

Лекция

Расчет простых трубопроводов

Гидравлический расчет трубопроводов

Задачи на расчет простого трубопровода делятся на три типа.

1 тип. Даны: расход жидкости Q в трубопроводе, его геометрические параметры ($l, d, \Delta z$), шероховатость труб; давление в конечном сечении (либо в начальном для всасывающих трубопроводов) и свойства жидкости (ρ, ν). Местные сопротивления заданы коэффициентами ζ либо оцениваются по справочным данным.

Требуется найти потребный напор $H_{\text{потр}}$.

Алгоритм решения:

1) Определить режим течения. С этой целью нужно найти число Рейнольдса Re по известным Q , d и ν .

2) При ламинарном режиме напор вычисляется по формулам (7) и (8)

3) При турбулентном режиме задача решается с помощью формул (3) или (4) в зависимости от шероховатости труб (*Пример 2*).

2 тип. Даны: располагаемый напор $H_{\text{расп}}$, все величины, перечисленные в задаче 1-го типа, кроме расхода Q .

Так как число Рейнольдса Re нельзя вычислить, то режимом движения необходимо задаться, основываясь на роде жидкости. Для вязких жидкостей (масло) выбирать ламинарный режим течения, для маловязких (вода, бензин, керосин) – турбулентный. Для проверки правильности выбора в конце решения необходимо вычислить число Рейнольдса. Либо по формулам (7) и (8) выразить диаметр через критическое число Рейнольдса и определить $H_{\text{кр}}$, соответствующее смене режима. Сравнивая $H_{\text{кр}}$ и $H_{\text{расп}}$, определяют режим течения.

При ламинарном режиме задача решается на основании формул (7) и (8).

При турбулентном режиме в уравнениях (7) и (9) содержатся две неизвестные Q и λ_t , зависящие от числа Рейнольдса. В этом случае для решения задачи требуется метод последовательных приближений. Для этого в первом приближении следует задаться коэффициентом λ_t . Выбрав начальное значение λ_t , решить задачу по 1-му типу. По полученным данным следует заново найти λ_t и повторить все вычисления, приближаясь к истинному результату.

3 тип. Даны: располагаемый напор $H_{\text{расп}}$, расход жидкости Q в трубопроводе, его геометрические параметры и свойства жидкости, перечисленные выше, кроме диаметра трубопровода d .

Так как число Рейнольдса Re нельзя вычислить, то режимом движения либо необходимо задаться, либо по формулам (7) и (8) выразить диаметр через критическое число Рейнольдса и определить $H_{\text{кр}}$, соответствующее смене режима. Сравнивая $H_{\text{кр}}$ и $H_{\text{расп}}$, определяют режим течения.

При ламинарном режиме задача решается на основании формул (7) и (8).

При турбулентном режиме решение нужно проводить с использованием графиков. Для этого следует

1) задать ряд значений диаметра d и по ним подсчитать $H_{\text{потр}}$;

2) построить график $H_{\text{потр}} = f(d)$;

3) по графику, зная $H_{\text{расп}}$, определить d .

Все трубопроводы подразделяются на две категории: простые и сложные.

Простой трубопровод не имеет разветвлений на пути движения жидкости, но может представлять последовательное соединение труб разного диаметра.

Сложный трубопровод имеет хотя бы одно разветвление и может содержать как параллельные и последовательные соединения труб.

Если в трубопроводе необходимо обеспечить расход жидкости Q , то потребный для этого напор $H_{\text{потр}}$ – пьезометрическая высота в начальном сечении определяется по формуле

$$z_1 = H = H + \sum h, \quad (1)$$

$$= \Delta z + \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} + h_{\text{потр.}} + h_{\text{ст.}}$$

где $H_{\text{ст.}}$ — статический напор,
 ρg

$\sum h$ - суммарные потери напора на сопротивление в трубопроводе.

Суммарная потеря напора складывается из потерь на трение по всей длине трубы и местных потерь

$$\sum h = h_{\text{тр.}} + \sum h_{\text{м}}$$

Для определения потерь напора на трение в трубах круглого сечения можно использовать формулу Дарси, которую для дальнейших расчетов удобно выразить через расход:

$$h_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{8Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot d^5} \quad (2)$$

где l – длина рассматриваемого участка трубопровода;

d – диаметр трубопровода;

λ – безразмерный коэффициент гидравлического трения (*коэффициент Дарси*).

При турбулентном движении коэффициент трения зависит от числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости трубы $\varepsilon = \frac{\Delta}{d}$. Значения эквивалентной (абсолютной)

шероховатости Δ для различных труб представлены в Приложении 1.

Универсальной формулой, учитывающей одновременно оба фактора является *формула Альтшуля*:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \varepsilon^{0,25} \right)^2 \quad (3)$$

Для гидравлически гладких труб шероховатость на сопротивление не влияет, и коэффициент сопротивления λ однозначно определяется числом Рейнольдса:

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (4)$$

Местные потери напора
определяются по формуле
Вейсбаха:

$$h_{\text{м}} = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

где v – средняя скорость потока в сечении перед местным сопротивлением

ζ – коэффициент местного сопротивления (определяется формой местного сопротивления и его геометрическими параметрами).

