МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт горного дела и строительства
Кафедра «Санитарно-технические системы»

Утверждено на заседании кафедры
«Санитарно-технические системы»
«20» января 2023 г., протокол № 5

Заведующий кафедрой

_____ Р.А. Ковалев

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по проведению практических (семинарских) занятий по дисциплине (модулю) «Гидравлика трубопроводов»

основной профессиональной образовательной программы высшего образования – программы бакалавриата

по направлению подготовки
08.03.01 – "Строительство"

с профилем
"Водоснабжение и водоотведение"

Форма(ы) обучения: очная, очно-заочная

Идентификационный номер образовательной программы: 080301-02-23

Тула 2023 год

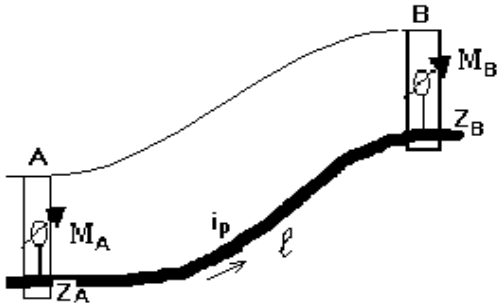
Разработчик(и) методических указаний

Белоусов Р.О., доцент, к.т.н., доцент _____

(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание) *(подпись)*

.

Уравнение Бернулли для гидравлически длинных трубопроводов



По напорному трубопроводу постоянного диаметра в направлении от колодца А к колодцу В движется вода (ρ=1000 кг/м^3), причём пьезометрический уклон потока равен i_p. Колодцы расположены на расстоянии l друг от друга, в них установлены манометры M_A и M_B, измеряющие давление потока воды в трубе на отметках z_A и z_B соответственно.

Известно, что z_A=115 м, p_A=416 МПа, ℓ=1,5 км, i_p=0,002. Определить показание манометра $p_в$, если $z_в$=120м.

Р е ш е н и е

Пьезометрический напор потока в сечении А

$$H_{па}=z_A+\frac{p_A}{\rho g}=115+\frac{416\times10^3}{10^3\times9.81}=157.4\text{ м}$$

Пьезометрический напор потока в сечении *B*

$$H_{п.в.}=H_{п.а}-i_p l=157.4-0.002\times1500=154.4\text{ м}$$

Показание манометра в сечении *B*

$$p_в=(H_{п.в}-z_B)\rho g=(154.4-120)\times10^3\times9.81=337.5\text{ кПа}.$$

В а р и а н т ы з а д а ч и

1. Известно, что z_A=80 м, p_A=0,42 МПа, l=2 км, i_p=0,0018. Определить, на какой отметке z_B показание манометра $p_в$=386 кПа.

2. Известно, что z_B=95 м, $p_в$=0,320 МПа, l=1,6 км, i_p=0,0019. Определить показание манометра p_A, если z_A=93 м.

Гидравлические сопротивления

Задача 1

Для водопроводной трубы внутренним диаметром d и шероховатостью $\Delta_э$ построить по пяти точкам график зависимости коэффициента гидравлического трения λ от числа Рейнольдса Re.

Известно, что d = 100 мм, $\Delta_э$ = 0,2мм, интервал возможного изменения расхода воды (ν = 0,011 Ст) от Q_{min} = 0,5 л/с до Q_{max} = 40 л/с.

Р е ш е н и е

Характерные числа Рейнольдса:

-"гладкое" $Re_{ГЛ}=10\dfrac{d}{\Delta_э}=10\times\dfrac{100}{0,2}=5000;$

-"квадратичное" $Re_{кв}=500\dfrac{d}{\Delta_э}=500\times\dfrac{100}{0,2}=250000.$

Число Рейнольдса потока (для Q в л/с)

$$Re=\frac{Vd}{\nu}=\frac{4}{\pi d\nu}\times Q=\frac{4\times10^3}{3,14\times10\times0,011}\times Q=11580\,Q.$$

Примем пять значений расхода Q = 0,5; 10; 20; 30; 40 л/с и вычислим для каждого из них коэффициент гидравлического трения λ:

1) Q = 0,5 л/с; Re = 11580 · 0,5 = 4632.

Сравним число Рейнольдса Re с характерными значениями: $Re=4632<Re_{гл}=5000$.
Следовательно, зона сопротивления – "гидравлически гладкие трубы" и $\lambda = f(Re)$.
Для определения коэффициента λ воспользуемся формулой Блазиуса

$$\lambda=\frac{0,316}{Re^{0,25}}=\frac{0,316}{4632^{0,25}}=0,038.$$

2) Q = 10 л/с; Re = 11580 · 10 = 115800;

$Re_{гл}=5000<Re=115800<Re_{кв}=250000.$

Следовательно, зона сопротивления – “переходная” и $\lambda=f\left(Re,\Delta/d\right)$. Для определения коэффициента λ воспользуемся формулой Альтшуля

$$\lambda=0,11\times\left(\frac{\Delta}{d}+\frac{68}{Re}\right)^{0,25}=0,11\times\left(\frac{0,2}{100}+\frac{68}{115800}\right)^{0,25}=0,0248$$

3) Q = 20 л/с; Re = 11580 · 20 = 231600;

$Re_{гл} = 5000 < Re = 231600 < Re_{кв}$; (см. предыдущий случай)

$$\lambda=0,11\times\left(\frac{0,2}{100}+\frac{68}{231600}\right)^{0,25}=0,0241.$$

4) Q = 30 л/с; Re = 11580 · 30 = 347400 > $Re_{кв}$= 250000.

Следовательно, зона сопротивления – “гидравлически шероховатые трубы” и $\lambda=f\left(\Delta_э/d\right)$.

