

от геометрических характеристик местных сопротивлений и от чисел Рейнольдса.

При наличии на трубопроводе нескольких местных сопротивлений, характеризующихся соответствующими коэффициентами сопротивления $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_n$, можно подсчитать суммарную потерю напора на местные сопротивления по формуле

$$\sum h_m = (\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n) \frac{v^2}{2g}. \quad (1.128)$$

С учетом суммы потерь напора по длине этого же трубопровода общая потеря напора выразится зависимостью

$$h_w = h_m + h_l = \left(\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_n + \lambda \frac{l}{d} \right) \frac{v^2}{2g}, \quad (1.128')$$

где выражение в скобках называется коэффициентом сопротивления системы $\xi_{\text{сист}}$,

или

$$h_w = \xi_{\text{сист}} \frac{v^2}{2g}. \quad (1.128'')$$

Глава 6. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

6.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ТРУБОПРОВОДОВ. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Трубопроводы широко применяются для перемещения различных жидкостей (вода, нефть, бензин, различные растворы и т. д.) и изготавливаются из металла, бетона, дерева, пластмасс.

По степени заполнения поперечного сечения жидкостью различают напорные и безнапорные трубопроводы. В напорных трубопроводах жидкостью заполнено полностью все поперечное сечение; в безнапорных — часть поперечного сечения и имеется свободная поверхность.

По виду потерь напора бывают короткие и длинные трубопроводы.

Короткие трубопроводы — это такие трубопроводы, у которых местные потери напора соизмеримы с потерями напора по длине. К ним относятся бензо- и маслопроводы, всасывающие трубопроводы насосных станций, сифоны и т. д.

Длинные трубопроводы — это трубопроводы, у которых местные потери напора незначительны и не превышают 10% от потерь напора по длине, т. е. $h_m \leq 0,1 h_l$. К ним относятся водопроводы и нефтепроводы. В свою очередь, длинные трубопроводы разделяют на простые и сложные.

Простые трубопроводы выполняют без ответвлений; сложные изготавливаются с ответвлениями, переменной длины и диаметра и могут соединяться как последовательно, так и параллельно.

Сложные трубопроводы образуют тупиковую (незамкнутую) и кольцевую (замкнутую) распределительную сеть. В тупиковой сети жидкость движется в одном направлении. В кольцевой сети жидкость в заданную точку может подаваться по нескольким линиям.

Задача гидравлического расчета трубопровода заключается в определении по двум известным третьей величины: расхода жидкости Q , потери напора h_w или диаметра трубопровода d . При расчете трубопроводов эти задачи решаются с помощью уравнения Бернулли (1.75), формул Шези (1.116) и Дарси—Вейсбаха (1.113).

Из формулы Шези с учетом уравнения неразрывности $Q = v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2$ можно получить зависимость для расхода Q :

$$Q = \omega C \sqrt{RI}. \quad (1.129)$$

Обозначим $K = \omega C \sqrt{R}$, тогда

$$Q = K \sqrt{I}. \quad (1.129')$$

Откуда гидравлический уклон определится из выражения

$$I = \frac{Q^2}{K^2}, \quad (1.129'')$$

а потери напора

$$h_w = \frac{Q^2 l}{K^2}.$$

Далее, подставив значения $\lambda = \frac{8g}{C^2}$; $v = \frac{Q}{\omega}$; $d = 4R$ в формулу Дарси—Вейсбаха, получим

$$h_w = \frac{8g}{C^2} \frac{l}{4R} \frac{Q^2}{\omega^2 2g} \quad (1.130)$$

или после упрощения

$$h_w = \frac{Q^2 l}{\omega^2 C^2 R}, \quad (1.131)$$

т. е.

$$h_w = \frac{Q^2 l}{K^2}. \quad (1.132)$$

Формула (1.132) — основная при расчете трубопроводов. Величина K , содержащаяся в этой формуле, носит название *расход-*

ной характеристики, или модуля расхода трубопровода, и представляет собой расход при гидравлическом уклоне $I=1$. Значение этой величины в зависимости от диаметра труб, их материала и состояния приводится в специальных таблицах гидравлических справочников. Величину, обратную модулю расхода $A=1/K^2$, называют *удельным сопротивлением трубопровода*, которое численно равно напору, затрачиваемому на единице длины трубопровода при единичном расходе.

