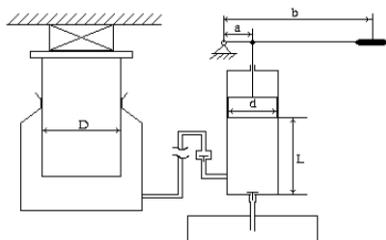


Рис. 7

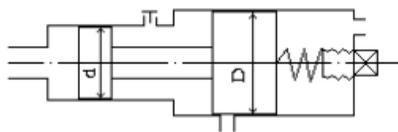


Рис. 8

## ДИНАМИКА ЖИДКОСТИ

### Расход. Уравнение Бернулли.

Рассмотрим движение идеальной жидкости, т.е. такой воображаемой жидкости, которая лишена вязкости.

*Установившимся течением называется течение, неизменное во времени, при котором давление и скорость являются функциями лишь координат, но не зависят от времени.*

*Неустановившееся течение жидкости это такое течение, все характеристики которого (или некоторые из них) изменяются по времени в точках рассматриваемого пространства.*

*Линией тока называется такая линия в движущейся жидкости, касательные к которой в любой ее точке совпадают с направлением векторов скорости частиц, расположенных на этой линии в данный момент времени.*

Если в движущейся жидкости взять элементарный замкнутый контур и через все его точки провести линии тока, то образуется трубчатая поверхность, называемая *трубкой тока*. Часть потока, заключенная внутри трубки тока, называется *струйкой* (рис. 9).

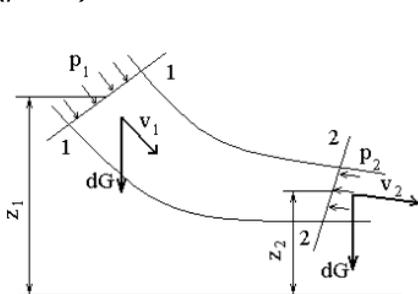


Рис. 9

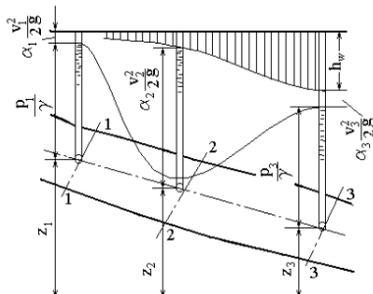


Рис. 10

*Живым сечением, или просто сечением потока, называется в общем случае поверхность в пределах потока, проведенная нормально к линиям тока.*

*Напорным называют течение в закрытых руслах без свободной поверхности жидкости, а безнапорным – течения со свободной поверхностью.*

*Расходом называют количество жидкости, протекающее через живое сечение потока (струйки) в единицу времени:*

$$Q = W/t = v \cdot \omega,$$

где  $W$  - объем;

$t$  - время;

$v$  - средняя скорость потока;

$\omega$  - площадь живого сечения.

Условие неразрывности потока несжимаемой жидкости или, что то же самое, равенство объемных расходов  $Q_1$  и  $Q_2$  в каких-то двух поперечных сечениях  $\omega_1$  и  $\omega_2$  одного и того же потока может быть записано в виде уравнения

$$Q_1 = Q_2 \text{ или } \omega_1 v_1 = \omega_2 v_2.$$

Это уравнение основано на законе сохранения вещества и свойстве "непроницаемости" трубки тока.

Рассмотрим установившееся течение идеальной жидкости, находящейся под действием только силы тяжести (см. рис. 9). Уравнение, которое связывает между собой давление в жидкости и скорость ее движения получено в 1738 году Д. Бернулли для струйки идеальной жидкости:

$$\frac{u_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{u_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2.$$

Слагаемые уравнения имеют линейную размерность и называются соответственно скоростной высотой, пьезометрической высотой и геометрическим напором.

Энергетический смысл уравнения Бернулли состоит в том, что полная удельная энергия постоянна вдоль струйки.

При переходе от элементарной струйки идеальной жидкости к потоку вязкой жидкости, имеющему конечные размеры и ограниченному стенками, необходимо учесть неравномерность распределения скоростей по сечению, а также потери энергии (напора). Допустим, что в пределах рассматриваемых поперечных сечений потока справедлив основной закон гидростатики: гидростатический напор в пределах сечения есть величина постоянная для всех точек сечения.

Мощностью потока в данном сечении назовем полную энергию, которую пронесит поток через это сечение в единицу времени.

Уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости имеет вид:

$$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + h_w$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – безразмерные коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения скоростей в сечениях 1 и 2:

$$\alpha = \frac{\int u^2 dS}{v^2 S} ;$$

$h_w$  – суммарная потеря удельной энергии (напора) на участке между сечениями 1 и 2.

Коэффициент  $\alpha$  представляет собой отношение действительной кинетической энергии потока в данном сечении к кинетической энергии того же потока и в том же сечении, но при равномерном распределении скоростей. Для обычного распределения скоростей коэффициент  $\alpha$  всегда больше единицы, а при равномерном распределении скоростей равен единице. Уравнение Бернулли справедливо и для газов, если скорость их движения гораздо меньше скорости звука. Графически это уравнение может быть представлено диаграммой с учетом потери напора (рис. 11).

Уменьшение среднего значения полной удельной энергии жидкости вдоль потока, отнесенное к единице его длины, называется гидравлическим уклоном. Изменение удельной потенциальной энергии жидкости, отнесенное к единице длины, называется пьезометрическим уклоном. Очевидно, что в трубе постоянного диаметра с неизвестным распределением скоростей указанные уклоны одинаковы.

### Гидравлические потери

Потери удельной энергии (гидравлические потери) зависят от формы, размеров и шероховатости русла, скорости течения и вязкости жидкости, но практически зависит от абсолютного значения давления в ней. Вязкость жидкости не всегда оказывает влияние на величину потерь напора.

В гидравлике принят следующий общий способ выражения гидравлических потерь полного напора в линейных единицах:

$$h = \zeta \frac{v^2}{2g}$$

Коэффициент пропорциональности  $\zeta$  называется коэффициентом сопротивления и равен отношению потерь напора к скоростному напору. Гидравлические потери разделяют на местные потери и потери на трение.

Потерю напора на трение можно выразить формулой Дарси

$$h_{mp} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Безразмерный коэффициент  $\lambda$  называют коэффициентом потерь на трение или коэффициентом сопротивления трения.

### Уравнение Бернулли для относительного движения

Уравнение Бернулли справедливо и в тех случаях установившегося движения жидкости, когда на жидкость действует сила тяжести и силы инерции переносного движения.

$$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + h_w + \Delta H_{ин}$$

где  $\Delta H_{ин}$  – так называемый инерционный напор, который представляет собой работу силы инерции, отнесенную к единице веса и взятую с обратным знаком.

#### 1. Прямолинейное равноускоренное движение русла.

Пусть русло, по которому движется жидкость, движется прямолинейно с постоянным ускорением  $a$ , то в этом случае на все частицы жидкости действует одинаковая и постоянная по времени сила инерции переносного движения, которая может способствовать или препятствовать движению. Следовательно:

$$\square H_{ин} = \frac{a}{g} l_a$$

где  $l_a$  – проекция участка русла на направление ускорения  $a$ .

2. Вращение русла вокруг вертикальной оси. Пусть русло, по которому движется жидкость, вращается вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . Тогда на жидкость будет действовать сила инерции вращательного движения, являющаяся функцией радиуса. Следовательно:

$$\Delta H_{ин} = - \frac{\omega^2}{g} \int_{r_1}^{r_2} r dr = \frac{\omega^2}{2g} (r_1^2 - r_2^2)$$

### Пример

В шлюзовой камере, имеющей ширину 40 м и длину 300 м, уровень воды за время 0.5 часа понижается на 8 м. Определить средний расход в водоспускных трубах.

*Решение*

Объем воды, вытекающей из шлюзовой камеры равен  $W = 40 \cdot 300 \cdot 8 = 96000 \text{ м}^3$ . Расход определяем по формуле  $Q = W/t = 96000/0.5 = 192000 \text{ м}^3/\text{ч} = 53.3 \text{ м}^3/\text{с}$ .

*Ответ:* 53.3 м<sup>3</sup>/сек.

### Задачи

8. По трубопроводу диаметром 156 мм перекачивают мазут удельного веса 0.9 т/м<sup>3</sup>. Определить объемный расход и среднюю скорость, если весовой расход 50 т/час. *Ответ:* 0.0154 м<sup>3</sup>/сек; 0.808 м/сек.

9. Трубопровод диаметром 100 мм имеет местное сужение, в котором его диаметр 25 мм. Определить весовой расход, среднюю скорость в трубопроводе и скорость в узкой его части, если перекачивается мазут удельного веса 0.95 т/м<sup>3</sup> в количестве 10 л/сек. *Ответ:* 9.5 кг/сек; 1.27 м/сек; 20.4 м/сек.