С учетом формул Дарси и Вейсбаха,

$$\sum h = h_{\text{тр.}} + \sum h_{\text{м}} = \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \cdot \frac{8Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot d^5} \quad (6)$$

При *внезапном расширении трубы* потеря напора происходит при вводе жидкости в силовые цилиндры, пневмогидравлические аккумуляторы, фильтры и прочие устройства. Величина этой потери равна скоростному напору потерянной скорости (*теорема Борда*):

$$h_m = \frac{(u_1 - u_2)^2}{2g} = (1 - \frac{d_1^2}{d_2^2})^2 \frac{u_1^2}{2g}$$

Обозначим $\xi_{\text{расш.}} = (1 - \frac{d_1^2}{d_2^2})^2$ – коэффициент местных сопротивлений при расширении трубы, где d_1 и d_2 – внутренние диаметры сечений трубы перед и за расширением.

В случае *внезапного сужения трубопровода* коэффициент местных сопротивлений равен

$$\xi_{\text{суж.}} = 0,5 \cdot (1 - \frac{S_2}{S_1}),$$

где S_1 и S_2 – площади сечений трубы до и после сужения.

Формула (6.6) справедлива для обоих режимов, однако для ламинарного режима удобнее использовать *формулу Пуазейля*:

$$h_{\text{тр}} = \frac{128 \cdot \nu \cdot l \cdot Q}{g \cdot \pi \cdot d^4}, \quad (7)$$

в которой необходимо заменить фактическую длину трубопровода расчетной, равной

$$l_{\text{расч}} = l + l_{\text{эк}},$$

где $l_{\text{эк}}$ – длина, эквивалентная всем местным гидравлическим сопротивлениям в трубопроводе.

Формула для расчета потребного напора имеет вид

$$H_{\text{потр.}} = H_{\text{ст.}} + k \cdot Q^m, \quad (8)$$

где для ламинарного режима течения

$$k = \frac{128 \cdot \nu \cdot l_{\text{расч}}}{g \cdot \pi^2 \cdot d^4}, \quad m=1;$$

для турбулентного режима течения

$$k = \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} \sum \xi \right) \frac{g \cdot \pi \cdot d^4}{8 \cdot \pi^2 \cdot d^4}, \quad m=2 \quad (9)$$

Характеристики потребного напора $H_{\text{потр.}} = f(Q)$ и суммарных потерь напора трубопроводов $\sum h = \varphi(Q)$ при ламинарном режиме представляет прямые, при турбулентном - параболы.

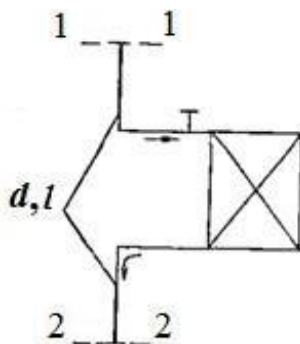
Пример 1. Расход горячей воды с температурой 95°C через радиатор водяного отопления $Q = 0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$. Определить потери давления между сечениями 1-1 и 2-2, если диаметр подводящих трубопроводов $d = 0,0125 \text{ м}$, а их общая длина $l = 5 \text{ м}$. Принять следующие коэффициенты сопротивления:

для поворота

$$\zeta_1 = 1,45$$

для крана $\zeta_2 = 0,5$,

для радиатора $\zeta_3 = 2,1$.



Решение:

Суммарные потери давления складываются из потерь давления по длине и местных потерь:

$$\Delta p_{\text{пот}} = \Delta p_{\text{л}} + \Delta p_{\text{м}}$$

Средняя скорость движения воды в трубопроводе:

$$u = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,1}{3,14 \cdot 3600 \cdot (0,0125)^2} = 0,225 \text{ м/с}$$

Число Рейнольдса определяем с учетом того, что кинематический коэффициент вязкости воды при температуре 95°C $\nu = 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (Приложение 2):

$$\text{Re} = \frac{u d}{\nu}$$

$$\frac{0,225 \cdot 0,0125}{0,3 \cdot 10^{-6}} = 9400$$

Абсолютная шероховатость бесшовной новой стальной трубы
 $\Delta = 5 \cdot 10^{-5}$ м, относительная шероховатость

$$= \frac{5 \cdot 10^{-5}}{0,0125} = 4 \cdot 10^{-3}$$

Таким образом, коэффициент гидравлического трения определяем по формуле:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + 4 \cdot 10^{-3} \right)^{0,25} = 0,036$$

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{0,225 \cdot 9400}{0,0125} = 16920$$