6.2. РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ

Расчет коротких трубопроводов. Рассмотрим короткий трубопровод с местными сопротивлениями, присоединенный к резервуару, заполненному жидкостью (рис. 1.38). Истечение жидкости в атмосферу из трубопровода длиной l и диаметром d происходит под постоянным напором H . При заданных длине и диаметре трубопровода необходимо определить скорость движения v и расход жидкости Q .

Составим уравнение Бернулли для сечений 1—1 и 2—2 относительно плоскости сравнения 0—0. При этом считаем, что $v_1^2/2g=0$, $H_1-H_2=H$ и $v_2=v_1$, тогда

$$H_1 + \frac{p_{\text{ат}}}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = H_2 + \frac{p_{\text{ат}}}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_w \quad (1.133)$$

или

$$H = \frac{v^2}{2g} + h_w, \quad (1.133')$$

где h_w — суммарные (по длине и местные) потери напора между сечениями 1—1 и 2—2, которые можно представить в виде зависимости (1.129), т. е. $h_w = \xi_{\text{сист}} v^2/2g$ (потери напора на вход, поворот, по длине и на задвижку).

Формулу (1.133') можно переписать в следующем виде:

$$H = \frac{v^2}{2g} (1 + \xi_{\text{сист}}). \quad (1.133'')$$

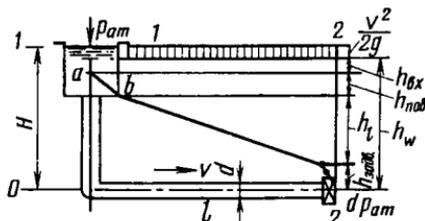


Рис. 1.38. Схема к расчету коротких труб.

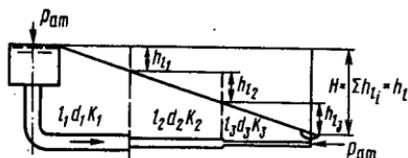


Рис. 1.39. Схема к расчету трубопровода при последовательном соединении труб.

Отсюда найдем скорость истечения жидкости

$$v = \sqrt{\frac{2gH}{1 + \xi_{\text{сист}}}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \xi_{\text{сист}}}} \sqrt{2gH} = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (1.134)$$

где φ — коэффициент скорости и расход, пропускаемый коротким трубопроводом.

$$Q = \omega \varphi \sqrt{2gH} = \mu_{\text{сист}} \omega \sqrt{2gH}, \quad (1.135)$$

где $\mu_{\text{сист}}$ — коэффициент расхода системы (при расчете трубопровода $\mu_{\text{сист}} = \varphi$).

Пьезометрическая линия представлена на рисунке 1.38 в виде ломаной линии $a-b-c-d$.

Расчет длинных трубопроводов при последовательном соединении труб. Рассмотрим трубопровод, состоящий из последовательно соединенных длинных труб разного диаметра d_1, d_2, \dots, d_n и длины l_1, l_2, \dots, l_n при постоянном расходе жидкости по длине трубопровода. Расчет сводится к определению суммарных потерь напора по длине трубопровода, так как местными потерями напора при расчете длинных трубопроводов пренебрегают (рис. 1.39):

$$H = \sum_{i=1}^n h_{l_i} = h_l.$$

Так как мы имеем трубопровод, состоящий из n участков, то по формуле (1.132) для каждого участка можем записать:

$$h_l = \sum_{i=1}^n h_{l_i} = Q^2 \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{K_i^2} = Q^2 \left(\frac{l_1}{K_1^2} + \frac{l_2}{K_2^2} + \dots + \frac{l_n}{K_n^2} \right). \quad (1.136)$$

Формула (1.136) показывает, что трубопровод, составленный из последовательно соединенных труб разного диаметра и длины, можно рассматривать как простой трубопровод, суммарные потери напора в котором равны сумме потерь напора составляющих его труб.