10. В поток жидкости, имеющий в поперечном сечении расход  $Q_1$ , вливается другой поток той же жидкости, характеризуемый расходом (рис. 11). Определить живое сечение бокового притока и сечение потока после слияния, считая скорости во всех сечениях одинаковыми.

*Ответ:*

$$\omega_2 = \omega_1 \cdot \frac{Q_2}{Q_1}; \quad \omega_0 = \omega_1 \cdot \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1}$$

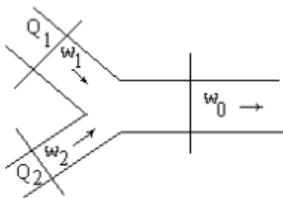


Рис. 11

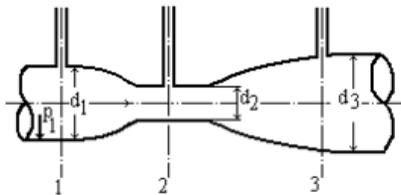


Рис. 12

11. По горизонтальной трубе переменного сечения протекает идеальная жидкость удельного веса  $0.95 \text{ т/м}^3$  в количестве  $10 \text{ л/сек}$  (рис. 12). Определить пьезометрические высоты в сечениях 1, 2, 3, если  $h_1 = 100 \text{ мм}$ ,  $h_2 = 25 \text{ мм}$ ,  $p_1 = 3 \text{ ати}$ . *Ответ:*  $31.6 \text{ м}$ ;  $11.25 \text{ м}$ .

12. Насос двойного действия (рис. 13) для перекачки воды присоединен к трубопроводу диаметром  $150 \text{ мм}$ . Определить секундный объемный расход и среднюю скорость течения воды, если длина хода поршня  $0.5 \text{ м}$ , диаметр цилиндра  $0.2 \text{ м}$ , диаметр штока  $0.05 \text{ м}$ , коэффициент наполнения насоса  $0.9$  и число оборотов вала насоса  $50 \text{ об/мин}$ . *Ответ:*  $0.0228 \text{ м}^3/\text{сек}$ ;  $1.29 \text{ м/сек}$ .

13. Определить теоретический расход жидкости удельного веса  $0.9 \text{ т/м}^3$  в трубопроводе, если показания манометров, установленных на трубе Вентури, в сечениях  $20,5 \text{ см}^2$  и  $81 \text{ см}^2$   $1000 \text{ мм рт.ст.}$  и  $800 \text{ мм рт. ст.}$ . *Ответ:*  $15,7 \text{ л/сек}$ .

14. Вода из фонтана бьет на высоту  $8 \text{ м}$ , вытекая из сопла, имеющего форму усеченного конуса, обращенного вверх малым сечением. Диаметры сечений конуса:  $50 \text{ мм}$  и  $10 \text{ мм}$ , высота  $0.5 \text{ м}$ . Определить расход воды, подаваемой к фонтану, и давление у нижнего основания конуса. Потерей напора в сопле пренебречь. *Ответ:*  $0,98 \text{ л/сек}$ ;  $0,849 \text{ ати}$ .

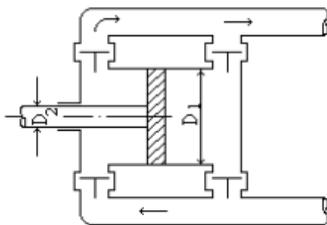


Рис. 13

### Режимы движения жидкости

*Ламинарное течение – это слоистое течение без перемешивания частиц жидкости и без пульсаций скорости. При таком течении все линии тока определяются формой русла, по которому течет жидкость.*

*Турбулентное течение – это течение, сопровождающееся интенсивным перемешиванием жидкости и пульсациями скоростей и давлений. Движение частиц неупорядоченное, траектории имеют вид замысловатых кривых. Наряду с перемещением вдоль русла имеют место поперечные перемещения и вращательное движение отдельных объемов жидкости.*

Указанные течения можно наблюдать на приборе, представленном на рис. 38. Он состоит из резервуара *A* с водой, от которого отходит стеклянная трубка *B* с краном *C* на конце, и сосуда *D* с водным раствором краски, которая может по трубке *F* вводиться тонкой струйкой внутрь стеклянной трубы *B*. Если несколько приоткрыть кран, вода будет протекать с малой скоростью и краска не будет перемешиваться с водой. Струйка краски отчетливо будет видна вдоль всей стеклянной трубы. Это ламинарное течение. При постепенном увеличении скорости течения воды в трубе путем открытия крана картина течения меняется и при определенной скорости течения наступает быстрое изменение его. Становится заметным вихреобразование и вращательное движение жидкости. Течение становится турбулентным. Если затем снова уменьшать скорость течения, то вновь восстановится ламинарное течение. Смена режима течения происходит при определенной критической скорости

