3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

3.1. Краткие теоретические сведения

Различают два вида гидравлических потерь напора: местные потери и потери на трение по длине. Местные потери напора происходят в так называемых местных гидравлических сопротивлениях, т. е. в местах изменения формы и размеров русла, где поток так или иначе деформируется — расширяется, сужается, искривляется - или имеет место более сложная деформация. Местные потери выражают формулой Вейсбаха:

$$h_{\text{м}} = f_{\text{м}} \frac{V^2}{2g}, \tag{3.1}$$

где V - средняя скорость потока в сечении за местным сопротивлением;

$f_м$ — безразмерный коэффициент местного сопротивления.

При турбулентном режиме в случае внезапного расширения трубы потеря напора определяется формулой Борда:

$$h_p = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} = f_p \frac{V_1^2}{2g}, \tag{3.2}$$

где V_1 и V_2 — скорости до и после расширения трубы;

f_p— коэффициент сопротивления, равный для данного случая:

$$f_p = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2, \tag{3.3}$$

где S_1 и S_2 — площади сечений трубы до и после внезапного расширения.

При внезапном сужении трубы без закругления коэффициент сопротивления определяют по формуле Идельчика:

$$f_c = 0{,}5\left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right). \tag{3.4}$$

Коэффициенты сопротивлений для постепенно расширяющихся труб — диффузоров и плавно сужающихся труб — сопл, а также других местных гидравлических сопротивлений (поворотов, кранов, фильтров и т. п.) — приведены в справочной литературе.

Потери напора на трение по длине l определяются общей формулой Дарси-Вейсбаха:

$$h_{дл} = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}, \qquad (3.5)$$

где λ - безразмерный коэффициент гидравлического трения определяется в зависимости от режима течения.

При ламинарном режиме λ однозначно определяется числом Рейнольдса, т. е.

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \qquad (3.6)$$

При ламинарном режиме вместо формул (3.5) и (3.6) можно воспользоваться зависимостью Пуазейля:

$$h_{дл} = \frac{128 v l Q}{\pi g d^4}. \qquad (3.7)$$

При турбулентном режиме коэффициент гидравлического трения λ, в общем случае зависит от числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости Δ/d. Если для так называемых гидравлически гладких труб шероховатость на сопротивление не влияет, то коэффициент λ однозначно определяется числом Re. Наиболее применимой для этого случая является формула Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0{,}316}{Re^{0.25}}. \qquad (3.8)$$

Границу зоны гидравлически гладких труб можно определить из условия

$$\psi < 10, \qquad (3.9)$$

где ψ - критерий зоны турбулентности, определяемый формулой

$$\Psi = \mathrm{Re}\frac{\Delta}{d}. \qquad (3.10)$$

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

$$\lambda = 0{,}11\left(\frac{\Delta}{d}+\frac{68}{Re}\right)^{0{,}25}. \qquad (3.11)$$

Формула Альтшуля применяется для шероховатых труб в переходной области сопротивления, где на гидравлические сопротивления оказывают влияние и *Re* и Δ/d.

Границу переходной области можно определить из условия

$$10 \le \psi \le 500\,. \qquad (3.12)$$

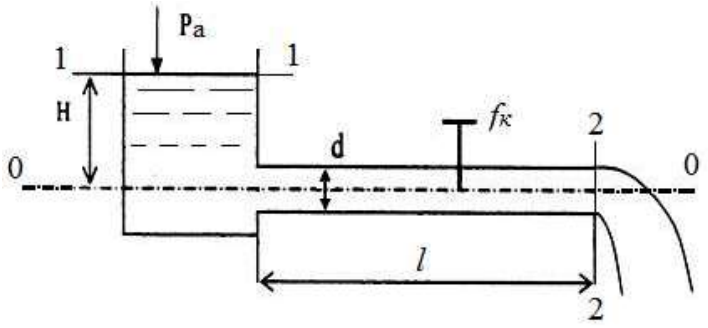
Коэффициент λ в квадратичной области сопротивления можно определить по формуле Шифринсона:

$$\lambda = 0{,}11\left(\frac{\Delta}{d}\right)^{0{,}25}, \qquad (3.13)$$

которая применима при условии $(\Delta / d) < 0{,}007$.