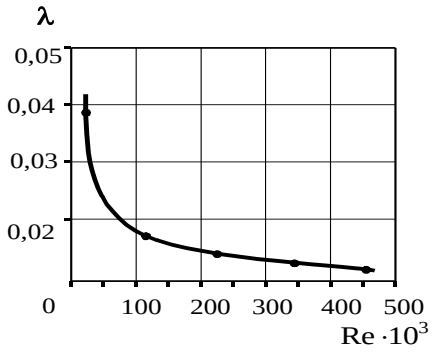
Для определения коэффициента λ воспользуемся формулой Шифринсона:

$$\lambda=0,11\times\left(\frac{\Delta}{d}\right)^{0,25}=0,11\times\left(\frac{0,2}{100}\right)^{0,25}=0,0232$$

5) Q = 40 л/с; Re = 11580 · 40 = 63200; $Re_{гл}$ = 463200 < $Re_{кв}$ = 250000 (см. предыдущий случай);

$$\lambda=0,11\times\left(\frac{0,2}{100}\right)^{0,25}=0,0232$$

Строим график по пяти точкам.



В а р и а н т ы з а д а ч и 1

Построить по пяти точкам график зависимости коэффициента гидравлического трения λ от числа Рейнольдса *Re* при следующих исходных данных.

1. d = 150 мм, $\Delta_э$ = 0,2 мм, ν = 0,013 Ст, Q_{min} = 0,3 л/с, Q_{max} = 50 л/с.
2. d = 200 мм, $\Delta_э$ = 0,3 мм, ν = 0,014 Ст, Q_{min} = 0,2 л/с, Q_{max} = 60 л/с.

Задача 2

Определить коэффициент гидравлического трения λ для следующих напорных труб:

а) неновой стальной водогазопроводной трубы диаметром $d_y = 100$ мм при скорости $V = 0{,}8$ м/с;

б) новой чугунной напорной трубы (класс ЛА) диаметром $d_y = 150$ мм при скорости $V = 0{,}6$ м/с;

в) асбестоцементной трубы (класс ВТ-9, тип I) диаметром $d_y = 200$ мм при скорости $V = 0{,}7$ м/с;

Р е ш е н и е

Для стальной водогазопроводной трубы диаметром $d_y = 100$ мм коэффициент гидравлического трения $\lambda_{кв} = 0{,}041$ и $\lambda_{кв} / \lambda_1 = 1{,}46$.

Поправочный коэффициент для неновой стальной трубы при $V = 0{,}8$ м/с $< 1{,}2$ м/с, $k = 1{,}06$.

Окончательно $\lambda = \lambda_{кв}\, k = 0{,}041 \cdot 1{,}06 = 0{,}043$.

Для чугунной напорной трубы диаметром $d_y = 150$ мм коэффициент гидравлического трения $\lambda_{кв} = 0{,}036$ и $\lambda_{кв} / \lambda_1 = 1{,}09$.

Поправочный коэффициент для новой чугунной трубы при $V = 0{,}6$ м/с $k_1 = 1{,}115$.

Окончательно $\lambda = \lambda_1 k_1 = \dfrac{0{,}036}{1{,}09} \times 1{,}115 = 0{,}037$.

Для асбестоцементной трубы (класс ВТ-9, тип I) диаметром $d_y = 200$ мм коэффициент гидравлического трения $\lambda_1 = 0{,}02$.

Поправочный коэффициент для асбестоцементной трубы при $V = 0{,}7$ м/с $k_1 = 1{,}056$.

Окончательно $\lambda = \lambda_1\, k_1 = 0{,}02 \cdot 1{,}056 = 0{,}021$.

В а р и а н т ы з а д а ч и 6.2

Определить коэффициент гидравлического трения λ для следующих напорных труб:

1. Труба стальная электросварная новая, $d_y = 175$ мм, $V = 1{,}3$ м/с.
2. Труба чугунная напорная новая класса ЛА, $d_y = 250$ мм, $V = 1{,}9$ м/с.
3. Труба стальная водогазопроводная неновая, $d_y = 150$мм, $V = 0{,}8$ м/с.
4. Труба чугунная напорная неновая класса ЛА, $d_y = 300$ мм, $V = 1{,}0$ м/с.
5. Труба асбестоцементная класса ВТ-9 тип I, $d_y = 200$ мм, $V = 1{,}6$ м/с.

Задача 3

Газ абсолютной вязкостью η перекачивают по трубопроводу внутренним диаметром d под абсолютным давлением p и при температуре t, при этом режим течения потока может быть или турбулентным, или ламинарным.

Известно, что газ – кислород ($R=260\frac{Дж}{кг\times К}$), t = 20 °C, d = 5 см, $\eta = 202 \cdot 10^{-7}$ Па · с, p = 305 кПа. Определить критическую скорость $V_{кр}$ смены режимов течения.

Р е ш е н и е

Смена режимов течения происходит при числе Рейнольдса $Re_{кр} = 2320$, т.е.

$$2320=\frac{V_{кр}\times d}{\nu},\text{откуда}\quad V_{кр}=\frac{2320\times\nu}{d}$$

Плотность газа определим из уравнения состояния

$$\rho=\frac{p}{RT}=\frac{305\times10^{3}}{260\times(273+20)}=4{,}0\ \text{кг/м}^3.$$

Кинематический коэффициент вязкости

$$\nu=\frac{\eta}{\rho}=\frac{202\times10^{-7}}{4}=5{,}05\times10^{-6}\ \text{м}^2/\text{с}$$

Искомая скорость:

$$V_{кр}=\frac{2320\times5{,}05\times10^{-6}}{0{,}05}=0{,}23\ \text{м/с}.$$

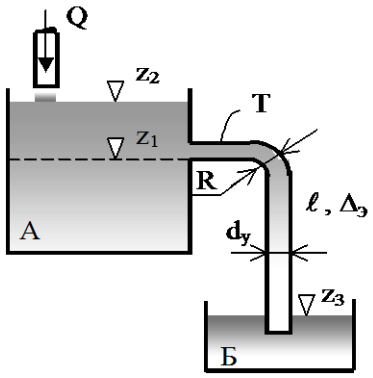
В а р и а н т ы з а д а ч и 6.3

1. Известно, что газ – метан ($R=492\frac{Дж}{кг\times К}$), t = 40 °C, d = 40 мм, p = 500 кПа, $\eta = 115 \cdot 10^{-7}$ Па · с. Определить режим течения при скорости V = 30 см/с.