$$v_{кр} = k \frac{v}{d}$$

Безразмерный коэффициент, входящий в эту формулу имеет универсальное значение и одинаков для всех жидкостей и газов, а также для любых диаметров труб. Это означает, что смена течения происходит при вполне определенном соотношении между скоростью, диаметром и вязкостью  $\nu$ . Это число называется критическим числом Рейнольдса и обозначается

$$Re_{кр} = \frac{v_{кр} d}{\nu}$$

Как показывают опыты критическое число Рейнольдса для труб круглого сечения приблизительно равно 2300.

Фактическое число Рейнольдса  $Re$  для того или иного потока выражается через его фактическую скорость

$$Re = \frac{vd}{\nu}$$

### Ламинарное течение

Теория ламинарного течения основывается на законе трения Ньютона. При установившемся ламинарном течении коэффициент сопротивления трения равен

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

Потеря напора на трение при ламинарном движении пропорциональна скорости в первой степени.

$$h_{мп} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = \frac{64}{Re} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = \frac{32 \cdot v \cdot l}{g \cdot d^2} \cdot v$$

15. По прямой трубе длиной 1 км, диаметром 100 мм протекает со средней скоростью 0.4 м/с жидкость, имеющая кинематическую вязкость 0.4 см<sup>2</sup>/сек. Определить потерю напора на трение. *Ответ:* 5.2 м.

16. По горизонтальному трубопроводу, имеющему диаметр 203 мм и длину 24 км, перекачивается мазут удельного веса 0.85 т/ м<sup>3</sup>, вязкостью 1.3 стокса. Определить весовой расход, если давление, развиваемое насосами 10.5 ат, а конечное давление 1 ат. *Ответ:* 12.4 кг/сек.

17. Определить суточную пропускную способность самоотечного нефтепровода диаметром 203 мм при движении по нему нефти удельного веса 900 кг/м<sup>3</sup>, вязкостью 1.46 см<sup>2</sup>/с. Длина трубопровода 10 км и начальная точка лежит выше конечной на 50 м. *Ответ:* 1090 т/сутки.

18. Определить расход мазута удельного веса 0.93 т/ м<sup>3</sup>, условной вязкостью (при температуре перекачки)  $E=15^\circ$  в трубопроводе диаметром 100 мм, длиной 1100 м. Отметка насоса 21 м; отметка конца трубы 34 м. Давление на насосе 3 ат, давление в конце трубопровода 1 ат. Проверить также характер течения. *Ответ:* 0.00169 м<sup>3</sup>/с; 198.

19. По трубопроводу диаметром 100 мм перекачивается жидкость вязкостью  $E=25^\circ$ , удельного веса 920 кг/ м<sup>3</sup>. Определить гидравлический уклон, если весовой расход 30 т/час. *Ответ:* 0.0689.

20. Электростанция потребляет в сутки 2200 т мазута. Мазут имеет вязкость  $E=20^\circ$  и удельный вес 0.925 т/ м<sup>3</sup> и перекачивается с нефтесклада по горизонтальному трубопроводу диаметром 203 мм, длиной 10 км. Определить абсолютное давление, развиваемое насосами, если давление в конце трубопровода должно быть равно 1.5 ата. *Ответ:* 11.5 ата.

### Турбулентное течение

При турбулентном течении жидкости в круглой трубе диаметром  $d$  потеря напора на трение на длине  $l$  выражается

формулой

$$h = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g},$$

где  $v$  – средняя скорость;

$\lambda$  - коэффициент Дарси.

Для гладких труб коэффициент Дарси является функцией числа Рейнольдса.

Полуэмпирическая теория турбулентности Прандтля дает следующую связь между коэффициентом  $\lambda$  и числом  $Re$ :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg(Re \sqrt{\lambda}) - 0.8$$

При расчетах удобнее пользоваться эмпирической формулой Блаузиуса

$$\lambda = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}}$$

справедливой при числах Рейнольдса, меньших 100000, и формулой Никурадзе

$$\lambda = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}}$$

для чисел Рейнольдса, больших 100000.

Новейшая формула Конакова

$$\lambda = \frac{1}{(1.8 \lg Re - 1.5)^2}$$

справедлива на всем диапазоне чисел Рейнольдса от 3000 до  $3 \cdot 10^6$  и весьма удобна для пользования.