Формула (1.136) позволяет решить и обратную задачу, т. е. при заданных напоре, диаметре труб и длине участков труб вычислить расход жидкости Q , т. е.

$$Q = \sqrt{\frac{H}{\frac{l_1}{K_1^2} + \frac{l_2}{K_2^2} + \dots + \frac{l_n}{K_n^2}}}. \quad (1.136')$$

Расчет трубопровода при параллельном соединении труб (рис. 1.40). Особенность гидравлической схемы работы трубопровода при параллельном соединении труб в том, что все трубы

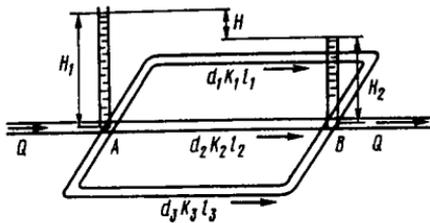


Рис. 1.40. Схема к расчету трубопровода при параллельном соединении труб.

работают под действием напора $H = H_1 - H_2$, который необходим для преодоления потерь напора по длине h_l . При этом следует иметь в виду, что во всех ответвлениях параллельных труб потери напора будут одинаковыми, т. е.

$$h_l = h_{l_1} = h_{l_2} = h_{l_3} = H. \quad (1.137)$$

Расчет трубопровода при параллельном соединении труб сводится к составлению для каждого ответвления уравнения (1.132):

$$h_{l_1} = \frac{Q_1^2 l_1}{K_1^2}; \quad h_{l_2} = \frac{Q_2^2 l_2}{K_2^2}; \quad \dots; \quad h_{l_n} = \frac{Q_n^2 l_n}{K_n^2} \quad (1.138)$$

и общего уравнения для расхода жидкости в трубопроводе:

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = K_1 \sqrt{\frac{H}{l_1}} + K_2 \sqrt{\frac{H}{l_2}} + \dots + K_n \sqrt{\frac{H}{l_n}} = \sum_{i=1}^n Q_i. \quad (1.138')$$

6.3. РАСЧЕТ ТУПИКОВОЙ И КОЛЬЦЕВОЙ СЕТИ ТРУБОПРОВОДА

Расчет тупиковой сети. Тупиковая сеть состоит из магистрального трубопровода и нескольких тупиковых ответвлений (рис. 1.41). На рисунке показано два ответвления (1 и 2), питающихся от одной водонапорной башни по магистральному трубопроводу длиной l и диаметром d . Геометрические высоты z_1, z_2, h_6, z_A , высоты отбора воды h_1, h_2 , пьезометрическая высота в точке разветвления h_A , напор, создаваемый водонапорной башней h_6' , и трубопроводы к потребителям с параметрами l_1, d_1, l_2, d_2 .

На основании формулы (1.132) можно определить потери напора по длине в магистрали (от водонапорной башни до точки А) и в каждом из ответвлений:

для магистрали

$$h_l = (z_6 + h_6) - (z_A + h_A) = Q^2 \frac{l}{K^2}; \quad (1.139)$$

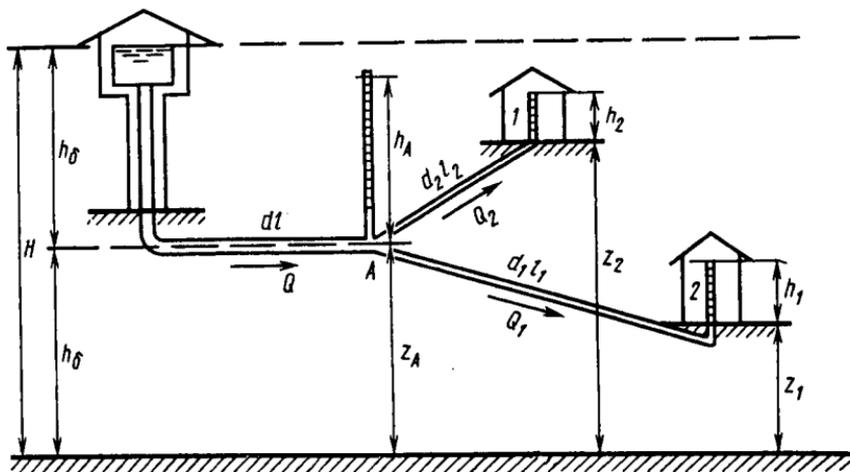


Рис. 1.41. Схема к расчету тупиковой сети.