3.2. Указания и примеры решения задач

Пример 3.1. Вода с кинематической вязкостью $\nu = 1\cdot10^{-6}$ м^2/с вытекает из бака по стальному (Δ=0,1 мм) трубопроводу длиной ℓ = 10 м и диаметром d = 25 мм в атмосферу. На трубопроводе установлен кран, имеющий коэффициент местного сопротивления $f_к$ = 0,5. Определить, какой напор H необходимо иметь в баке, чтобы обеспечить расход в трубопроводе равный Q = 0,5 л/с (0,0005 м^3/с).



Решение.

Первое сечение выбираем на свободной поверхности жидкости, а второе – на выходе из трубы. Плоскость сравнения пусть

совпадает с осью трубы. Тогда элементы уравнения Бернулли примут следующие значения:

$Z_1 = H$; $Z_2 = 0$; $p_1 = p_a$; $p_2 = p_a$; $V_1 = 0$; $V_2 = V$; $h_{пот} = h_{дл} + h_м =$ $= \lambda \frac{l}{d}\frac{V^2}{2g} + f_к \frac{V^2}{2g}$, а само уравнение – следующий вид

$$H + \frac{p_a}{\rho g} + 0 = 0 + \frac{p_a}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V^2}{2g} + \lambda \frac{l}{d}\frac{V^2}{2g} + f_к \frac{V^2}{2g}$$

В результате преобразований получаем

$$H = \frac{V^2}{2g}\left(\alpha_2 + \lambda \frac{l}{d} + f_к\right). \qquad (3.14)$$

Неизвестными в этой формуле являются α_2 ; λ и V.

1. Определяем $V = Q/S$ = 0,0005/(0,785·0,025^2) = 1,02 м/с.

2. Определяем Re = Vd/ν = (1,02·0,025)/1·10^{-6} = 25500.

Режим турбулентный, значит $\alpha_2 = 1$.

3. Определяем $\psi = Re\frac{\Delta}{d}$ = $25500\frac{0,1}{25} = 102$, что соответствует переходной области сопротивления.

4. Определяем λ по формуле (3.12)

$$\lambda = 0,11\left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re}\right)^{0,25} = 0,11\left(\frac{0,1}{25} + \frac{68}{25500}\right)^{0.25} = 0,031$$

5. Подставляем найденные значения в формулу (3.14)

$$H = \frac{1,02^2}{2 \cdot 9,81}\left(1 + 0,031\frac{10}{0,025} + 0,5\right) = 0,74 \text{ м.}$$

Ответ H=0,74 м.

3.3. Контрольные задачи

Задача 3.1. Керосин (плотностью 850 м^3/с) перекачивается по горизонтальной трубе длиной l и диаметром d в количестве Q в атмосферу. Определить потребный напор, если $\nu_{кер}$=0,025 Ст и шероховатость стенок труб - Δ. Местные гидравлические сопротивления учесть суммарным коэффициентом $\sum f_м$.

Задача 3.2. Жидкость с плотностью ρ и вязкостью v подается в атмосферу по горизонтальной трубе длиной l диаметром d в количестве Q. Определить давление, которое требуется для указанной подачи. Местные гидравлические сопротивления отсутствуют.

Таблица 3.1

Данные для задачи 3.1

Показатель	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Q, л/с	9,8	8,8	9,2	9,4	8,7	8,6	8,4	8,5	8,3	8,2
l, м	50	40	45	55	52	48	42	54	44	40
d, мм	50	38	35	40	45	50	55	48	52	40
Δ, мкм	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
$\sum f_м$	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	2,0	1,5	2,5	3,0

Таблица 3.2

Данные для задачи 3.2

Показатель	Последняя цифра зачетки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Q, л/с	1,57	0,8	1,2	1,5	2	3	4	5	6	7
ρ, кг/м^3	850	900	820	780	800	840	880	850	900	820
v, Ст	2,0	2,2	2,1	1,9	1,8	1,7	2,1	2,2	2,3	2,4
d, мм	20	30	35	40	45	50	55	60	65	70
l, м	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65