2. Известно, что газ – пропан ($R=175\frac{Дж}{кг\times К}$), t = 0 °C, p=600 кПа, $\eta = 75 \cdot 10^{-7}$ Па · с, V = 25 см/с. Определить максимальный диаметр трубы d, при котором возможен ламинарный режим течения пропана.

Простая (тупиковая) сеть

Задача 1



В резервуар *A* поступает вода (ν = 0,01 Ст), расход которой изменяется от *0* до *Q*. Уровень воды в резервуаре не должен быть ниже отметки z_1 и выше отметки z_2. Для выполнения этих условий резервуар *A* оборудован стальной электросварной умеренно корродированной переливной трубой *T* диаметром d_y, длиной *l*, имеющей один поворот на 90° радиусом *R*. Переливная труба перепускает излишки воды в резервуар *Б*, уровень в котором находится на отметке z_3.

Известно, что Q = 20 л/с, z_1 = 10 м, z_2 = 11 м, z_3 = 2 м, R=d, l = 12 м. Определить требуемый диаметр d_y переливной трубы.

Р е ш е н и е

Из справочника [3] принимаем для стальной умеренно корродированной трубы:
- эквивалентную шероховатость (с. 41): $\Delta_э = 0{,}2$ мм;
- коэффициенты местных сопротивлений (§ 3.4):

ς_1 - вход в трубу при заделке ее торца заподлицо со стенкой (п.4): $\varsigma_1 = 0{,}5$;

ς_2 – поворот трубы (п. 10):

$$\varsigma_{пов} = \left[0{,}2 + 0{,}001 \times (100\lambda)^8\right] \sqrt{\frac{d}{R_п}} \times f(\alpha),$$

где $f(\alpha = 90°) = 1$, тогда $\varsigma_2 = 0{,}2 + 0{,}001 \cdot (100\,\lambda)^8$;

ς_3 – выход из трубы (п. 2): $\varsigma_3 = \alpha = 1{,}1$.

Из формулы расхода самотечной трубы ([2], с. 12; [4], с. 206) находим

$$\mu\omega = \frac{Q}{\sqrt{2gH}} \text{ или } \frac{d^2}{\sqrt{\sum\varsigma + \lambda\frac{l}{d}}} = \frac{Q}{\sqrt{2g(z_2 - z_3)}} \times \frac{4}{\pi}$$

Обозначим левую часть уравнения через *C*. Тогда

$$C = \frac{d^2}{\sqrt{1{,}8 + 0{,}001 \times (100\lambda)^8 + 12\frac{\lambda}{d}}} = \frac{0{,}02}{\sqrt{2 \times 9{,}81 \times (11-2)}} \times \frac{4}{3{,}14} = 0{,}0191$$

Дальнейшее определение внутреннего диаметра переливной трубы возможно только приближенными методами, например методом подбора стандартного значения диаметра стальной электросварной трубы

1. Принимаем $d_y^{(1)} = 100$ мм. Для нее $d = 114$ мм.

Тогда скорость потока

$$V=\frac{4Q}{\pi d^2}=\frac{4\times 0{,}02}{3{,}14\times 0{,}114}=2{,}55 \text{ м/с}.$$

Число Рейнольдса потока

$$Re=\frac{Vd}{\nu}=\frac{255\times 11{,}4}{0{,}01}=290700.$$

Характерные числа Рейнольдса:

- “квадратичное” $Re_{кв}=500\frac{d}{\Delta_э}=500\times\frac{114}{0{,}2}=285000;$

В сравнении $Re = 290700 > Re_{кв} = 285000$.

Следовательно, зона сопротивления – квадратичная и $\lambda=f(\Delta/d)$. Коэффициент гидравлического трения найдем по формуле Шифринсона:

$$\lambda=0{,}11\left(\Delta/d\right)^{0{,}25}=0{,}11\times\left(0{,}2/114\right)^{0{,}25}=0{,}023.$$

Принятое значение $d = 114$ мм и полученное значение $\lambda = 0{,}023$ подставляем в формулу для C:

$$C^{(1)}=\frac{0{,}114^2}{\sqrt{1{,}8+0{,}001\times\left(100\times 0{,}023\right)^8+12\times\frac{0{,}023}{0{,}114}}}=0{,}00432$$

Так как $C^{(1)} = 0{,}00432 > C = 0{,}00191$, то в первом приближении диаметр переливной трубы принят завышенным.

2. Принимаем $d_y^{(2)} = 50$ мм. Для нее $d = 64$ мм.

Тогда

$$V=\frac{4\times 0{,}02}{3{,}14\times 0{,}064^2}=10{,}19 \text{ м/с};\quad Re=\frac{1019\times 6{,}4}{0{,}01}=509500;$$

$$Re_{кв}=500\times\frac{64}{0,2}=160000;\ Re > Re_{кв};\ \lambda=0,11\times\left(\frac{0,2}{64}\right)^{0,25}=0,028$$

$$C^{(2)}=\frac{0,064^2}{\sqrt{1,8+0,001\times(100\times0,028)^8+12\times\frac{0,028}{0,064}}}=0,00071.$$

Так как $C^{(2)} = 0,00071 < C = 0,00191$, то второе приближение значения диаметра трубы $d_y^{(2)} = 50$ мм является недостаточным.

3. Принимаем $d_y^{(3)} = 75$ мм. Для нее $d = 83$ мм.