для ответвлений

$$h_{l_1} = (z_A + h_A) - (z_1 + h_1) = Q_1^2 \frac{l_1}{K_1^2};$$

$$h_{l_2} = (z_A + h_A) - (z_2 + h_2) = Q_2^2 \frac{l_2}{K_2^2}.$$

Кроме того, для точки разветвления мы имеем уравнение

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (1.140)$$

Уравнения (1.139) и (1.140) — исходные уравнения для расчета тупиковой водопроводной сети.

Расчет кольцевой сети. Кольцевая сеть состоит из замкнутых колец и магистралей, присоединенных к водонапорной башне или резервуару. Рассмотрим простейший случай расчета кольцевой водопроводной сети, состоящей из магистрального трубопровода $A-B$ и одного кольца $B-1-2-3-4-B$ (рис. 1.42). Расход, забираемый в точках 1, 2, 3, 4, обозначим соответственно через Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 .

На основании топографических данных, длины участков трубопровода, диаметра труб задаемся направлением движения воды по кольцу и нулевой (раздельной) точкой сети. Нулевая точка выбирается таким образом, чтобы потери напора в ветвях слева и справа от этой точки были одинаковыми. Далее, так же как и при расчете тупиковой сети, определяем диаметр труб и подсчитываем потери напора на каждом участке по левой и правой сторонам кольца.

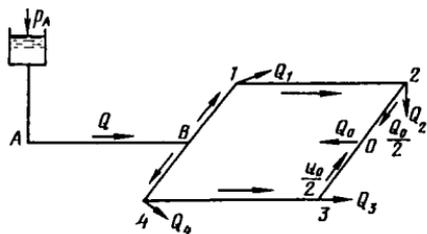


Рис. 1.42. Схема к расчету кольцевой сети.

Если нулевая точка O выбрана правильно, то сумма потерь напора по левой стороне кольца должна равняться сумме потерь напора по правой стороне кольца, т. е.

$$h_{0-2} + h_{2-1} + h_{1-B} = h_{0-3} + h_{3-4} + h_{4-B}, \quad (1.141)$$

где h_{0-2} , h_{2-1} , ..., h_{4-B} — потери напора по длине на соответствующем участке.

Если это условие не выполняется, то расчет следует продолжать до тех пор, пока не будет получено равенство потерь напора в двух рассматриваемых разомкнутых сетях.

6.4. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР В ТРУБОПРОВОДАХ

Гидравлический удар — явление, связанное с резким изменением (повышением или понижением) давления в напорном трубопроводе при быстром изменении (торможении или ускорении) скорости движения жидкости в нем. К возникновению гидравлического удара могут привести мгновенное закрытие или открытие запорных устройств, внезапная остановка и пуск насоса и т. д. Повышение давления при гидравлическом ударе может привести к разрушению трубопровода. С выяснения причин аварий на линиях Московского водопровода, построенных в конце XIX века, началось изучение явления гидравлического удара выдающимся русским ученым Н. Е. Жуковским, которое привело к созданию специальной теории.

Исследования Н. Е. Жуковского показали, что гидравлический удар объясняется возникновением и распространением ударной волны вследствие сжатия воды и расширения стенок трубопровода.

Рассмотрим явление гидравлического удара на примере простого трубопровода, соединенного с резервуаром. По трубопроводу протекает вода со скоростью v . На расстоянии l от входного сечения находится задвижка, которую можно мгновенно закрывать и открывать. При мгновенном закрытии задвижки мгновенно остановятся те частицы жидкости, которые соприкасаются с поверхностью задвижки. Затем остановится ближайший к ним слой жидкости. Произойдет мгновенное сжатие этого слоя и, как следствие, повышение давления, которое называется *ударным давлением* Δp . Затем остановится и сожмется следующий слой жидкости и в нем увеличится давление и т. д.