Для шероховатых труб (например, для водопроводных стальных и чугунных) указанные выше формулы несправедливы, так как величина  $\lambda$  зависит только от числа Рейнольдса, но не зависит от относительной шероховатости трубы.

Одной из наиболее употребительных формул для шероховатых труб является формула Мизеса

$$\lambda = 0.0096 + \sqrt{\frac{k'}{d}} + \sqrt{\frac{3}{Re}}$$

где  $k'$  – величина пропорциональная абсолютной шерохова-

тости, т.е. размеру бугорков на внутренней поверхности трубы;  $d$  – диаметр трубы.

Осредненные значения для различных труб следующие (мм):

тянутые трубы, медные, латунные и алюминиевого сплава	0,0002
шланг резиновый гладкий	0,003
стальные водопроводные трубы (газовые)	0,01
новые чугунные трубы	0,05
старые чугунные трубы	0,15

Для больших значений числа Рейнольдса и большой шероховатости, т.е. для того случая, когда число  $Re$  перестает влиять на коэффициент  $\lambda$  и величина последнего определяется лишь относительной шероховатостью, применима другая формула Никурадзе:

$$\lambda = \frac{1}{(1.74 + 2 \lg \frac{r}{k})^2}$$

Здесь  $k$  – абсолютная шероховатость;  $r$  – радиус трубы. Данную формулу можно применять лишь в том случае, когда

$$\lg(Re \sqrt{\lambda} \frac{k}{r}) > 2.58$$

$$\lg(Re \sqrt{\lambda} \frac{k}{r})$$

Если же  $\lg(Re \sqrt{\lambda} \frac{k}{r}) < 1,3$ , то шероховатые трубы являются гидравлически гладкими и для них справедливы соответствующие формулы.

Для приближенных подсчетов значение коэффициента  $\lambda$  можно принять постоянным и равным:

для обычных водопроводов	0,025 - 0,03
для самолетных водопроводов	0,015 - 0,02
для самолетных бензопроводов	0,030 - 0,035
для гибких шлангов «суперфлекс»	0,120 - 0,140

### Задачи

21. При перекачке керосина удельного веса  $0.820 \text{ т/ м}^3$  по трубопроводу диаметром  $100 \text{ мм}$  в количестве  $535 \text{ т/сутки}$  определяется гидравлический уклон, который оказался равным

0.00821. Найти коэффициент гидравлического сопротивления.

*Ответ:* 0.0175.

22. Определить коэффициент гидравлического сопротивления по данным опытной перекачки керосина по трубопроводу диаметром 305 мм на расстоянии 200 км, если отметка начала трубопровода (у насосной станции)  $z_1 = +290$  м, отметка резервуара, куда принимался керосин в конечном пункте трубопровода  $z_2 = +27$  м. Во время опыта давление на насосе поддерживалось равным 50 ат. При этом расход керосина удельного веса 0.819 т/м<sup>3</sup>, вязкостью 0.025 см<sup>2</sup>/сек за 24 часа составил 6000 т. Результат, полученный из опыта, сопоставить со значениями коэффициента  $\lambda$ , вычисленными по известным эмпирическим формулам. *Ответ:*  $\lambda_{\text{эксп}} = 0.0195$ ;  $\lambda_{\text{эмп}} = 0.0196$  (по Исаеву).

23. Определить потерю напора в трубопроводе диаметром 257 мм, длиной 1000 м при  $K_{\text{экр}} = 0.15$  мм, если весовой расход нефти, перекачиваемой по этому трубопроводу, 200 т/час, удельный вес нефти 0.88 т/м<sup>3</sup> и вязкость 0.276 см<sup>2</sup>/сек. Обосновать выбор расчетной формулы. *Ответ:*  $h_r = 9$  м.

24. Из резервуара по горизонтальной трубе диаметром 50 мм и длиной 20 м вытекает в атмосферу вода. Уровень воды над осью трубы 4 м поддерживается постоянным. Определить расход воды, пренебрегая местными сопротивлениями и принимая (в первом приближении) коэффициент сопротивления  $\lambda = 0.03$ . *Ответ:* 5.02 л/сек.

25. Определить характер движения нефти по нефтепроводу диаметром 305 мм, если ее расход 60 л/сек, а вязкость  $E = 15^\circ$ . *Ответ:* 2290 (переходная зона).

26. Нефть удельного веса 850 дин/см<sup>3</sup> и вязкостью 0.03 кг/сек/м<sup>2</sup> перекачивается по трубопроводу диаметром 203 мм. Определить весовой расход, при котором движение переходит из ламинарного в турбулентное. *Ответ:* 107 кг/сек.