Тогда

$$V=\frac{4\times0,02}{3,14\times0,083^2}=4,53\ м/с;\quad Re=\frac{1019\times8,3}{0,01}=339750;$$

$$Re_{кв}=500\times\frac{83}{0,2}=187500;\ Re > Re_{кв};\ \lambda=0,11\times\left(\frac{0,2}{83}\right)^{0,25}=0,025;$$

$$C^{(3)}=\frac{0,083^2}{\sqrt{1,8+0,001\times(100\times0,028)^8+12\times\frac{0,028}{0,083}}}=0,0021>0,00191.$$

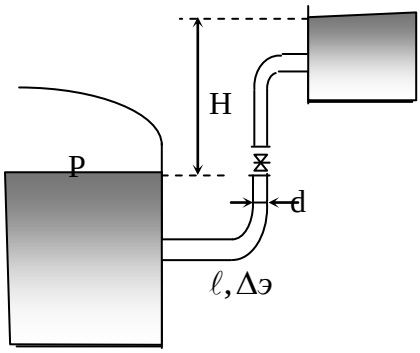
Диаметр переливной трубы $d_y = 75$ мм несколько больше, чем требуется по условию задачи, но следующий меньший стандартный диаметр трубы $d_y = 50$ мм является недостаточным (см. выше). Поэтому окончательно принимаем $d_y = 75$ мм. Нижнюю точку входного сечения переливной трубы следует разместить на отметке $z_1 = 10$ м, чтобы труба включалась в работу только тогда, когда уровень воды в резервуаре *A* превысит отметку z_1.

В а р и а н т ы з а д а ч и 1

1. Известно, что $z_1 = 6$ м, $z_2 = 6,5$ м, $z_3 = 1$ м, $l = 5,4$м, $R = 2d$. Определить допустимый максимальный расход Q, если переливная труба имеет $d = 209$ мм, $\Delta_э = 0,2$ мм.

2. Известно, что $z_1 = 7$ м, $z_3 = 1,5$ м, $l = 6$ м, $d = 155$ мм, $\Delta_э = 0,3$ мм, $R = d$. Определить отметку максимального уровня воды z_2 при расходе $Q = 20$ л/с.

Задача 2



Пневмоустановка служит для подачи воды (ρ=1000 кг/м^3, ν=0,02 Ст) в открытый резервуар на высоту *H* под действием манометрического давления *Po* по трубе внутренним диаметром *d*, длиной *l*, шероховатостью $\Delta_э$. Труба имеет два поворота - отвода под углом 90° и оборудована прямоточным вентилем.

Известно, что d=80 мм, $\Delta_э$=0,2 мм, *l* =20 м, H=12 м. Определить величину необходимого давления P_o, чтобы расход составлял Q=5 л/с.

Р е ш е н и е

Скорость потока:

$$V=\frac{4Q}{\pi d^2}=\frac{4\times 0{,}005}{3{,}14\times 0{,}08^2}=1{,}0\text{м/с}.$$

Число Рейнольдса потока:

$$Re=\frac{Vd}{\nu}=\frac{100\times 8}{0{,}01}=80000.$$

Характерные числа Рейнольдса:

- "квадратичное": $Re_{кв}=500\frac{d}{\Delta}=500\times\frac{80}{0{,}2}=200000;$

- "гладкое": $Re_{гл}=10\frac{d}{\Delta}=10\times\frac{80}{0{,}2}=40000.$

Так как $Re_{гл}$=40000<Re=80000<$Re_{кв}$=200000, то зона сопротивления - переходная и $\lambda=f(Re,\Delta/d)$.

Воспользуемся формулой Альтшуля

$$\lambda=0{,}11\left(\frac{\Delta}{d}+\frac{68}{Re}\right)^{0{,}25}=0{,}11\times\left(\frac{0{,}2}{80}+\frac{68}{80000}\right)^{0{,}25}=0{,}0264.$$

Коэффициенты местных сопротивлений находим по справочнику:

ζ_1 - вход в трубу при заделке обреза трубы заподлицо со стенкой ζ_1 =0,5;

$\zeta_2=\zeta_4$ - отвод под углом 90°, $\zeta_2=\zeta_4$ =1,19;

ζ_3 - прямоточный вентиль при полном открытии, ζ_3 =0,58;

ζ_5 -выход из трубы, $\zeta_5=\alpha$=1,1.

Коэффициент расхода трубы пневмоустановки

$$\mu=\frac{1}{\sqrt{\Sigma\zeta+\lambda\frac{l}{d}}}=\frac{1}{\sqrt{0,5+2\times1,19+0,58+1,1+0,0264\times\frac{20}{0,08}}}=0,293.$$

Величину искомого давления получим

$$V=\mu\sqrt{2g\left(\frac{p_0}{\rho g}-H\right)},$$

т.е.

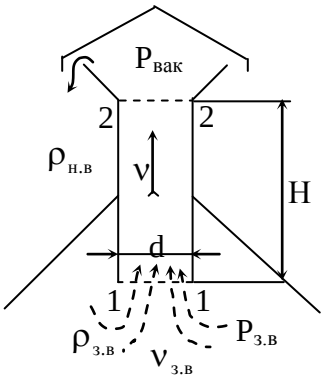
$$p_o=\left(\frac{V^2}{\mu^2 2g}+H\right)\rho g=\left(\frac{1}{0.293^2\times2\times9.81}+12\right)1000\times9.81=0.124\,\text{мПа}$$

В а р и а н т ы з а д а ч и 2

1. Известно, что d=40мм, $\Delta_э$=0,2 мм, l=20м, Q=2л/с. Определить, на какую высоту H возможен подъем воды при давлении p_o=0,15 МПа.

2. Известно, что d=80 м, $\Delta_э$=0,3мм, l=18 м, H=16 м. Определить расход воды Q при давлении p_o=0,2 МПа.

Задача 3



Удаление загрязненного воздуха плотностью $\rho_{з.в.}$ с коэффициентом вязкости ν осуществляется по трубе высотой H, внутренним диаметром d и шероховатостью $\Delta_э$.

Массовый расход удаляемого загрязненного воздуха M, манометрическое давление в зоне загрязненного воздуха $\rho_{з.в.}$, плотность наружного воздуха $\rho_{н.в.}$ Для повышения интенсивности отсоса воздуха верхний обрез трубы оборудован дефлектором, имеющим коэффициент сопротивления $\zeta_{деф}$=1,3 и создающим под действием ветра разряжение на выходе из трубы $p_{вак}$. Сжимаемостью воздуха пренебречь.