Пусть за интервал времени Δt ударное давление достигнет резервуара, тогда скорость распространения ударного давления равна:

$$C = l/\Delta t, \quad (1.142)$$

где C — скорость распространения ударной волны.

В результате сжатия частицы жидкости в трубопроводе будут обладать большей энергией, чем частицы жидкости, находящиеся в резервуаре, и начнут перемещаться в сторону резервуара. Затем под действием давления жидкости в резервуаре начнется движение жидкости от резервуара к задвижке, т. е. пройдет новая волна сжатия.

Таким образом, жидкость в трубопроводе будет совершать затухающее (вследствие трения, упругости стенок трубопровода и т. д.) колебательное движение. В действительности гидравлический удар — явление сложное. Мы ограничимся определением повышения давления Δp .

Для этого применим к рассматриваемому явлению теорему об изменении количества движения. У задвижки за время dt остановится объем жидкости длиной dl вследствие воздействия на него возникающего повышенного давления Δp . Тогда изменение количества движения остановившейся массы жидкости запишется следующим образом:

$$[\Delta \text{кд}] = \rho \frac{\pi d^2}{4} dl (v - v_k), \quad (1.143)$$

где v — начальная скорость; v_k — конечная скорость, $v_k = 0$.

Изменение количества движения, согласно указанной теореме, равно импульсу силы, развиваемой давлением Δp , т. е.

$$\rho \frac{\pi d^2}{4} dl v = \Delta p \frac{\pi d^2}{4} dt$$

или

$$\Delta p = \rho \frac{dl}{dt} v, \quad (1.144)$$

где $\frac{dl}{dt}$ — скорость распространения ударной волны.

Тогда повышение давления при гидравлическом ударе

$$\Delta p = \rho C v. \quad (1.145)$$

Формула (1.145) предложена Н. Е. Жуковским для определения величины гидравлического удара, показывающая, что величина ударного давления зависит от начальной скорости жидкости в трубопроводе и от скорости распространения ударной волны.

Скорость распространения ударной волны определяется по формуле

$$C = \frac{\sqrt{E_0 \rho}}{\sqrt{1 + E_0 d / E \delta}}, \quad (1.145')$$

где d — диаметр трубы; E — модуль упругости материала стенок трубопровода (для стали $E = 1,96 \cdot 10^{11}$ Па); δ — толщина стенок трубопровода; E_0 — модуль объемной упругости жидкости, для воды $E_0 = 1,96 \cdot 10^9$ Па.

Из этой формулы видно, что гидравлический удар более опасен в трубопроводах с малым диаметром и меньшей эластичностью материала труб.

Для воды $\sqrt{E_0 \rho} = 1425$ м/с, тогда для различных значений d и δ скорость распространения ударной волны C будет равна:

d , мм	δ , мм	C , м/с	d , мм	δ , мм	C , м/с
50	7	1348	200	10,5	1209
100	8,5	1289	250	11,5	1187
150	9,5	1255	300	12,5	1167

Для предохранения трубопровода от вредного влияния гидравлического удара следует не допускать быстрого закрытия задвижек или применять дополнительные противоударные устройства в виде демпфирующих воздушных колпаков, уравнительных резервуаров.

Глава 7. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И НАСАДКИ

7.1. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ

Задача об истечении жидкости через отверстия — одна из основных в гидравлике и сводится к определению скорости истечения и расхода вытекающей жидкости.

В зависимости от размеров и формы различают малые и большие отверстия в тонкой и толстой стенках.

В зависимости от расположения отверстия и условий протекания жидкости различают совершенное и несовершенное, полное и неполное сжатие струи, истечение из затопленного и незатопленного отверстия при постоянном и переменном напоре.

Малым отверстием называется такое отверстие, у которого поперечный размер a менее $0,1 H$ (где H — действующий напор).

Большим отверстием называется такое отверстие, у которого поперечный размер a более $0,1 H$ (при круглом отверстии $a = d$).