Вычислим потери давления по длине при плотности воды $\rho = 961,9 \text{ кг/м}^3$:

$$\Delta p_{\text{л}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho v^2}{2} = 0,036 \cdot \frac{5}{0,0125} \cdot \frac{961,9 \cdot 0,225^2}{2} = 370 \text{ Па}$$

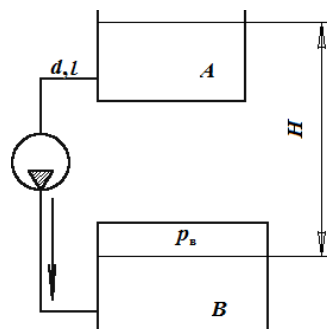
Местные потери давления складываются из потерь на поворот, в пробковом кране и в радиаторе:

$$\Delta p_{\text{м}} = \sum \xi \cdot \frac{\rho v^2}{2} = (2 \cdot 1,45 + 0,5 + 2,1) \cdot \frac{961,9 \cdot 0,225^2}{2} = 134 \text{ Па}$$

Суммарные потери давления

$$\Delta p_{\text{пот}} = 370 + 134 = 504 \text{ Па.}$$

Пример 2. Вода, перекачивается насосом из открытого бака *A* в расположенный ниже резервуар *B*, где поддерживается постоянное давление $p_{\text{в}} = 0,18 \text{ МПа}$ (абс.) по трубопроводу общей длиной $l = 225 \text{ м}$ и диаметром $d = 250 \text{ мм}$. Разность уровней воды в баках $h = 3 \text{ м}$. Определить потребный напор, создаваемый насосом для подачи в бак *B* расхода воды $Q = 98 \text{ л/с}$. Принять суммарный коэффициент местных сопротивлений $\zeta = 6,5$. Эквивалентная шероховатость стенок трубопровода $\Delta = 0,15 \text{ мм}$. Жидкость – вода с плотностью $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ и вязкостью $\nu = 0,01 \text{ Ст}$. Атмосферное давление $p_{\text{а}} = 0,1 \text{ МПа}$.



Решение:

Потребный напор, создаваемый насосом для подачи в бак *B* расхода воды Q равен

$$H_{\text{потр.}} = H_{\text{ст.}} + \sum h$$

Статический напор складывается из пьезометрической высоты на поверхности жидкости в резервуаре B $H_{\text{ст.}}$ $= \frac{p_{\text{в}} - p_{\text{а}}}{\rho g}$ и разности уровней воды в резервуарах h . Т.к. вода перекачивается в

нижний бак, то вторую составляющую подставляем со знаком «-».

Потери напора $\sum h$ складываются из потерь напора на трение по длине трубопровода $h_{\text{тр}}$ и потерь на местных сопротивлениях $h_{\text{м}}$.

Таким образом

$$H_{\text{потр.}} = \frac{p_{\text{в}} - p_{\text{а}}}{\rho g} - h + h_{\text{тр}} + h_{\text{м}}$$

Потери напора $h_{\text{тр}}$ по длине трубопровода определим по формуле Дарси, записав ее через расход:

$$h_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{8Q^2}{\pi^2 d^5}$$

Для правильного вычисления коэффициента трения λ определим режим течения жидкости в трубопроводе:

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

Согласно уравнению неразрывности скорость движения жидкости в трубопроводе

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2}$$

Тогда формула числа Рейнольдса примет вид:

$$Re = \frac{4Q}{\nu d}$$

$$\pi d \nu$$

Подставив значения, определим режим течения жидкости:

$$Re = \frac{4 \cdot 0,098}{3,14 \cdot 0,25 \cdot 0,01 \cdot 10^{-4}} = 499110 \gg 2300$$

Величина числа Рейнольдса указывает на турбулентный режим движения. Для такого значения числа Re коэффициент трения вычислим по универсальной формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}$$

Вычислим
коэффициент
Дарси:

$$+ \frac{0,15}{499110} \right)^{0,25} = 0,018$$

$$499110 \quad 250$$

Вычислим потери напора $h_{\text{тр}}$ по длине трубопровода

$$h_{\text{тр}} = 0,018 \cdot \frac{225 \cdot 8 \cdot (0,098)^2}{9,81 \cdot 3,14^2 \cdot 0,25^5} = 3,291 \text{ м.} \quad \underline{\hspace{2cm}}$$

Местные потери напора h_m определим по формуле Вейсбаха, записав ее через расход:

$$h_m = \zeta \frac{8Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot d^4}$$

Вычислим местные потери h_m :

$$h = 6,5 \cdot \frac{8 \cdot (0,098)^2}{9,81 \cdot 3,14 \cdot 0,25} = 1,32 \text{ м.} \quad \underline{\hspace{2cm}}$$

Окончательно подставив полученные значения, определим потребный напор, используя для расчета избыточное давление в баке B :

$$H_{\text{потр.}} = \frac{(0,18 - 0,1)10^6}{1000 \cdot 9,81} - 3 + 3,291 + 1,32 = 9,8 \text{ м.} \quad \underline{\hspace{2cm}}$$