Известно, что d=400 мм, H=5м, $\Delta_э$=0,1мм, $\zeta_{в.х.}$=0,5, $\zeta_{деф.}$=1,3, $\nu = 0{,}15\cdot10^{-4}$ м^2/с, $\rho_{н.в.}$=1,25 кг/м^3, $\rho_{з.в.}$=0,95 кг/м^3, $p_{з.в.}$=10 Па. Определить, какое разряжение $p_{вак}$ должен обеспечить дефлектор, чтобы массовый расход M=3000 кг/ч.

Р е ш е н и е

Для сечений 1-1 и 2-2 составим уравнение Бернули в форме давлений, приняв за плоскость отсчета вход в трубу (плоскость сечения 1-1)

$$g(\rho_{н.в}-\rho_{з.в})H+\rho_{вак}+\rho_{з.в}=\frac{\rho_{з.в}V^2}{2}\left(\zeta_{вх}+\lambda\frac{H}{d}+\zeta_{деф}\right)$$

Отсюда искомое разрежение

$$P_{вак}=\rho_{з.в}\frac{\nu^2}{2}\left(\zeta_{вх}+\lambda\frac{H}{d}+\zeta_{деф}\right)-g(\rho_{н.в}-\rho_{з.в})H-\rho_{з.в}$$

Скорость восходящего потока

$$V=\frac{M\times4}{3600\times\rho_{з.в}d^2\pi}=\frac{3000\times4}{3600\times0{,}95\times0{,}04^2\times3{,}14}=6{,}98\ \text{м/с}.$$

Число Рейнольдса потока:

$$Re=\frac{Vd}{\nu}=\frac{6{,}98\times0{,}4}{0{,}15\times10^{-4}}=186133.$$

Характерные числа Рейнольдса;

- "гладкое": $Re_{гл}=10\frac{d}{\Delta_э}=10\times\frac{400}{0{,}1}=40000<Re$;

- "квадратичное": $Re_{кв}=500\frac{d}{\Delta}=500\times\frac{400}{0,1}=2000000>Re$.

Так как $Re_{гл}<40000<Re = 186133<Re_{кв}=2000000$, то область сопротивления - переходная и $\lambda=f\left(\Delta_э/d, Re\right)$.

Воспользуемся формулой Альтшуля

$$\lambda=0,11\left(\frac{\Delta_э}{d}+\frac{68}{Re}\right)^{0,25}=0,11\left(\frac{0,11}{400}+\frac{68}{186133}\right)^{0,25}=0,017.$$

Подставим заданные и вычисленные значения величин в уравнение для определения разряжения:

$$\rho_{вак}=\frac{0,95\times 6,98^2}{2}\times\left(0,5+0,017\times\frac{5}{0,4}+1,3\right)-$$
$$-9,81\times(1,25-0,95)\times 5-10=33,63 Па$$

В а р и а н т ы з а д а ч и 3

Известно, что d = 350 мм, $\Delta_э$=0,05 мм, H = 4 м, $\zeta_{вх}$=0,5, $\zeta_{деф}$=1,5, $\nu_{з.в.}$ = 0,17·10^{-4} м^2/с, $\rho_{з.в.}$=0,9 кг/м^3, $\rho_{н.в.}$= 1,2 кг/м^3, $p_{з.в}$=10Па.

Определить массовый расход отсасываемого воздуха M если дефлектор создает разряжение $p_{вак}$=60 Па.

2. Известно, что d = 500 мм, $\Delta_э$=0,1мм $\zeta_{вх}$=0,5, $\zeta_{деф}$=1,4, $\nu_{з.в.}$ = 0,21·10^{-4} м^2/с, $\rho_{н.в.}$= 1,25 кг/м^3, $p_{вак}$ = 50 Па, $p_{з.в}$ = 5 Па. $P_{зв}$=0,95кг/м3. Определить, при какой высоте трубы *H* массовый расход M = 2500 кг/ч.

Задача 4

В трубопроводе внутренним диаметром *d*, длиной *l* и шероховатостью $\Delta_э$ компрессором нагнетается массовый расход *M* сжатого воздуха (R = 287 Дж/кг·К), ν = $15\cdot10^{-6}$ м^2/с) под манометрическим давлением $p_{м1}$. Движение воздуха происходит при постоянной температуре *t* и барометрическом давлении $p_{атм}$. По мере удаления от компрессора давление в трубопроводе уменьшается ($p_1>p_2$), а линейная скорость увеличивается ($V_1<V_2$).

Известно, что d = 80 мм, *l* = 250 м, $\Delta_э$ = 0,05 мм, $p_{м1}$ = 950 кПа, t = 25 ^{0}C, $p_{атм}$ = 102 кПа. Определить давление p_2 и линейную скорость V_2 при массовом расходе M = 2 кг/с.

Р е ш е н и е

Плотность воздуха в начальном сечении

$$\rho_1=\frac{p_1}{RT}=\frac{(950+102)\times10^3}{287(273+25)}=12{,}3\ \text{кг/м}^3.$$

Скорость потока воздуха в начальном сечении

$$V_1=\frac{M4}{\rho_1\pi d^2}=\frac{2\times4}{12{,}3\times3{,}14\times0{,}08^2}=32{,}36\ \text{м/с}.$$

Число Рейнольдса воздушного потока

$$Re=\frac{V_1 d}{\nu}=\frac{32{,}36\times0{,}08}{15\times10^{-6}}=172586.$$

Характерные числа Рейнольдса:

- "гладкое": $Re_{гл}=10\frac{d}{\Delta}=10\frac{80}{0{,}05}=18000;$

- "квадратичное": $Re_{кв}=500\frac{d}{\Delta}=500\frac{800}{0{,}05}=800000.$

Так как $Re_{гл}<Re<Re_{кв}$, то область сопротивления – переходная, и для определения коэффициента гидравлического трения воспользуемся формулой Альштуля.

$$\lambda=0{,}11\left(\frac{\Delta_э}{d}+\frac{68}{Re_1}\right)^{0{,}25}=0{,}11\times\left(\frac{0{,}05}{80}+\frac{68}{172586}\right)^{0{,}25}=0{,}02.$$

Так как перепад давления не известен, принимаем формулу для расчета трубопроводов с учетом сжимаемости воздуха

Тогда абсолютное давление в конце трубопровода

$$\rho_2 = \sqrt{\rho_1^2 - \lambda \frac{1}{d} \frac{8M^2}{\pi^2 d^4} RT} =$$

$$= \sqrt{(950+102)^2 \times 10^6 - 0{,}02 \times \frac{250}{0{,}08} \times \frac{8 \times 2^2}{3{,}14^2 \times 0{,}08^4} \times 287 \times (273+25)} = 826 \; Па$$

Манометрическое давление в конце трубопровода

$p_{м2} = p_2 - p_{атм} = 826-102 = 724$кПа.