27. По трубопроводу диаметром 203 мм перекачивается 100 л/сек мазута, кинематическая вязкость которого постепенно увеличивается вследствие остывания. Определить, при каком значении вязкости в трубе будет иметь место критический режим движения. *Ответ:* 2.7 см<sup>2</sup>/сек.

28. Определить критическую среднюю скорость, при которой движение воды по трубопроводу диаметром 100 мм переходит из ламинарного в турбулентное, если температура воды 20°C. *Ответ:* 2.32 см/сек.

29. Радиатор водяного охлаждения двигателя внутреннего сгорания состоит из пучка труб прямоугольного сечения 2x10 м

м<sup>2</sup>, по которым протекает вода при температуре 90°C ( кинематическая вязкость 0.326 10<sup>-6</sup> м<sup>2</sup>/сек). Определить минимальную допустимую среднюю скорость воды в трубах при условии, что режим движения должен быть турбулентным. *Ответ:* 22.7 см/сек.

### Истечение капельных жидкостей

При истечении жидкости через малое отверстие в тонкой стенке расход определяется по формуле

$$Q = \varepsilon S \varphi \sqrt{2gH}$$

где  $\varphi$  - коэффициент скорости истечения;

$\varepsilon$  - степень сжатия струи;

$H$  - полный напор;

$S$  - площадь отверстия.

Произведение коэффициентов скорости и сжатия струи называют коэффициентом расхода:

$$\mu = \varepsilon \cdot \varphi.$$

#### Задачи

30. Определить расход жидкости через конически расходящийся насадок, имеющий диаметр выходного отверстия 10 см. Истечение происходит в затопленное пространство при постоянном напоре 3 м и постоянной разности уровней 0.5 м ( $\mu=0.45$ ). *Ответ:* 11 л/сек.

31. Определить расход жидкости через конически расходящийся насадок с размерами, указанными в предыдущей задаче, если истечение происходит в незатопленное пространство при постоянном напоре 3 м ( $\mu=0.45$ ). *Ответ:* 27.1 л/сек.

32. Определить расход керосина при истечении через короткий насадок диаметром 2 см, имеющий форму сжатой струи при давлении в резервуаре 1 ати и постоянном напоре 1.5 м. Удельный вес керосина 0.85 кГ/л. Для тех же условий определить расход воды. *Ответ:* 4.180 кГ/сек; 4.568 кГ/сек.

### Гидравлический удар

Повышение давления в трубе при гидравлическом ударе

$$\Delta p = \rho \cdot c \cdot v_0,$$

где  $c$  - скорость ударной волны;

$\rho$  - плотность жидкости;

$v_0$  - начальная скорость жидкости.

Скорость ударной волны определяется формулой

$$c = \frac{\sqrt{\frac{E_{ж}}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{dE_{ж}}{\delta E_{м}}}},$$

где  $E_{ж}$  и  $E_{м}$  – модули упругости жидкости и материала, из которого сделан трубопровод;

$d$  – диаметр трубы;

$\delta$  – толщина трубы.

### Задачи

33. По стальному трубопроводу диаметром 305 мм со средней скоростью 1 м/с перекачивают воду. Определить величину ударного давления в трубопроводе при мгновенном закрытии задвижки, если  $\delta = 10$  мм. *Ответ:* 12,7 атм.

34. Определить ударное давление в стальном нефтепроводе диаметром 257 мм с толщиной стенки 7 мм, по которому перекачивается 50 л/с нефти удельного веса 920 кг/м<sup>3</sup>. *Ответ:* 9.7 ати.

35. Определить полный объем воды, который следует закачать в трубопровод диаметром 156 мм, длиной 2 км, если опресовка трубопровода проводится при избыточном давлении 40 ати. Толщина трубы 6 мм. 38.31 м<sup>3</sup>.

36. Давление в трубопроводе, развиваемое насосом на нефтепроводных станциях, равно 50 ат. Диаметр трубопровода 357 мм, толщина трубы 8 мм. Определить насколько процентов увеличится скорость течения нефти от начала трубы к ее концу, если учесть сжимаемость нефти и деформацию трубы? *Ответ:* 0,486 %.

## ЭЛЕМЕНТЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ СМАЗКИ

Режим движения смазки между контактными поверхностями ламинарный. Сила трения в подшипнике может быть определена по формуле

$$T = \mu L \pi d \frac{u_0}{\delta} = \mu \frac{nL \pi^2 d^2}{60\delta},$$

где  $u_0$  – скорость движения подшипника вокруг вала;  $L$  – длина подшипника;  $n$  – число оборотов вала;  $\delta$  – толщина слоя смазки;  $\mu$  – вязкость смазки.

Момент силы трения равен

$$M = Td / 2 = \mu \frac{nL \pi^2 d^3}{120\delta}.$$

Мощность силы трения равна произведению момента на угловую скорость:

$$N = M\omega = \mu \frac{Ln^2 \pi^3 d^3}{3600\delta}.$$

Сила трения в подпятнике зависит от радиуса подпятника и определяется следующим образом

$$T = 2\pi\mu \frac{\omega}{\delta} \left( \frac{R^3}{3} - \frac{r^3}{3} \right),$$

где  $r$  и  $R$  – радиус вала и радиус кольца соответственно.

Момент силы трения в подпятнике :

$$M = 2\pi\mu \frac{\omega}{\delta} \left( \frac{R^4}{4} - \frac{r^4}{4} \right).$$

Мощность силы трения в подпятнике:

$$N = 2\pi\mu \frac{\omega^2}{\delta} \left( \frac{R^4}{4} - \frac{r^4}{4} \right).$$

### Задачи

37. Между упорным кольцом подшипника верти-

кального вала и опорой находится пленка масла толщиной 0.1 мм (рис. 14). Требуется определить мощность, потребную для преодоления трения жидкости, если вал вращается с угловой скоростью  $20 \cdot \pi$  Гц, диаметр кольца 100 мм, диаметр вала 50 мм, вязкость масла  $0.15 \cdot 10^{-6}$  кГ сек/см<sup>2</sup>. *Ответ:* 0.546 кГ м /сек = 5.25 Вт.

38. Вертикальный вал диаметром 100 мм вращается в сквозном цилиндрическом подшипнике длиной 200 мм, диаметр которого больше диаметра вала на величину 0.2 мм (рис.15). Кольцевая щель между валом и подшипником заполнена маслом, имеющим динамическую вязкость  $0.1 \cdot 10^{-6}$  кГс/см<sup>2</sup>. Определить мощность, потребную для преодоления сил трения при вращении вала с числом оборотов 500 об/мин. *Ответ:* 8.47 Вт.

39. Между упорным кольцом подпятника (рис. 14) вертикального вала и опорой находится слой смазки толщиной 0.2 мм. Определить мощность силы трения, если вал вращается с угловой скоростью  $20\pi$  Гц, диаметр кольца 100 мм, диаметр вала 50 мм, вязкость смазки  $0.15 \cdot 10^{-6}$  кГс/см<sup>2</sup>.

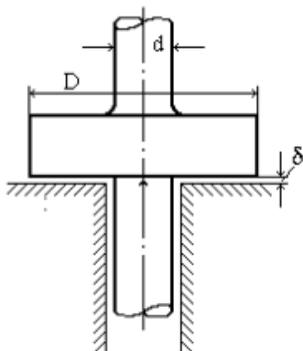


Рис. 14

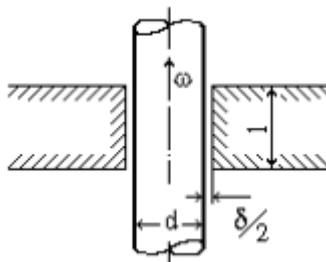


Рис. 15

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1  
Плотность и кинематическая вязкость некоторых жидкостей  
при давлении 0.1 МПа

Жидкость	Температура, °С	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Вязкость, 10 <sup>-4</sup> м <sup>2</sup> /с
Бензин:			
авиационный	20	710-780	0,004-0,005
автомобильный	20	690-760	0,0055-0,0075
Бензол	20	870-880	0,0007
Вода дистиллированная	4	1000	0,0157
Глицерин	20	1260	8,7
Дизельное топливо	20	830-860	0,02-0,06
Керосин	20	790-860	0,025
Мазут	80	880-940	0,43-1,2
Масло авиационное			
МС-14	100	860	0,14
МС-20	100	870	0,205
МК-22	100	880	0,22
МС-20С	100	870	0,20
Масло автомобильное			
АС-6	100	860	0,06
АС-8	100	870	0,08
АС-10	100	870	0,10
ДС-8	100	860	0,08
ДС-1	100	880	0,11
Масло моторное			
МТ-14п	100	870	0,135-0,145
МТ-16п	100	870	0,160-0,175
М-20Г	100	870	0,20
Масло промышленное			
И-30А	50	890	0,24-0,27
И-40А	50	895	0,28-0,33
И-70А	50	910	0,35-0,45
И-100А	50	920	0,65-0,75
Масло АМГ-10	50	850	0,90-1,18
Масла:			