Плотность воздуха в конце трубопровода

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{P_2}{P_1} = 12{,}3 \times \frac{826 \times 10^3}{(950+102) \times 10^3} = 9{,}66 \text{ кг/м}^3.$$

Относительное изменение плотности

$$2\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} 100 = \frac{12{,}3-9{,}66}{12{,}3+9{,}66} \times 100 = 19{,}4\% > 5\%,$$

т.е. сжимаемость воздуха действительно должна быть учтена.

Искомая скорость потока в конце трубопровода

$$V_2 = V_1 \frac{\rho_1}{\rho_2} = 32{,}26 \times \frac{12{,}3}{9{,}66} = 41{,}2 \text{ м/с}.$$

В а р и а н т ы з а д а ч и 4

1. Известно, что d = 100 мм, l = 500м, $\Delta_э$ = 0,1 мм, t = 30 ^{0}C, $p_{атм}$ = 99 кПа, M = 3 кг/с. Определить, какое давление $p_{м1}$ должен создавать компрессор, чтобы $p_{м2}$ = 800 кПа.

2. Известно, что d = 125 мм, l = 600 м, $\Delta_э$ = 0,2 мм, t = 20^{0}C, $p_{атм}$ = 101 кПа. Определить массовый расход воздуха M, если манометрические давления $p_{м1}$ = 850 кПа и $p_{м2}$ = 620 кПа.

Задача 5

От коллектора газораспределительного пункта (ГРП) природный газ (R=540 Дж/(кг·К), ν=12·10^{-6}м^2/с) подается потребителю по газопроводу внутренним диаметром *d*, длиной *l*, шероховатостью $\Delta_э$ в количестве *M* с избыточным давлением $p_{м2}$. При этом редукционный клапан, установленный на ГРП, отрегулирован на давление $p_{м1}$. Атмосферное давление $p_{атм}$, температура газа *t*.

Известно, что d=100 мм, *l*=106 м, $\Delta_э$=0,16 мм, t=25°С, $p_{атм}$=98 кПа, $p_{м2}$=2 кПа. Определить давление $p_{м1}$, необходимое для подачи массового газа M=0,05 кг/с.

Р е ш е н и е

Плотность газа в конце газопровода

$$\rho_2=\frac{p_{м2}+p_{атм}}{RT}=\frac{2\times10^3+98\times10^3}{540\times(273+25)}=0{,}621\text{кг/м}^3.$$

Скорость потока газа

$$V=\frac{4M}{\rho_2\pi d^2}=\frac{4\times0{,}05}{0{,}621\times3{,}14\times0{,}1^2}=10{,}25\text{м/с}.$$

Число Рейнольдса потока $Re=\frac{Vd}{\nu}=\frac{10{,}25\times0{,}1}{12\times10^{-6}}=85417.$

Характерные числа Рейнольдса:

- “гладкое” $Re_{гл}=10\frac{d}{\Delta}=10\times\frac{100}{0{,}16}=6000;$

- “квадратичное” $Re_{кв}=500\frac{d}{\Delta}=500\times\frac{100}{0{,}16}=3000000.$

Так как $Re_{гл}<Re<Re_{кв}$, то область сопротивления – “переходная” и $\lambda=f(Re.\Delta/d)$.

Для определения коэффициента гидравлического трения воспользуемся формулой Альтшуля

$$\lambda=0{,}11\left(\frac{\Delta_э}{d}+\frac{68}{Re}\right)^{0{,}25}=0{,}11\times\left(\frac{0{,}16}{100}+\frac{68}{85417}\right)^{0{,}25}=0{,}0243.$$

В качестве первого приближения считаем, что сжимаемостью газа можно пренебречь.

Тогда

$$\rho_{м1} = \rho_{м2} + \lambda \frac{1}{d} \frac{8M^2}{\rho \pi^2 d^4} = 2 \times 10^3 + 0{,}0243 \times \frac{106}{0{,}1} \times$$

$$\times \frac{8 \times 0{,}05^2}{0{,}621 \times 3{,}14^2 \times 0{,}1^4} = 2{,}84 \times 10^3 \ Па$$

Плотность газа в начале газопровода

$$\rho_1 = \rho_2 \frac{p_{м1} + p_{атм}}{p_{м2} + p_{атм}} = 0{,}621 \frac{2{,}84 \times 10^3 + 98 \times 10^3}{2 \times 10^3 + 98 \times 10^3} = 0{,}626 \text{ кг/м}^3.$$

Относительное изменение плотности газа

$$2 \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \times 100 = 2 \frac{0{,}626 - 0{,}621}{0{,}626 + 0{,}621} \times 100 = 0{,}83\%,$$

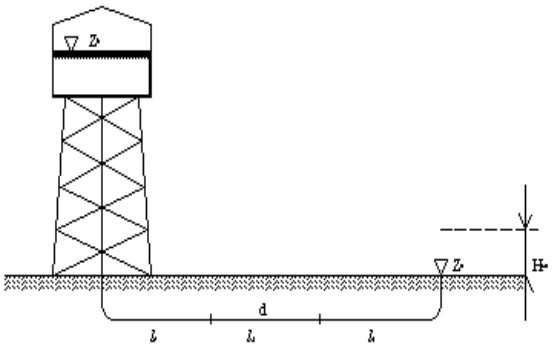
т.е. наше предположение, что сжимаемостью газа можно пренебречь, справедливо.