Жидкость	Температура, °С	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Вязкость, 10 <sup>-4</sup> м <sup>2</sup> /с
веретенное АУ	100	890-900	0,036
турбинное ТП-22	50	900	0,20-0,24
турбинное ТП-30	50	900	0,28-0,32
турбинное ТП-46	50	900	0,44-0,48
трансформаторное	50	880-890	0,09
Нефть	18	760-900	0,25-1,4
Ртуть	15	13560	0,0011
Скипидар	16	870	0,0183
Спирт этиловый	20	790	0,0151
Чугун	1300	7000	0,011

Таблица 2  
Средние значения изотермического модуля упругости некоторых жидкостей

Жидкость	Модуль упругости, МПа
Бензин авиационный	1350
Нефть	1323
Вода	2060
Глицерин	4464
Керосин	1275
Масла:	
АМГ-10	1305
Индустриальное -20	1362
Индустриальное -50	1473
Турбинное	1717
Силиконовая жидкость	1030
Спирт этиловый	1275
Ртуть	32373

Таблица 3  
Соотношение между единицами СИ, СГС и МКГСС

Наименование величины	Единица измерения		
	СИ	СГС	МКГСС
Длина, <i>l</i>	1 м	10 <sup>2</sup> см	1 м
Масса, <i>m</i>	1 кг	10 <sup>3</sup> г	0.102 кг·с <sup>2</sup> /м

Наименование величины	Единица измерения		
	СИ	СГС	МКГСС
Время, $t$	1 с	1 с	1 с
Скорость, $v$	1 м/с	$10^2$ см/с	1 м/с
Ускорение св. падения, $g$	$9.81$ м/с <sup>2</sup>	$981$ см/с <sup>2</sup>	$9.81$ м/с <sup>2</sup>
Вес, $G$	1 Н	$10^5$ г·см/с <sup>2</sup> = = $10^5$ дин	0.102 кГ
Плотность, $\rho$	1 кг/м <sup>3</sup>	$10^{-3}$ г/см <sup>3</sup>	$0.102$ кГ·с <sup>2</sup> /м <sup>4</sup>
Удельный вес, $\gamma$	1 Н/м <sup>3</sup>	$10^{-1}$ дин/см <sup>3</sup>	$0.102$ кГ/м <sup>3</sup>
Давление, $p$	1 Па=1 Н/м <sup>2</sup>	$10$ дин/см <sup>2</sup> = = $10$ бар	$0.102$ кГ/м <sup>2</sup> = = $1.02 \cdot 10^{-5}$ кГ/см <sup>2</sup> = = $1.02 \cdot 10^{-5}$ ат
Вязкость кинематическая, $\nu$	1 м <sup>2</sup> /с	$10^4$ см <sup>2</sup> /с = = $10^4$ ст	1 м <sup>2</sup> /с
Вязкость динамическая, $\mu$	1 Н·с/м <sup>2</sup> = = $1$ кг/(м·с)	$10$ дин·с/см <sup>2</sup> = $10$ г/(см·с) = = $10$ пз	$0.102$ кГ·с/м <sup>2</sup>
Момент силы, $M$	1 Н·м	$10^7$ дин·см	$0.102$ кГ·м
Работа силы, $A$	1 Дж	$10^7$ эрг	$0.102$ кГ·м
Мощность, $N$	1 Вт	$10^7$ эрг/с	$0.102$ кГ·м/с

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башта Т.М. Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы. - М.: Машиностроение, 1970.- 505 с.
2. Брюховецкий О.С. Основы гидравлики.- М.: Недра, 1991. – 156 с.
3. Некрасов Б.Б. Сборник задач по гидравлике. – М.: Оборонгиз, 1947. – 112 с.
4. Некрасов Б.Б. Задачник по гидравлике, гидромашинам и гидроприводу. – М.: Высшая школа, 1989. – 192 с.
5. Яблонский В.С., Исаев И.А. Сборник задач и упражнений по технической гидромеханике. – М.:Физматгиз, 1963. – 200 с.
6. Соколов А.В. Задачи по гидравлике. – М.: Гостоптехиздат, 1956. – 88 с.
7. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам. – М.:Госэнергоиздат, 1961. – 352 с.
8. Резников В.И., Роговенко Т.Н. Прикладная механика жидкостей и газов. – Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2000. – 72 с.
9. Веремеенко А.А., Веремеенко Е.Г. Гидравлика и гидропневмопривод: учебное пособие. – Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2014 – 152.