В а р и а н т ы з а д а ч и 5

1. Известно, что d=80 мм, l=86 м, $\Delta_э$=0,1 мм, t=15°C, $p_{атм}$=104 кПа, $p_{м1}$=4 кПа. Определить давление $p_{м2}$ при подаче массового расхода газа M=0,04 кг/с.

2. Известно, что d=50 мм, $\Delta_э$=0,05 мм, t=25°C, $p_{атм}$=101 кПа, $p_{м1}$=2,6 кПа, M=0,02 кг/с. Определить, на каком расстоянии l давление $p_{м2}$=2 кПа.

Задача 6



Вода в количестве Q подается из водонапорного бака к потребителю по трубопроводу диаметром d_y. Трубопровод имеет три участка труб из разных материалов: *1* – чугунная напорная не новая; 2 – стальная электросварная новая; 3 – асбестоцементная класса ВТ-9 типа 1; длины участков соответственно равны l_1, l_2, l_3. Отметки уровня воды в водонапорном баке $z_б$, поверхность земли у потребителя z_n; свободный напор потребителя $H_{св}$.

Известно, что d_y =100 мм, l_1=250 м, l_2=280 м, l_3=300 м, z_n=115 м, $H_{св}$= 20 м. Определить требуемую отметку $z_б$ при подаче расхода Q=10 л/с, используя понятие “удельное сопротивление трубы”.

Р е ш е н и е.

Скорости потока воды в трубах диаметром d_y=100 мм

$$V = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \times 0{,}01}{3{,}14 \times d^2} = \frac{0{,}127}{d^2}\, м/с$$

Тогда:

- в чугунной напорной трубе (d=102 мм)

$$V_1 = \frac{0{,}0127}{0{,}102^2} = 1{,}22 м/с;$$

- в стальной электросварной трубе (d=114 мм)

$$V_2 = \frac{0{,}0127}{0{,}114^2} = 0{,}98 м/с;$$

- в асбестоцементной трубе (d=100 мм)

$$V_3 = \frac{0{,}0127}{0{,}1^2} = 1{,}27 м/с$$

Найдем удельные сопротивления A труб диаметром d_y=100 мм при вычисленных скоростях:

- неновая чугунная напорная труба при V=1,22 м/с, $A_{кв}$=311,7(с/м^3)^2; k=1,0; $A_{(1)}$=311,7×1=311,7(с/м^3)^2;

- новая стальная электросварная труба при V=0,98 м/с, $A_{кв}$=172,9(с/м^3)^2; $\frac{A_{кв}}{A_1}$=1,44;

k_1=0,981;

$$A_{(2)}=\frac{172,9}{1,44}\times 0,981=117,8(\text{с}/\text{м}^3)^2;$$

- асбестоцементная труба при V=1,27 м/с

$A_1=187,7(\text{с}/\text{м}^3)^2$; $k_1=0,967$;

$A_{(3)}=187,7\times 0,967=185,2(\text{с}/\text{м}^3)^2$.

Потери напора потока во всем трубопроводе

$$h_w=[\sum_{i=1}^{3}(A_i\times l_i)]\times Q^2,$$

то есть

$h_w=(311,7\times 250+117,8\times 280+185,2\times 300)\times 0,01^2=16,6$ м.

Искомая отметка уровня воды в водонапорном баке

$z_б=z_п+H_{св}+h_w=115+20+16,6=151,6$ м.

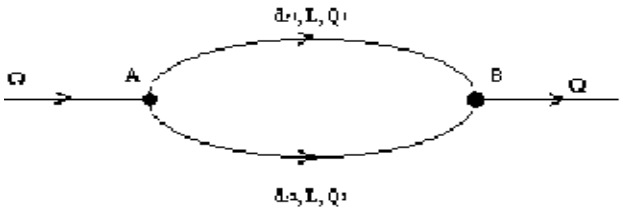
В а р и а н т ы з а д а ч и 6

1. Известно, что d_y=200 мм, l_1=110 м, l_2=87 м, l_3=73 м, $z_б$=216 м, $z_п$=195 м. Определить величину свободного напора $H_{св}$ при пропуске расхода Q=34 л/с.

2. Известно, что d_y=150 мм, l_1=160 м, l_2=140 м, l_3=120 м, Q=20 л/с, $z_б$=88 м. Определить, при какой отметке $z_п$ величина свободного напора $H_{св}$=25 м.

Кольцевая сеть

Задача 1



Участок *AB* трубопровода выполнен в виде двух труб диаметрами d_{y1} и d_{y2}, длиной *L* каждая. В расчете использовать понятие “модуль расхода К”. Известно, что L=250 м, трубы чугунные напорные новые диаметрами d_{y1}=100 мм и d_{y2}=150 мм. Определить потери напора h_n на участке *AB* при пропуске расхода Q=30 л/с.

Р е ш е н и е

Для чугунных напорных труб находим:

- для d_{y1}=100 мм $K_{кв1}$=56,5 л/с; $\sqrt{\frac{K_1}{K_{кв1}}}$=1,13; d_1=102 мм;

- для d_{y2}=150 мм $K_{кв2}$=164 л/с; $\sqrt{\frac{K_2}{K_{кв2}}}$=1,09; d_2=152,4 мм.

Система уравнений для определения расходов Q_1 и Q_2 на участках в квадратичной области сопротивления (первое приближение) будет такой:

$$\left.\begin{array}{l} Q_1+Q_2=Q; \\ \dfrac{Q_1^2}{K_{кв1}^2}L=\dfrac{Q_2^2}{K_{кв2}^2}L, \end{array}\right\} \quad \text{т.е.} \quad \left.\begin{array}{l} Q_1+Q_2=30; \\ \dfrac{Q_1}{56,5}=\dfrac{Q_2}{164}. \end{array}\right\}$$

Решим её

$$Q_1=Q_2\frac{56.5}{164}=.0.3445Q_2$$

Решим ее:

$$0,3445Q_2 + Q_2 = 30; \qquad Q_2=\frac{30}{1,3445}=22,31 \text{ л/с};$$

$$Q_1=30-Q_2=30-22,31=7,69 \text{ л/с}.$$

Скорости потока воды в трубах по участкам сети $V=\frac{4Q}{\pi d^2}$:

$$V_1=\frac{4\times7,69}{3,14\times1,02^2}=9,8\text{дм/с}=0,98\text{ м/с};$$

$$V_2=\frac{4\times22,31}{3,14\times1,524^2}=12,63\text{дм/с}=1,26\text{ м/с}.$$

Уточним значения модулей расхода (второе приближение). Для новой чугунной трубы находим поправочные коэффициенты:

при V=0,98 м/с находим n_1=0,99; тогда

$$K_1=56,5\sqrt{1,13}\times0,99=60,3\text{ л/с};$$

при V=1,26 м/с находим n=1,022; тогда

$$K_2=164\sqrt{1,09}\times1,022=175\text{ л/с}.$$

Получаем уточненную систему уравнений для определения расходов:

$$\left.\begin{aligned} &Q_1+Q_2=30;\\ &\frac{Q_1}{60,3}=\frac{Q_2}{175}. \end{aligned}\right\}$$

Решим ее:

$$Q_2\left(1+\frac{60,3}{175}\right)=30; \qquad Q_2=22,3\text{ л/с}; \qquad Q_1=7,7\text{ л/с}.$$

Разницу расходов в двух приближениях считаем допустимой, поэтому дальнейшего уточнения модулей расхода К не проводим.

Искомые потери напора

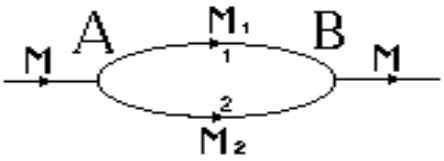
$$h_n=\frac{Q_1^2}{K_1^2}L=\frac{Q_2^2}{K_2^2}L \qquad \text{т.е.} \quad h_n=\frac{7,7^2}{60,3^2}\times250=4,08\ м.$$

В а р и а н т ы з а д а ч и 1

1. Известно, что трубы новые электросварные d_{y1}=125 мм, d_{y2}=175 мм, L=300 м. Определить потери напора h_n при расходе Q = 40 л/с.

2. Известно, что трубы асбестоцементные класса ВТ-6, тип 1, d_{y1}=150 мм, d_{y2}=200 мм, L=350 м. Определить потери напора h_n при расходе Q=50 л/с.

Задача 2



На участке *AB* газопровод состоит из двух параллельно соединенных ветвей *1* и *2* длинами l_1 и l_2, внутренними диаметрами d_1 и d_2 шероховатостью $\Delta_э$. По газопроводу транспортируется газ (R = 510Дж/(кг К)), с температурой *t*. При атмосферном давлении $p_{атм}$ манометрические давления в узлах *A* и *B* составляют соответственно $p_{ма}$ и $p_{мв}$, а массовый расход *M* делится по ветвям *1* и *2* на M_1 и M_2. Расчет вести для квадратичной области сопротивления.

Известно что d_1=100 мм, l_1=400м, d_2=125мм, l_2=500 м, $\Delta_э$=0,2мм, t = 20°C, $p_{атм}$= 101 кПа, $p_{ма}$= 0,3мПа.

Определить манометрическое давление $p_{мв}$, если массовый расход M = 0,3кг/с.

Р е ш е н и е

Манометрическое давление в узле В

$$p_{мв} = \sqrt{(p_{ма} + p_{атм})^2 - \lambda_2 \frac{l_2}{d_2} \frac{M_2^2 \times 16}{\pi^2 d_2^4} RT} - p_{атм}$$

Коэффициенты гидравлического трения ветвей газопровода найдем по формуле Шифринсона

$$\lambda_1 = 0{,}11\left(\frac{\Delta э}{d_1}\right)^{0{,}25} = 0{,}11 \times \left(\frac{0{,}2}{100}\right)^{0{,}25} = 0{,}0233;$$

$$\lambda_2 = 0{,}11\left(\frac{\Delta э}{d_1}\right)^{0{,}25} = 0{,}11\left(\frac{0{,}2}{125}\right)^{0{,}25} = 0{,}022$$

Найдем распределение общего массового расхода *M* по ветвям 1 и 2 (M_1 и M_2).

Для этого составим систему из двух уравнений

$$\left.\begin{aligned} &M_1 + M_2 = M; \\ &\lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \frac{M_1^2}{d_1^4} = \lambda_2 \frac{l_2}{d_2} \frac{M_2^2}{d_2^2} \end{aligned}\right\}$$

т.е.

$$\left.\begin{array}{l} M_2+M_1=0,3; \\ 0,0233\times\dfrac{400}{0,1}\times\dfrac{M_1^2}{0,1^4}=0,0233\times\dfrac{500}{0,125}\times\dfrac{M_2^2}{0,125^4} \end{array}\right\}.$$

Решим ее:

$$932\times10^3M_1^2=360\times10^3M_2^2; \quad M_1=M_2\,\frac{360}{932}=0,621\times M_2$$

$$0,621\times M_2+M_2=0,3;\ M_2=\frac{0,3}{1+0,621}=0,185 \text{ кг/с.}$$

Искомое манометрическое давление

$$p_{мв}=\sqrt{\left(0,3\times10^6+101\times10^3\right)^2-0,022\times\frac{500}{0,125}\times\frac{0,185^2}{3,14^2}\times}$$

$$\overline{\times\frac{16}{0,125^4}\times510\times(273\text{-}20)\text{-}101\times10^3}=296,2 \text{ кПа}$$

В а р и а н т ы з а д а ч и 2

1. Известно, что d_1 =125мм, l_1 = 520м, d_2 = 150мм, l_2 = 600мм, $\Delta_э$= 0,1мм , t = 15 0 С, $p_{атм}$=98 кПа, M = 0,5 кг/с.

Определить манометрическое давление $p_{ма}$ если $p_{мв}$ = 0,12 мПа.

2. Известно, что d_1 =100 мм, l_1 =550 м, d_2 =150 мм, l_2 = 530м, $\Delta_э$ = 0,1 мм. Определить общий массовый расход газа *M* и перепад давления $\Delta_p=p_{ма}-p_{мв}$, если M_1 = 0,2 кг/с.